– ANAIS –

5º CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AMBIENTAL

VOLUME 1: RESUMOS EXPANDIDOS



– 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 1 – RESUMOS EXPANDIDOS

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 1 / 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.

849p.: il.;
ISBN • 97890837148-06

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

VIRTUS IMPAVIDA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

UFCG
SUPRA OMNES LUX LUCIS
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
PosGeo
Universidade Federal Fluminense

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

ProfÁgua

SUMÁRIO

RESUMOS EXPANDIDOS

1. AGRICULTURA REGENERATIVA

RECUPERAÇÃO DE ÁREA DEGRADADA COM A IMPLANTAÇÃO DE PRODUÇÃO DE MARACUJAZEIRO (*PASSIFLORA EDULIS* F. *FLAVICARPA*) 23

A JORNADA DO CRÉDITO DE CARBONO DE AGRICULTURA REGENERATIVA ATÉ ATIVO FINANCEIRO SOB A ÓTICA DAS FINANÇAS SUSTENTÁVEIS 26

2. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

CONTAMINAÇÃO E ATENUAÇÃO NATURAL EM ÁREA COM REMANESCENTE FLORESTAL IMPACTADA POR VAZAMENTO DE NAFTA 30

CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS- QUÍMICOS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS OBTIDAS EM POÇOS TUBULARES DO MUNICÍPIO DE JUAZEIRINHO/PB 33

QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM CAVERNAS CÁRSTICAS TURÍSTICAS E NÃO TURÍSTICAS DO PLANALTO CENTRAL BRASILEIRO 39

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E ANÁLISE ESTATÍSTICA DE POÇOS NO CARIRI OCIDENTAL PARAIBANO..... 43

RESULTADOS DE SEIS TESTES DE CAMPO IN SITU PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA IMPACTADA POR PFAS 47

4. DESASTRES NATURAIS

MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À INUNDAÇÃO NO MUNICÍPIO DE PITANGA-PR 52

MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À INUNDAÇÃO NO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA..... 57

MAPEAMENTO DE ÁREAS DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA NO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA-PR 61

IDENTIFICAÇÃO, AVALIAÇÃO E MONITORAMENTO DOS RISCOS DE EVENTOS CLIMÁTICOS VISANDO A QUALIFICAÇÃO DOS SISTEMAS PÚBLICOS DE ALERTA PARA AS REGIÕES DO VALE DO RIO PARDO E VALE DO TAQUARI..... 65

ANÁLISE DA ESTRUTURA LEGAL E ADMINISTRATIVA DA GESTÃO DE RISCOS E DESASTRES SOCIOAMBIENTAIS: O CASO DOS MUNICÍPIOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO HERCÍLIO EM SANTA CATARINA 69

ANÁLISE DAS ARQUITETURAS DE REDES NEURAIS APLICADAS À PREVISÃO DE ENCHENTES: UMA REVISÃO DE TRABALHOS RECENTES..... 73

PADRÕES ESPACIAIS DE MOVIMENTOS DE MASSA EM VERANÓPOLIS (RS): ANÁLISE POR DENSIDADE KERNEL..... 77

5. DESCARBONIZAÇÃO

GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM INSTITUIÇÃO DE ENSINO TÉCNICO: ANÁLISE DAS EMISSÕES OPERACIONAIS EM DIFERENTES CENÁRIOS ENERGÉTICOS 82

DESCARBONIZAÇÃO NA INDÚSTRIA DE CIMENTO E UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE 86

UTILIZAÇÃO DA MATRIZ SWOT COMO PARTE DO PLANEJAMENTO CLIMÁTICO DO SETOR DE AGRICULTURA, FLORESTA E OUTROS USOS DA TERRA (AFOLU) DO PARANÁ 89

6. Economia Circular e Bioeconomia

UMA COMPARAÇÃO DE EMISSÕES DE CO2 ENTRE A FABRICAÇÃO E A MANUTENÇÃO DE TRANSFORMADORES ELÉTRICOS 94

REÚSO SEGURO DE EFLUENTES SANITÁRIOS: AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA INTEGRADA APÓS TRATAMENTO AVANÇADO 98

APROVEITAMENTO DE SUBPRODUTOS DE FRUTAS PARA DESENVOLVIMENTO DE SNACKS E REDUÇÃO DO DESPERDÍCIO ALIMENTAR 101

DESPERDÍCIO ALIMENTAR NA FORMAÇÃO GASTRONÔMICA: UMA REVISÃO DA LITERATURA SOB A PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR 105

OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE QUITOSANA PROVENIENTE DE TENEBRIO MOLITOR 109

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA CASCA E DA CINZA DA CASCA DE ARROZ NA REMOÇÃO DE CORANTE CATIÔNICO EM UMA COLUNA DE ADSORÇÃO DE LEITO FIXO 112

ANÁLISE COMPARATIVA DO IMPACTE AMBIENTAL DE DIFERENTES SISTEMAS DE EMBALAGEM PARA AZEITE VIRGEM EXTRA 116

POTENCIAL USO DE SUBPRODUTOS DA INDÚSTRIA DE CELULOSE PARA DESENVOLVIMENTO DE MEMBRANAS CERÂMICAS 119

USO DE ESCÓRIA DE ACIARIA DO TIPO LD COMO ALTERNATIVA NO TRATAMENTO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA 123

GRADIENTE DE TEMPERATURA COMO ESTRATÉGIA PARA CRESCIMENTO DE CRISTAIS DE ESTRUVITA 127

ECONOMIA CIRCULAR NO CONTEXTO DO SANEAMENTO BÁSICO BRASILEIRO COMO UMA NOVA PERSPECTIVA DE GESTÃO PÚBLICA 131

7. Educação Ambiental

EDUCAÇÃO AMBIENTAL POR MEIO DA GAMIFICAÇÃO, UMA EXPERIÊNCIA LÚDICA NO MUNICÍPIO DE LUÍS EDUARDO MAGALHÃES - BA 136

IMPLANTAÇÃO DE COMPOSTEIRAS DOMÉSTICAS COMO ESTRATÉGIA DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL: DESAFIOS OPERACIONAIS E PERCEPÇÃO DOS USUÁRIOS EM MATUPÁ 139

EDUCAÇÃO AMBIENTAL POR MEIO DE PROJETO INTERDISCIPLINAR: DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA O ENSINO FUNDAMENTAL 143

LEVANTAMENTO FLORÍSTICO E IMPLICAÇÕES PARA A GESTÃO AMBIENTAL E DE INFRAESTRUTURA EM UMA INSTITUIÇÃO DE ENSINO 146

SANEAMENTO ALÉM DO CANO: DOSADORES ARTESANAIS E FILTROS DE BARRO COMO ESTRATÉGIA DE SOBERANIA HÍDRICA E JUSTIÇA AMBIENTAL EM COMUNIDADES RURAIS DO TOCANTINS E AMAPÁ - BRASIL 150

EDUCAÇÃO AMBIENTAL EM EVENTO ESPORTIVO: RELATO DE EXPERIÊNCIA DO PROJETO CORRIDAS SUSTENTÁVEIS NA CORRIDA DA AME 153

PLANEJAMENTO DA ARBORIZAÇÃO VIÁRIA E EDUCAÇÃO AMBIENTAL: ANÁLISE CRÍTICA EM CAMPINA DA LAGOA/PR 156

ECOLAZER RESORT FLUTUANTE: EDUCAÇÃO AMBIENTAL, SUSTENTABILIDADE E EMPREENDEDORISMO NA AMAZÔNIA 159

EDUCAÇÃO PARA REDUÇÃO DE RISCOS DE DESASTRES (ERRD): UMA ANÁLISE DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA RECENTE (2021–2026) 162

8. Energias Renováveis

HARMONIZED LIFE CYCLE ASSESSMENT OF COMBUSTION AND GASIFICATION PATHWAYS FOR BIOELECTRICITY FROM SUGARCANE BAGASSE 167

ROTA INTEGRADA PARA PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO A PARTIR DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS VIA FERMENTAÇÃO LÁCTICA SEQUENCIADA 172

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL POR TRANSESTERIFICAÇÃO DIRETA EM DIFERENTES CONDIÇÕES AMBIENTAIS 176

MELHORIA DA EFICIÊNCIA DE COLETORES FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO SISTEMA DE RESFRIAMENTO 180

DESALINATION ALLIED TO RENEWABLE ENERGY - POTENTIAL COMBINATION IN BRAZILIAN NORTHEAST AREA 183

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS EM ATERROS SANITÁRIOS 186

SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA BASEADO EM REGRAS PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM ARMAZENAMENTO 190

9. ESG e Compliance Ambiental

A INTEGRAÇÃO DAS DIMENSÕES ESG NA INOVAÇÃO INDUSTRIAL 195

10. Geotecnologias e Monitoramento Ambiental

DESAFIOS AMBIENTAIS DA URBANIZAÇÃO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS URBANAS: ESTUDO DO CÓRREGO DA SERRA EM NOVA VENÉCIA (ES) 200

SENSIBILIDADE SOCIOECONÔMICA EM MAPAS DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL AO ÓLEO: PROPOSTA CONCEITUAL E SISTEMATIZAÇÃO DE VARIÁVEIS PARA ANÁLISE INTEGRADA 203

AVALIAÇÃO DOS SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS DE PROVISÃO E REGULAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITAJAÍ-MIRIM (SC) 207

MAPEAMENTO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ESCOAMENTO (MÉTODO SCS-CN) EM GUARAPUAVA - PR 211

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE EROSÃO E DEPOSIÇÃO DE AREIA NO RIO COM O USO DO NDWI 215

PERSPECTIVAS DO USO DE IMAGENS HIPERESPECTRAIS NA DETECÇÃO DE METAIS PESADOS NO MEIO AMBIENTE BRASILEIRO 219

MAPEAMENTO DA SENSIBILIDADE AMBIENTAL AO ÓLEO NOS ENTORNOS DE TRECHO DO OLEODUTO OSSP-12 P NA BAIXADA SANTISTA 223

ESTIMATIVA DE CURVAS IDF COM DADOS DE SATÉLITE: COMBINAÇÃO E CORREÇÃO DE PRODUTOS DE PRECIPITAÇÃO 227

RESILIÊNCIA AMBIENTAL: UM ESTUDO DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS QUEIMADAS 231

ANÁLISE DO USO E COBERTURA DO SOLO E SUA 235

RELAÇÃO COM A DINÂMICA DE VAZÃO HIDROLÓGICA EM GUARAPUAVA – PR..... 235

ESTUDO DE GRADIENTES DE TEMPERATURA ABAIXO E ACIMA DO DOSSEL NA FLORESTA AMAZÔNICA EM ÁREA FLORESTAL DE TERRA FIRME 239

GEOTECNOLOGIAS APLICADAS À SEGURANÇA DO TRABALHO: USO DE DRONES E SENSORIAMENTO REMOTO NA REDUÇÃO DE RISCOS EM ATIVIDADES DE AGRIMENSURA..... 243

ANÁLISE DE NDVI EM UM FRAGMENTO FITOGEOGRÁFICO: TERRA RICA - PR..... 246

11. Governança Climática e Participação Social

EXPLORAÇÃO DE LÍTIO NA AMÉRICA LATINA FRENTE À TRANSIÇÃO ENERGÉTICA SUSTENTÁVEL: UMA REVISÃO DE ESCOPO SOBRE IMPACTOS ECONÔMICOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS EM BRASIL, ARGENTINA E CHILE 252

O USO DE TECNOLOGIAS MÓVEIS COMO FERRAMENTA DE CONTROLE SOCIAL E ENGAJAMENTO COMUNITÁRIO NA GESTÃO AMBIENTAL URBANA: O CASO DO APLICATIVO LIMPAÍ 260

MODELAGEM PARTICIPATIVA: UMA METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA GESTÃO DE DESASTRES SOCIOAMBIENTAIS EM MUNICÍPIOS DO RIO GRANDE DO SUL..... 264

RIO JURUBATUBA COMO ARENA DE DISPUTA E A MOBILIZAÇÃO POPULAR PELO PARQUE LINEAR..... 268

AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE OPERACIONAL DAS MEDIÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E FLUVIOMÉTRICAS POR MEIO DE INDICADORES DE DESEMPENHO..... 272

12. Hidrossedimentologia

PERDAS DE SOLO EM ÁREA DE PLANTIO DIRETO EM ESCALA DE ENCOSTA..... 278

OCORRÊNCIA DE MICROPLÁSTICOS EM SEDIMENTOS DO LAGO PARANOÁ – BRASÍLIA, DF.... 282

DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA DESCARGA SÓLIDA DE FUNDO NO RIO CUIABÁ: DO PLANALTO À PLANÍCIE PANTANEIRA 286

14. Infraestrutura Verde e Cidades Inteligentes

MAPEAMENTO DE METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE RISCO PARA INCÊNDIOS EM CONTEXTO URBANO – PROTOCOLO DE REVISÃO DE ESCOPO..... 291

CIDADES SUSTENTÁVEIS E INTELIGENTES: DESAFIOS, CONCEITOS E POLÍTICAS PÚBLICAS..... 298

PERCEPÇÕES SOBRE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS CULTURAIS URBANOS EM CURITIBA, PR... 300

INFRAESTRUTURA VERDE E PRODUÇÃO DO ESPAÇO URBANO EM CIDADES MÉDIAS: USOS SOCIAIS E RECONFIGURAÇÃO TERRITORIAL EM PONTA GROSSA (PR) 304

APLICATIVO DE ALERTAS DE ENCHENTES PARA A AVENIDA RONDON PACHECO NO MUNICÍPIO DE UBERLÂNDIA (MG)..... 308

JUSTIÇA DE USO DA INFRAESTRUTURA VERDE: ACESSO, QUALIDADE, ENGAJAMENTO E BEM-ESTAR MENTAL EM CIDADES METROPOLITANAS 310

A CONSTRUÇÃO DE CIDADES INTELIGENTES E A ATUAÇÃO DOS PROFISSIONAIS DAS ENGENHARIAS E TECNOLOGIAS NA GESTÃO PÚBLICA 315

15. Inteligência Artificial e Sustentabilidade

A REVOLUÇÃO DIGITAL NO CAMPO: O IMPACTO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA EFICIÊNCIA E SUSTENTABILIDADE DO AGRONEGÓCIO CONTEMPORÂNEO 319

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MODELOS TRANSFORMER COM E SEM DECOMPOSIÇÃO POR VMD NA PREVISÃO DE IRRADIAÇÃO SOLAR 322

PREVISÃO DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS ASSOCIADAS À PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO AS REDES NEURAIS RECORRENTES LSTM E GRU 325

16. Justiça Climática e Direitos Humanos Ambientais

DA PERIFERIA AO GLOBAL: EDUCAÇÃO AMBIENTAL COMO ESTRATÉGIA DE JUSTIÇA SOCIOAMBIENTAL 329

17. Logística Reversa e Cadeias de Fornecimento Responsáveis

RESPONSABILIDADE ESTENDIDA DO PRODUTOR E LOGISTICA REVERSA NA INDÚSTRIA TÊXTIL: SUSTENTABILIDADE E GESTÃO DE RESÍDUOS 334

MODELO CONCEITUAL DE INTEGRAÇÃO ENTRE SERVITIZAÇÃO E TECNOLOGIAS DIGITAIS NA LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS NO BRASIL 337

LEI DE INCENTIVO À RECICLAGEM E DECRETO DE EMBALAGENS: AVANÇOS E DESAFIOS NA LOGÍSTICA REVERSA NO BRASIL E O CASO ISOPOR® AMIGO 341

18. Meio Ambiente Políticas Públicas, Legislação e Licenciamento Ambiental

A CENTRALIDADE DA ANÁLISE DE EIA/RIMA E PBAS NO LICENCIAMENTO AMBIENTAL: UMA ABORDAGEM DOCUMENTAL 346

AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS ACUMULADOS EM PARQUES EÓLICOS: LACUNAS, DESAFIOS E PERSPECTIVAS PARA O LICENCIAMENTO AMBIENTAL BRASILEIRO 349

MINERAÇÃO DE DADOS APLICADA À AUDITORIA DE PRAZOS E RETENÇÃO NO LICENCIAMENTO AMBIENTAL DE MINAS GERAIS: UMA ANÁLISE TEMPORAL (2025-2026) ... 352

ESTUDO DA FAUNA ACOMPANHANTE NAS PESCARIAS DE *ARAPAIMA GIGAS* NO RIO CAUTÁRIO (RONDÔNIA, BRASIL) 356

A HEGEMONIA DO DISCURSO DA SUSTENTABILIDADE: DO TRIPÉ AO “BANQUINHO DE UMA PERNA SÓ” 360

A TEORIA DO “BOLSO PROFUNDO” NA RESPONSABILIZAÇÃO AMBIENTAL: ANÁLISE DA IMPUTAÇÃO SOLIDÁRIA À CONCESSIONÁRIA DE SANEAMENTO POR DESPEJOS IRREGULARES DE ESGOTO EM REDE PLUVIAL 363

CADEIA MADEIREIRA AMAZÔNICA E GOVERNANÇA AMBIENTAL: IMPACTOS DA EUDR E O PAPEL DAS CERTIFICAÇÕES FLORESTAIS 366

SOIL ECOSYSTEM SERVICES VALUATION AND IMPLICATIONS FOR ENVIRONMENTAL POLICYMAKING: A GLOBAL SYSTEMATIC REVIEW 369

19. Mobilidade Urbana

ANÁLISE DE IMPORTÂNCIA E DESEMPENHO DE VARIÁVEIS RELACIONADAS À OPERAÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO EM DIFERENTES REGIÕES DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL 374

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PERCEPÇÃO DE ALUNOS UNIVERSITÁRIOS SOBRE OS MODOS DE DESLOCAMENTO ATRAVÉS DE UM MODELO DE EQUAÇÕES ESTRUTURAIS ... 378

20. Mudanças Climáticas e Eventos Extremos

SOILFUTURES-BR: BIAS-CORRECTED SOIL TEMPERATURE PROJECTIONS FOR BRAZIL 383

REVISÃO SOBRE A RESILIÊNCIA DAS INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE FRENTE A EVENTOS CLIMÁTICOS DISRUPTIVOS 387

ISOLAMENTO ENERGÉTICO NA AMAZÔNIA: ANÁLISE E MAPEAMENTO DA MATRIZ ELÉTRICA DO ESTADO DO AMAZONAS..... 391

EMATER-DF NO CLIMA: PROGRAMA DE ADAPTAÇÃO DOS PRODUTORES RURAIS DO DISTRITO FEDERAL ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS..... 394

ANÁLISE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DA PARAÍBA COM BASE EM TÉCNICAS DE AGRUPAMENTO 398

ESTRATÉGIAS DE ENFRENTAMENTO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA CONFORTO TÉRMICO NAS ÁREAS URBANAS DE DOURADOS - MS 401

21. Poluição Atmosférica

ANÁLISE DO APRISIONAMENTO E TRANSPORTE ADVECTIVO DO OZÔNIO TROPOSFÉRICO SOB INFLUÊNCIA DE SISTEMAS FRONTAIS NA REGIÃO DE ITABORAÍ-RJ..... 405

POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA DECORRENTE DE MATERIAL PARTICULADO EM OFICINA MECÂNICA VEICULAR..... 409

O USO DE LÍQUENS COMO BIOINDICADORES DA QUALIDADE DO AR EM ÁREAS SOB INFLUÊNCIA DE ATIVIDADES DE MINERAÇÃO EM CAÇAPAVA DO SUL, RS..... 413

INFLUÊNCIA DA UMIDADE RELATIVA DO AR NA DETERMINAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO..... 417

ABSORÇÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS POR POPULAÇÕES DE LÍQUENS EM ÁREA DE MINERAÇÃO. 421

AVALIAÇÃO TEMPORAL DE ODOR POR OLFATOMETRIA DE CAMPO: ESTUDO DE CASO COM MONITORAMENTO SISTEMÁTICO (2024-2026)..... 425

23. Racismo Ambiental e Justiça Socioambiental

OBSTÁCULOS DE IDENTIFICAÇÃO DE COMPORTAMENTOS PRÓ-AMBIENTAIS NA POPULAÇÃO VULNERÁVEL: O CASO DA REGIÃO METROPOLITANA DE CAMPINAS.... 430

DESIGUALDADE AMBIENTAL EM UMA CIDADE DE GRANDE PORTE DO SUL DO BRASIL..... 433

24. Recuperação de Áreas Degradadas

DESENVOLVIMENTO DE ALECRIM-DO-CAMPO EM TECNOSSOLO: USO DE BIOSSÓLIDO E REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO PARA A RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO..... 438

DESEMPENHO DE *BACCHARIS DRACUNCULIFOLIA EM* RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE FERRO: CRESCIMENTO, FISIOLOGIA E DESENVOLVIMENTO RADICULAR..... 442

ECOLOGICAL RESTORATION AND ENVIRONMENTAL MONITORING OF A DEGRADED URBAN RIPARIAN AREA: THE CABRINHA LAKE SPRING, LONDRINA, BRAZIL 446

TECNOLOGIAS SOCIAIS E O TRIPLE BOTTOM LINE NA MITIGAÇÃO DE CONFLITOS TERRITORIAIS EM ÁREAS DE COMPENSAÇÃO MINERÁRIA..... 447

EMPREGO DE ZEÓLITAS NA ADSORÇÃO DE METAIS E METALOIDES ORIUNDOS DE ATIVIDADES DE MINERAÇÃO: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 449

ANÁLISE E DESAFIOS DE IMPLEMENTAÇÃO DE PROJETO DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS (PRAD) NO SETOR DE SANEAMENTO: ESTUDO DE CASO (2020-2025) ... 453

25. Recursos Hídricos Aproveitamento e Estudos Avaliativos

CONSUMO HÍDRICO DA SOJA E JANELA DE SEMEADURA NA SAFRA 2025/2026 EM NOVA MUTUM/MT 458

POTENCIAL DE PRODUÇÃO SAZONAL DE ÁGUA NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITAJAÍ-MIRIM (BHRIM) ATRAVÉS DO MODELO INVEST 464

ATUALIZAÇÃO DA EQUAÇÃO INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA (IDF) PARA O MUNICÍPIO DE BAURU/SP COM DADOS DE ALTA RESOLUÇÃO TEMPORAL 468

26. Recursos Hídricos Planejamento, Gestão e Políticas Públicas

GESTÃO DAS ÁGUAS INTEGRADA À GESTÃO DO TERRITÓRIO RURAL: UMA ANÁLISE DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTA BÁRBARA/MG 472

AVALIAÇÃO DA IMPORTÂNCIA ECOSSISTÊMICA DOS SERVIÇOS DE SUPORTE NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITAJAÍ-MIRIM (SC) 476

ANÁLISE DA IMPLEMENTAÇÃO DAS METAS VI E VII DO PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE SANTA CATARINA 480

PROJETO: “COBRANÇA PELO USO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO ESTADO DE SANTA CATARINA, METODOLOGIAS E ASPECTOS OPERACIONAIS” 484

IMPLANTAÇÃO DE UNIDADE DEMONSTRATIVA DE IRRIGAÇÃO DA EMATER-DF 487

GOVERNANÇA REGULATÓRIA E CAPTAÇÃO SUBTERRÂNEA NO PLANEJAMENTO URBANO: INTEGRAÇÃO DOS AQUÍFEROS AO ORDENAMENTO TERRITORIAL MUNICIPAL À LUZ DA AGENDA 2030 491

TENDÊNCIAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA GESTÃO HÍDRICA: ESTUDO NA MICROBACIA DO RIO CAIÇÁ 495

MONITORAMENTO HÍDRICO COMO FERRAMENTA DE INSERÇÃO SOCIAL DE MENINAS NA PESQUISA 499

27. Recursos Hídricos Qualidade da Água

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA E DO SEDIMENTO NO RESERVATÓRIO DE BARRA BONITA (SÃO PAULO-SP): INDICADORES FÍSICO-QUÍMICOS E TRÓFICOS 504

ESTUDO COMPARATIVO DA EFICÁCIA DE INATIVAÇÃO MICROBIOLÓGICA: RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA, CLORAÇÃO E OZONIZAÇÃO EM ÁGUAS SUPERFICIAIS DO RIO RIOZINHO (IRATI - PR) 509

ANÁLISE PRELIMINAR DA INFLUÊNCIA DE PLACAS SOLARES COMO SUPERFÍCIE DE COLETA NA QUALIDADE DA ÁGUA DE CHUVA 512

AVALIAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DAS NASCENTES URBANAS DO MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE-MG 516

QUALIDADE BACTERIOLÓGICA E FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA DE BEBEDOUROS DO CAMPUS GLÓRIA - UFU 520

CONTAMINAÇÃO POR POLUENTES ORGÂNICOS EM PEIXES DO RIO POTI (CEARÁ): IMPLICAÇÕES PARA O RISCO À SAÚDE HUMANA 524

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS LIMNOLÓGICOS EM UM LAGO URBANO NO PARQUE MUNICIPAL CASCAVEL, GOIÂNIA - GO 528

ANÁLISE DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DA ÁGUA DO AÇUDE EPITÁCIO PESSOA LOCALIZADO NO MUNICÍPIO DE BOQUEIRÃO - PB. 531

IDENTIFICAÇÃO DOS PRODUTOS DE TRANSFORMAÇÃO E MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DE COLCHICINA E NITAZOXANIDA POR UVC/H_2O_2 536

ANÁLISE DO RISCO À SAÚDE HUMANA POR METAIS E NITRATO EM ÁGUA POTÁVEL: ESTUDO DE CASO EM CASCAVEL-PR 540

INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS AMBIENTAIS NO COMPORTAMENTO DE DICLOFENACO EM MICROPLÁSTICO DE POLIETILENO..... 545

FILMES DE BIOPOLÍMEROS: PRODUÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DE ADSORÇÃO DE GLIFOSATO..... 549

ABORDAGEM INTEGRADA PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA E CONFORMIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRAFICA DO RIO PIAUÍ EM SERGIPE 554

MICROPLÁSTICOS EM AMBIENTES AQUÁTICOS BRASILEIROS: DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA, LACUNAS METODOLÓGICAS E DESAFIOS DE PESQUISA 558

BACILLUS SUBTILIS PARA REMEDIAÇÃO DE MEIOS AQUÁTICOS E POTENCIAL DE COMBATE À EUTROFIZAÇÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA..... 562

CLASSIFICAÇÃO HIDROQUÍMICA E EVOLUÇÃO TEMPORAL DO IMPACTO POR DRENAGEM ÁCIDA DE MINA EM UMA SÉRIE HISTÓRICA DE MONITORAMENTO NO SUL DE SANTA CATARINA..... 566

O USO DA FERRAMENTA R-STUDIO PARA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS CHUVAS E DA QUALIDADE DA ÁGUA NO RESERVATÓRIO RIO GRANDE/SP..... 570

ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE UM KIT DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM UM CÓRREGO URBANO 575

ESTUDO DA ADSORÇÃO DO GLIFOSATO POR FILME COMPÓSITO DE NANOCELULOSE-QUITOSANA..... 578

PROCESSOS OXIDATIVOS PARA MODIFICAÇÃO DA ALUMINA: EFEITOS NA ADSORÇÃO DE ÍONS FLUORETO 583

INFLUÊNCIA HIDRODINÂMICA DO RIO CAMBORIÚ NAS ARRIBADAS EM BALNEÁRIO CAMBORIÚ, SC: MODELAGEM NUMÉRICA PRELIMINAR..... 587

QUALIDADE DA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO E IMPLICAÇÕES À SAÚDE PÚBLICA: ANÁLISE DO SISTEMA SUL DE CUIABÁ (MT) A PARTIR DE DADOS DO SISAGUA..... 590

CHLORELLA VULGARIS COMO AGENTE BIOLÓGICO NA REMEDIAÇÃO DE MEIOS AQUÁTICOS E NO CONTROLE DA EUTROFIZAÇÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA 594

ESTRATÉGIAS INTEGRADAS PARA CONTROLE DA TURBIDEZ EM CURSOS D'ÁGUA E REDUÇÃO DE RISCOS AMBIENTAIS NA MINERAÇÃO DE FERRO 598

OCORRÊNCIA DE AGROTÓXICOS EM AMBIENTES AQUÁTICOS URBANOS: BIOMONITORAMENTO DO ARROIO DILÚVIO (RS, BRASIL) 602

28. Resíduos Sólidos Reciclagem e Coleta

SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS DE RECICLAGEM PARA A CIRCULARIDADE DE EMBALAGENS PLÁSTICAS FLEXÍVEIS MULTICAMADAS: NA BUSCA DE UM *ROADMAP* TECNOLÓGICO 607

OCORRÊNCIA E DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM AMBIENTES CAVERNÍCOLAS NO NORDESTE DE GOIÁS, BRASIL CENTRAL 611

REAPROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 614

UMA ANÁLISE COMPARATIVA SOBRE A GESTÃO DE RESÍDUOS RECICLÁVEIS NO BRASIL E EM PAÍSES DESENVOLVIDOS..... 617

PRODUÇÃO DE FIBRAS POLIMÉRICAS A PARTIR DE COPOS DESCARTÁVEIS DE POLIESTIRENO COM ADIÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO 620

COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS EM EVENTO DE CORRIDA DE RUA 623

ELETRORRECUPERAÇÃO DE COBRE A PARTIR DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI) 627

REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL COMO FORRO DE ACESSO EM OBRAS DE INFRAESTRUTURA 630

29. Resíduos Sólidos Tratamento e Disposição Final

ANÁLISE DA CONTAMINAÇÃO E AVALIAÇÃO DO GRAU DE IMPACTO ANTRÓPICO NOS SEDIMENTOS DO RIO SARAPUÍ, RIO DE JANEIRO, BRASIL 634

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DE SOLO RESIDUAL VISANDO USO COMO BARREIRA DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS 638

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REINCORPORAÇÃO DE RCC CLASSE A POR MEIO DA MODELAGEM BIM 641

EVOLUÇÃO DA GERAÇÃO E GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO NORDESTE BRASILEIRO (2020-2024) 645

EFEITO DA ENSILAGEM DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA DIGESTÃO ANAERÓBIA EM ESTÁGIO SÓLIDO 649

30. Saneamento Rural

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE SISTEMAS DE ALAGADO CONSTRUÍDO CULTIVADOS COM *TYPHA ANGUSTIFOLIA* (ROTA 1) E *CRYSOPOGON ZIZANIOIDES* (ROTA 2) NO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS DE BOVINOCULTURA DE LEITE 654

31. Saneamento Abastecimento, tratamento e distribuição

FILTRO LENTO DE AREIA EM DUPLA CAMADA: UMA PROPOSTA DE CONTRIBUIÇÃO PARA A UNIVERSALIZAÇÃO DO SANEAMENTO 659

FLOATING TREATMENT WETLANDS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA 662

PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL APLICADO NA AVALIAÇÃO DO EFEITO DO PH E DOSAGEM DE ADSORVENTE NO PROCESSO DE ADSORÇÃO DOS ÍONS FLUORETO 666

USO DE FERRAMENTAS DE GEOPROCESSAMENTO NO ZONEAMENTO DE FLUORETO EM REGIÃO SUL DO BRASIL 670

FOTOCATÁLISE E FOTÓLISE APLICADAS À REMOÇÃO DO DIURON E PARACETAMOL 674

ZEÓLITAS MODIFICADAS COM POLIPIRROL AUMENTAM EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE BÁRIO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO PÚBLICO 678

32. Saneamento Efluentes Sanitários e Industriais

REMOÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO ATRAVÉS DE PROCESSO ANAMOX: APLICAÇÃO EM EFLUENTE ANAERÓBIO DOMÉSTICO 683

A RESISTÊNCIA DE UMA MICROALGA VERDE NA PRESENÇA DO HORMÔNIO 17B-ESTRADIOL (E2) 688

AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO POTENCIAL DE *EUGLENA GRACILIS* NA BIORREMEDIAÇÃO DE SULFAMETOXAZOL 692

APLICAÇÃO DE OZÔNIO NO TRATAMENTO DE CORANTE EM EFLUENTES DA INDÚSTRIA TÊXTIL 696

DESEMPENHO DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE REATORES NA REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA E NITROGÊNIO AMONIACAL EM EFLUENTE DE ATERRO SANITÁRIO 699

IMPACTO DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE CULTIVO MICROALGAL EM AMBIENTE NÃO CONTROLADO 703

DESEMPENHO DO CRESCIMENTO MICROALGAL EM EFLUENTE DE ATERRO SANITÁRIO EM DIFERENTES REATORES 707

ÍNDICE MULTICRITÉRIO DE RISCO HIDROLÓGICO PARA ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS: INTEGRAÇÃO ENTRE MORFOMETRIA DE BACIAS, EVENTOS EXTREMOS E SENSIBILIDADE AMBIENTAL COM SUPORTE À MODELAGEM HEC-HMS 711

PARTIDA DE UM REATOR FBBR UTILIZANDO SABUGO DE MILHO PARA PÓS-TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO 714

AVALIAÇÃO DO TEMPO DE DETENÇÃO HIDRÁULICA DE *WETLANDS* CONSTRUÍDOS EM ESCALA REDUZIDA 718

APLICAÇÃO DE PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE LAVANDERIAS DE JEANS: POTENCIAL PARA REÚSO E CONFORMIDADE COM NORMAS INTERNACIONAIS 722

AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MEIOS FILTRANTES NO TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE BOVINOCULTURA ORGÂNICA LEITEIRA 726

TESTES DE PERFIS HIDRÁULICOS AVALIANDO O COMPORTAMENTO DE UM WETLAND CONSTRUÍDO PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA CINZA 730

WETLANDS CONSTRUÍDOS NA REMOÇÃO DE CONTAMINANTES EMERGENTES EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS: POTENCIAL, MECANISMOS E DESAFIOS 734

EFICIÊNCIA DE FUNGOS DA PODRIDÃO BRANCA DO GÊNERO *TRAMETES* NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE MADEIREIRA 737

OTIMIZAÇÃO DA DESCOLORAÇÃO DO VERDE DE MALAQUITA POR *BACILLUS CEREUS* IMOBILIZADO EM NANOFIBRAS DE POLI(ADIPATO DE BUTILENO-CO-TEREFTALATO) (PBAT) .. 741

OTIMIZAÇÃO DA INICIALIZAÇÃO DO PROCESSO DE DESAMONIFICAÇÃO UTILIZANDO LODO NITRIFICANTE E RETENÇÃO DE BIOMASSA COM MEIO SUPORTE 745

TECNOLOGIAS À BASE DE CARVÃO ATIVADO E BIOCHAR PARA REMOÇÃO DE FÓSFORO DE ESGOTO DOMÉSTICO: UMA AVALIAÇÃO DOS DESAFIOS DE AMPLIAÇÃO DE ESCALA 749

33. Saneamento Planejamento, Políticas Públicas e Legislação

ABORDAGEM GEOESPACIAL E TEMPORAL DA ADOÇÃO DO PROGRAMA ABC/ABC+ NO ESTADO DE SÃO PAULO (2013-2025) 755

CLASSIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE RESÍDUOS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETAS) EM ITAJAÍ (SC): SUBSÍDIOS PARA O PLANO DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS 759

MEDIAÇÃO E ARBITRAGEM NA GOVERNANÇA DE RECURSOS HÍDRICOS NA ROTA BIOCEÂNICA COMO INSTRUMENTOS JURÍDICO-INSTITUCIONAIS DE EFETIVAÇÃO DOS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL 6, 10 E 16 DA AGENDA 2030 762

34. Saúde Pública Controle de Vetores e Salubridade Ambiental

SANEAMENTO BÁSICO E DENGUE EM MANAUS (AM): ANÁLISE DA VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL EM ÁREAS URBANAS 765

EQUIPAMENTO DE CONTROLE DE PRAGAS URBANAS COM USO DE FREQUÊNCIA SONORA 769

ADSORÇÃO DE GLIFOSATO EM ÁGUA UTILIZANDO RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO E AVALIAÇÃO DA TOXICIDADE RESIDUAL POR *ALLIUM CEPA*: ESTUDO PRELIMINAR.... 773

36. Sustentabilidade do Agronegócio

GESTÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NA BOVINOCULTURA: COMPARAÇÃO ENTRE PADRÕES LEGAIS E IMPLICAÇÕES PARA SUSTENTABILIDADE PRODUTIVA 778

ESTOQUES DE CARBONO EM SISTEMAS DE USO DO SOLO COM MACAÚBA (*ACROCOMIA ACULEATA*) NA CAATINGA 782

DESEMPENHO AGRONÔMICO DA CEBOLINHA E SALSINHA EM VASOS SOB FERTIRRIGAÇÃO COM ÁGUA RESIDUÁRIA DE BOVINOCULTURA LEITEIRA 786

BIOFERTILIZANTES DE VINHOTO: INFLUÊNCIA DA FORMA DE APLICAÇÃO NA UMIDADE DO SOLO E DESEMPENHO AGRONÔMICO FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS 790

37. Tecnologias Verdes e Inovação Sustentável

BIOPROSPECÇÃO DE LEVEDURAS AUTÓCTONES ISOLADAS DE MEL DE PRODUTOR LOCAL EM ACAIACA-MG: POTENCIAL PARA PRODUÇÃO DE HIDROMEL ARTESANAL NA BIOECONOMIA REGIONAL 794

APROVEITAMENTO DE SUBPRODUTOS DE TUBÉRCULOS PARA PRODUÇÃO DE CHIPS VEGETAIS COMO ALTERNATIVA AO DESPERDÍCIO ALIMENTAR 798

ESTUDO DO USO DOS RESÍDUOS DE ESCÓRIA E REFRATÁRIO DE FUNDIÇÃO EM REFORÇO DE SUBLEITO 801

TRATAMENTO DE EFLUENTE DO TINGIMENTO COM CORANTE NATURAL DE URUCUM POR ELETROCOAGULAÇÃO 804

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DE PRODUÇÃO DE HIDROGÉIS DE ALGINATO DE SÓDIO CONTENDO LAMA VERMELHA 809

DESIGN AND APPLICATION OF A UVC-LED PHOTOREACTOR FOR THE DEGRADATION OF ORGANIC COMPOUNDS BY ADVANCED OXIDATION PROCESSES (AOP) 813

INCORPORAÇÃO DE ÁCIDO FOSFÓRICO PARA A PREPARAÇÃO DE FILMES DE COBERTURA BIODEGRADÁVEIS 817

APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE VINÍCOLAS PARA PRODUÇÃO DE NANOBIOCARVÃO APLICADO APLICAÇÃO NA REMOÇÃO DE PB(II) EM SOLUÇÃO AQUOSA 821

REVISÃO DA LITERATURA SOBRE O USO DE SOLVENTES VERDES EM MÉTODOS DE EXTRAÇÃO PARA ISOLAMENTO DE PESTICIDAS ORGANOFOSFORADOS EM ÁGUA.... 825

INTERFERÊNCIA DO BIOFILME NA CARACTERIZAÇÃO DE MICROPLÁSTICOS EM WETLANDS CONSTRUÍDAS: UMA REVISÃO DE DESAFIOS E MÉTODOS..... 830

USO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X PARA DETERMINAÇÃO DE MICRONUTRIENTES 834

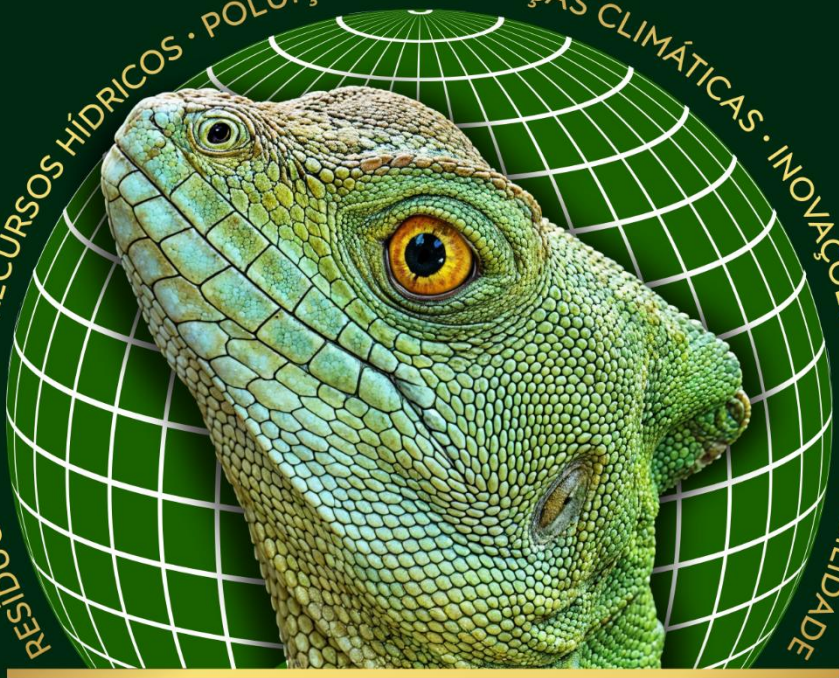
APLICAÇÃO DE SOLVENTES VERDES NA PRODUÇÃO DE MEMBRANAS DE PLA APLICADAS EM DESTILAÇÃO POR MEMBRANAS A VÁCUO 837

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE GARRAFAS PET 600 ML PREENCHIDAS COM AREIA PARA O USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL..... 840

ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE DO USO DO TIJOLO ECOLÓGICO NA CONSTRUÇÃO CIVIL SOB OS ASPECTOS AMBIENTAIS, ECONÔMICOS E SOCIAIS NO CONTEXTO DO RIO GRANDE DO NORTE 843

MEMBRANAS RECICLADAS ASSOCIADAS À CARVÃO ATIVADO OBTIDO DO RESÍDUO DE BAGAÇO DE MALTE: UMA ALTERNATIVA MAIS SUSTENTÁVEL AO TRATAMENTO DE EFLUENTES 846

RESUMOS EXPANDIDOS



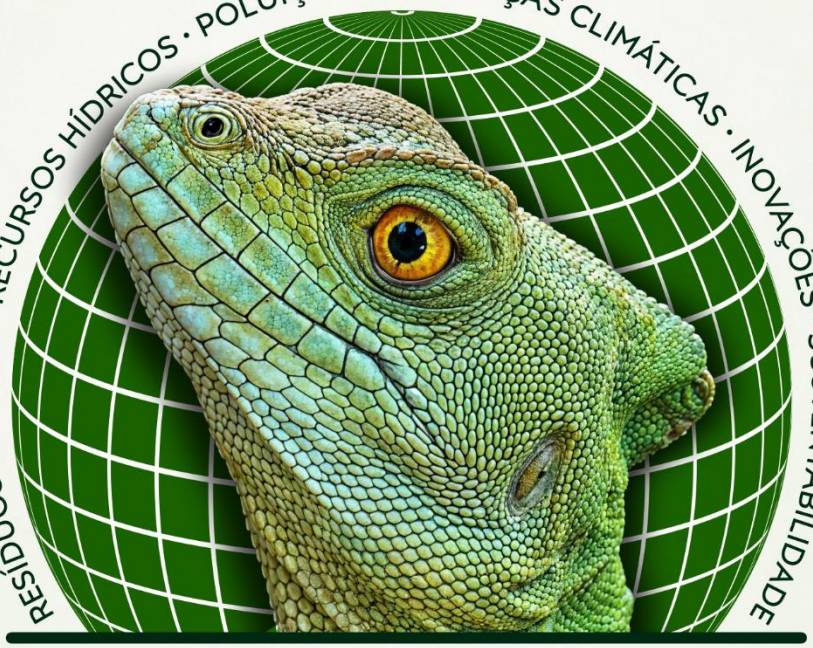
5º CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AMBIENTAL

– EDIÇÃO LUSO-BRASILEIRA –

2026

ÁREA TEMÁTICA 1

AGRICULTURA REGENERATIVA



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

RECUPERAÇÃO DE ÁREA DEGRADADA COM A IMPLANTAÇÃO DE PRODUÇÃO DE MARACUJAZEIRO (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*)

1 Ana Luisa Ribeiro, 2 Karina Becker, 3 Mariana Schroder Batista, 4 Maria Luisa Manosso von Mecheln, 5 Tierry Souza Waski, 6 Vitor Eduardo Brunetta de Souza 7 Emi Rainildes Lorenzetti

1 Instituto Federal do Paraná, e-mail: ribeiro.aninha05@gmail.com; 2 Instituto Federal do Paraná, e-mail: kbecker21.kb@gmail.com; 3 Instituto Federal do Paraná, e-mail: agroecologiamarianasb@gmail.com; 4 Instituto Federal do Paraná, e-mail: luisamanosso@gmail.com; 5 Instituto Federal do Paraná, e-mail:tierrywaski@gmail.com; 6 Instituto Federal do Paraná, e-mail:vitoreduaardo@gmail.com; 7 Instituto Federal do Paraná, e-mail: emi.lorenzeti@ifpr.edu.br.

Palavras-chave: Agroecologia Indígena; Sistemas agroflorestais; Kaingang.

Introdução

O Território Indígena (TI) Kógũnh Ja Mã é uma comunidade indígena composta por representantes do povo Kaingang, localizado no município de Campo Largo - PR. Atualmente é habitado por 37 famílias (150 pessoas) vindas do Rio Grande do Sul, de outras regiões do Paraná e Santa Catarina. O TI está localizado na Área de Preservação Ambiental (APA) do Rio Verde, na região metropolitana de Curitiba - PR.

Parte da área do território continha um antigo plantio de árvores do gênero *Pinus*, correspondente a aproximadamente 5 ha. Mesmo sendo uma área de preservação ambiental, os pinus já estavam plantados antes da chegada das primeiras famílias ao território. Como parte do processo de manejo, a comunidade em conjunto com a FUNAI e os órgãos responsáveis pela área, conduziram a retirada dessa espécie exótica, possibilitando a construção de moradias para as famílias do território. Parte dessa área precisava ser recuperada. Para esse processo de recuperação foi elaborado um planejamento de recomposição florestal por meio de um sistema agroflorestal (SAF). Diante dessa temática de recuperação de área degradada priorizou-se a segurança alimentar e a cooperação entre os membros da comunidade para fortalecer o pertencimento à terra.

Neste aspecto, corroborando a perspectiva de reconstrução de uma área degradada, o uso de ferramentas agroecológicas mostra-se como uma boa alternativa. A agroecologia é uma ciência interdisciplinar que estuda os ecossistemas agrícolas, integrando princípios ecológicos, sociais e econômicos para promover sistemas produtivos sustentáveis (Santos; Curado. 2012). Ela está pautada em pilares fundamentais como a pesquisa, o ensino e os saberes em busca de fomentar a transição agroecológica. A pesquisa valoriza o diálogo entre conhecimentos científicos e tradicionais, priorizando a preservação da biodiversidade e a redução de insumos externos. Pode sistematizar práticas empíricas em metodologias científicas, promovendo agroecossistemas culturalmente sensíveis e economicamente viáveis.

Os saberes tradicionais, indígenas e populares são centrais nos estudos agroecológicos, dialogando ainda com o conhecimento acadêmico técnico. Esses diálogos de saberes promovem a inovação metodológica, unindo ciência e experiência comunitária em prol da equidade e da diversidade social (Antunes, 2025). Dessa forma, todo trabalho executado promoveu o respeito pelos saberes tradicionais dos indígenas Kaingang. O conhecimento técnico de manejo para a recuperação da área foi discutido e compartilhado com a comunidade para atender as necessidades apresentadas.

Dentre as práticas agroecológicas que foram estabelecidas no território estão os plantios em formato de roçado. Segundo Rocha Sobrinho e Tancredi (2020) os roçados indígenas são uma prática de plantio geralmente diversos, com várias espécies de produção agrícola das quais são retirados diferentes tipos de alimento. Consiste em plantas nativas e em plantas de produção que podem ser cultivadas em conjunto. Conjunto esse que por definição é denominado Sistemas Agroflorestais (SAFs).

Para a área foi estabelecido um roçado voltado para um sistema agroflorestal devido ao crescimento das árvores nativas que estão se estabelecendo na área, dentre as culturas foi introduzido o plantio de diversas espécies como amora, mandioca, cana-de-açúcar, abóbora, melancia e maracujá.

Todas essas espécies citadas buscam fortalecer e diversificar a alimentação dos moradores e realizar a recuperação da área degradada pelo constante plantio de pinus. Dentre as espécies, o maracujazeiro merece destaque. O maracujá *(Passiflora edulis flavicarpa)* é uma espécie nativa de importância comercial que vem sendo cultivado no município de Campo Largo experimentalmente mas já com áreas comerciais, incentivado pelo IDR Paraná.

Assim, o trabalho objetivou realizar o acompanhamento da lavoura do maracujazeiro desde seu planejamento até a implementação como uma forma de manejo de uma área degradada em formato de SAF.

Material e métodos

O Território Indígena Kogun Jah Mã está localizado às margens da Rodovia do Café (BR-277/BR-376), no bairro Rondinha, no município de Campo Largo - PR (lat. 25°26'26.7"S, long. 49°28'04.8"O). Apesar das pequenas áreas de espécies nativas existentes, havia o plantio de espécies vegetais exóticas sendo elas pinus e eucalipto até o ano de 2025. O clima da área é caracterizado segundo a classificação de Koppen-Geiger, como Cfb - clima temperado, com verão ameno, chuvas uniformemente distribuídas, sem estação seca (Ventura, 1964). As características edáficas são de latossolos nas áreas mais altas do relevo e cambissolos nas áreas mais baixas.

Para a área selecionada, por se tratar de uma área degradada, foi feita a calagem com utilização de calcário calcítico. Como forma de adubação foi utilizado esterco peletizado de aves, com manutenções periódicas das adubações com biofertilizante líquido.

O local onde foi implementado o SAF é uma área de declividade em torno de 15%, com a presença de árvores nativas em estágio inicial e algumas já adultas em parte do local. O sistema de condução adotado para uma o maracujazeiro foi a espaldeira vertical (Faep, 2022). As mudas de maracujazeiro foram distribuídas em linha, com mourões a cada 1,5m, feitos com materiais que estavam disponíveis no território. Esse sistema de condução proporcionou duas condições de insolação. Metade das plantas ficaram em incidência solar plena e outra sombreada.

As mudas de maracujazeiro variedade IPR Luz da manhã foram obtidas por doação pelo IDR-PR Campo Largo. Foram plantadas no mês de novembro de 2025 como mudas altas de 1,50 a 1,80 metros, comumente conhecidas como "mudão", sistema desenvolvido para dificultar a disseminação de pragas e doenças, para que a planta tenha maior resistência (Costa *et al,* 2008). As mudas foram conduzidas até o limite do arame, posteriormente podadas e conduzidas para ter o crescimento lateral (Campos, Santos. 2011).

Durante o período de acompanhamento foram realizadas avaliações fitossanitárias semanais, sendo visualizadas possíveis pragas e doenças e então controladas conforme a necessidade. Avaliações fitotécnicas foram feitas desde o princípio, para ser possível avaliar as condições de produtividade para a região em relação ao restante do SAF.

Resultados e discussão

A elaboração de um SAF mostrou-se viável para a recuperação da área. Observa-se que o maracujazeiro mantém bom crescimento durante o período inicial de implementação. Entretanto, com o avanço do sombreamento, há redução na produção de flores e aumento na incidência de lagartas, evidenciando os problemas fitossanitários e de manejo associados à dinâmica do consórcio agroflorestal.

As plantas de maracujazeiro iniciaram o processo de floração no mês de fevereiro de 2026, apenas nas plantas que estavam em condição de sol pleno, enquanto as que estavam em meia sombra ainda não haviam iniciado esse processo. Houve presença de formigas cortadeiras em parte das plantas, porém foram controladas. Foram encontradas lagartas de maracujazeiro (*Dione juno juno)* considerada principal praga do maracujazeiro, inicialmente as mesmas foram controladas através de catação manual. Foi observada maior incidência desta lagarta nas plantas que estavam sombreadas.

A lagarta *Dione juno juno* é uma potencial desfolhadora da cultura do maracujazeiro. A forma adulta desse inseto é uma borboleta de asas alaranjadas, com as margens externas pretas. É um inseto-praga chave para a cultura, pois incide todos os anos, causando danos severos às plantas. Os prejuízos são decorrentes da desfolha das plantas, o que reduz a área fotossintética, comprometendo sua produtividade e o teor de suco nos frutos (Embrapa, 2018).

Apesar de ser uma área de preservação contendo fragmentos de Mata Atlântica, não foram observadas mamangavas (abelhas polinizadoras dos gêneros *Xylocopa* ou *Bombus*), abelhas nativas solitárias. Após mais de dois meses foram verificadas a presença de flores polinizadas, demonstrando deficiência no processo de polinização. Para favorecer a permanência e possibilitar a atração das mamangavas para a área de cultivo, foram elaboradas estruturas para a nidificação, os chamados "hotéis para abelhas solitárias" (Santos; Bezerra, 2023). Esses abrigos foram posicionados entre as árvores, em locais elevados, de modo a restringir o acesso de crianças e animais. A utilização do "hotel" constitui um método eficaz para assegurar a polinização nas novas florações do maracujazeiro. Futuros trabalhos deverão ser realizados com o estudo das composições dos remanescentes de Mata Atlântica presentes na área do território.

Segundo o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) o plantio foi realizado em um período posterior ao ideal para a região (Brasil, 2021). Por isso, observou-se atraso no desenvolvimento das plantas e consequentemente na frutificação das plantas. Apesar disso, o desenvolvimento das plantas foi satisfatório, todas as plantas tiveram boa vegetação e um bom processo de floração.

Durante o tempo de acompanhamento ficou demonstrado positivamente a possibilidade da utilização do maracujazeiro nesta área, existe a possibilidade de que condições climáticas de frio extremo com geadas possam interferir nos processos posteriores.

Considerações finais

A utilização do maracujazeiro como uma estratégia de recuperação para área de pinus foi positiva, pois as plantas puderam se desenvolver e produzir. Existe a possibilidade que possam ser usadas no estabelecimento de um sistema agroflorestal nas etapas iniciais, posteriormente o sombreamento não será favorável ao cultivo. A estratégia do sistema agroflorestal se mostra como uma importante alternativa para a realização da produção agrícola pelos indígenas kaingang na área do território.

Agradecimentos

Agradecemos a Secretaria da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior – SETI, financiadora do projeto que originou o presente trabalho através do Programa de Extensão "Universidade Sem Fronteiras". A equipe de integrantes do projeto. Agradecemos também aos indígenas do povo Kaingang moradores do Território Indígena Kógũnh Ja Mã - Campo Largo - PR na pessoa do cacique Jafé e sua esposa Janaína.

Referências Bibliográficas

ANTUNES, Jonas. **A Agroecologia como caminho para a Alfabetização Científica na Educação do Campo: saberes, práticas e diálogos entre ciência e território**. 2025. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Educação no Campo) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Trindade, Departamento CED, 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Política Agrícola. **Portaria 318**, de 20 de julho de 2021. Aprova o Zoneamento Agrícola de Risco Climático para o cultivo do maracujá em sistema de cultivo de sequeiro no Estado do Paraná. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2021.

CAMPOS, Gustavo Azevedo; SANTOS, Deivison. **Maracujá**. Palmas: Fundação Universidade do Tocantins – UNITINS, 2011. (Coleção Como Fazer, v. 1) 16 p..

COSTA, Adelaide de Fátima Santana da; COSTA, Aureliano Nogueira da; VENTURA, José Aires; FANTON, César José; LIMA, Inorbert de Melo; CAETANO, Luiz Carlos Santos; SANTANA, Enilton Nascimento de. **Recomendações técnicas para o cultivo do maracujazeiro**. Vitória, ES: Incaper, 2008. 56 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Clima**. Disponível em: https://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm. Acesso em: 07. mar 2026.

FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA DO ESTADO DO PARANÁ (FAEP). **Fruticultura:** cultivo do maracujazeiro azedo. Curitiba: FAEP, 2023. 100 p.

MACHADO, C. de F.; FALEIRO, F. G.; SANTOS FILHO, H. P.; FANCELLI, M. **Guia de identificação e controle de pragas na cultura do maracujazeiro.** Brasília, DF: Embrapa, 2018. 40 p.

SANTOS, Amaury da Silva dos; CURADO, Fernando Fleury. **Perspectivas para a pesquisa agroecológica:** diálogo de saberes. Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2012. 13 p.

SANTOS, Juliana Dantas dos; BEZERRA, Katia Santos. A importância da abelha mamangava (*Xylocopa*) para a polinização da flor do maracujá-amarelo (*Passiflora edulis*). **Diversitas Journal**, v. 8, n. 3, p. 2949–2961, 2023.

ROCHA SOBRINHO, José Humberto Fernandes da ; TANCREDI, Nicola Saverio Holanda. Caracterização do roçado a partir da percepção dos moradores tradicionais da Floresta Nacional do Tapajós. **Congresso Internacional das Ciências Agrárias** 2020, V Congresso Internacional das Ciências Agrárias, Virtual. Acesso em 08 abril. 2026.

A JORNADA DO CRÉDITO DE CARBONO DE AGRICULTURA REGENERATIVA ATÉ ATIVO FINANCEIRO SOB A ÓTICA DAS FINANÇAS SUSTENTÁVEIS

Mariane Pires Batista
Universidade Positivo, e-mail:marianebatista@gmail.com

Palavras-chave: Crédito de Carbono; Agricultura Regenerativa; Finanças Sustentáveis

Introdução

As mudanças climáticas ocupam posição central nos debates globais sobre riscos futuros, exigindo esforços coordenados para a transição rumo a uma economia de baixo carbono. De acordo com o Fórum Econômico Mundial, cinco dos dez principais riscos globais da próxima década estão diretamente relacionados ao meio ambiente, evidenciando a necessidade de mecanismos financeiros capazes de impulsionar práticas sustentáveis (WWF, 2024). Nesse contexto, as finanças sustentáveis desempenham papel estratégico ao direcionar recursos para atividades que promovam sustentabilidade e mitigação das emissões de carbono (CHALA; DEMIDOV, 2024).

No Brasil, o agronegócio ocupa posição de destaque na economia nacional e, simultaneamente, está associado a atividades intensivas em emissões de gases de efeito estufa (SILVA; MAIA, 2022). Diante disso, a regulação das finanças sustentáveis torna-se essencial para alinhar o sistema financeiro aos compromissos climáticos assumidos pelo país, especialmente aqueles estabelecidos no Acordo de Paris (MOK, 2023). Nesse cenário, a agricultura regenerativa apresenta-se como uma estratégia promissora, uma vez que práticas como plantio direto, rotação de culturas, integração lavoura-pecuária-floresta e uso de culturas de cobertura contribuem para o sequestro de carbono no solo e redução das emissões de gases de efeito estufa (CHERUBIN et al., 2024).

Além dos benefícios ambientais, essas práticas possibilitam a geração de créditos de carbono, que podem ser comercializados tanto em mercados voluntários quanto regulados, constituindo-se como instrumentos econômicos voltados à mitigação climática (ADHISANKARAN et al., 2024). Cada crédito representa uma tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO_2e) reduzida ou removida da atmosfera, podendo ser utilizada para compensação de emissões ou negociação em mercados específicos (MACIEL et al., 2009).

Entretanto, apesar do crescimento das pesquisas sobre agricultura regenerativa e mercados de carbono, ainda existem lacunas relacionadas à compreensão da trajetória desses créditos desde sua geração em projetos agrícolas até sua estruturação como ativos financeiros negociáveis. Além disso, a integridade ambiental desses créditos constitui um desafio relevante, sobretudo diante do risco de práticas de greenwashing. Nesse sentido, processos rigorosos de certificação, monitoramento e verificação tornam-se indispensáveis para assegurar que os créditos representem reduções reais, mensuráveis e adicionais de emissões (PRAIRIE; KING; COTRUFO, 2023).

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo analisar, sob a ótica das finanças sustentáveis, a trajetória do crédito de carbono oriundo de projetos de agricultura regenerativa até sua estruturação como ativo financeiro negociável. Busca-se compreender os processos de certificação e verificação desses créditos, bem como identificar desafios e oportunidades relacionados à sua integração ao mercado financeiro brasileiro, especialmente no contexto regulatório do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE).

Material e Métodos

A pesquisa caracteriza-se como exploratória-descritiva, de natureza qualitativa e abordagem dedutiva, buscando compreender a trajetória dos créditos de carbono provenientes da agricultura regenerativa até sua estruturação como ativos financeiros negociáveis (CRESWELL, 2003). A abordagem qualitativa permite investigar fenômenos complexos relacionados às finanças sustentáveis, aos mecanismos de certificação de créditos de carbono e às dinâmicas regulatórias que envolvem sua negociação no mercado financeiro.

O estudo fundamentou-se em revisão bibliográfica e análise documental. Para a revisão bibliográfica, foram selecionados artigos científicos, livros, documentos institucionais e normativas regulatórias publicados em bases como Google Scholar, Scopus, Scielo e Periódicos CAPES. Os principais descritores utilizados incluíram “finanças sustentáveis”, “crédito de carbono”, “agricultura regenerativa”, “sustainable finance” e “carbon credit”.

A análise documental contemplou legislações, resoluções e diretrizes relacionadas às finanças sustentáveis e ao mercado de carbono, incluindo normativas do Banco Central do Brasil (BACEN), Comissão de Valores Mobiliários (CVM), B3 e documentos internacionais vinculados ao Acordo de Paris e à UNFCCC. Também foram analisados documentos de certificadoras internacionais, como Verra e Gold Standard, especialmente relacionados à metodologia ALM (Agricultural Land Management), aplicada a projetos de agricultura regenerativa.

Os dados coletados foram submetidos à análise de conteúdo, conforme Bardin (2011), permitindo a categorização das informações em eixos temáticos relacionados à trajetória do crédito de carbono, mecanismos de integridade ambiental,

regulamentação financeira e oportunidades associadas à agricultura regenerativa. A análise buscou identificar convergências entre a literatura científica e os instrumentos regulatórios que estruturam o mercado de carbono.

Resultados e Discussão

Os resultados evidenciam que as finanças sustentáveis têm assumido papel central na promoção da transição para uma economia de baixo carbono, especialmente após os avanços impulsionados pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e pelo Acordo de Paris. No Brasil, observa-se um fortalecimento do ambiente regulatório voltado à incorporação de critérios ambientais, sociais e de governança (ESG) nas decisões financeiras.

Nesse contexto, destacam-se iniciativas do Banco Central do Brasil, como as Resoluções CMN nº 4.943, 4.944 e 4.945/2021, que estabeleceram diretrizes para gestão integrada de riscos socioambientais e climáticos pelas instituições financeiras (BACEN, 2021). De forma complementar, a Comissão de Valores Mobiliários ampliou as exigências de transparência relacionadas às informações ESG e reconheceu os créditos de carbono como ativos elegíveis para composição de fundos de investimento por meio da Resolução CVM nº 175/2022 (CVM, 2022). Esse reconhecimento representa um marco importante para consolidação do crédito de carbono como instrumento financeiro.

Em relação à agricultura regenerativa, os estudos analisados demonstram elevado potencial de sequestro de carbono associado a práticas como plantio direto, rotação de culturas e integração lavoura-pecuária-floresta (CHERUBIN et al., 2019). Além dos benefícios climáticos, tais práticas contribuem para melhoria da fertilidade do solo, conservação da biodiversidade e aumento da resiliência dos sistemas agrícolas frente às mudanças climáticas (GILLER et al., 2021).

A metodologia VM0042 - ALM (Agricultural Land Management), amplamente utilizada em projetos certificados pela Verra, destaca-se como um dos principais instrumentos para quantificação das reduções de emissões e aumento do carbono orgânico no solo. Essa metodologia contempla práticas voltadas à redução do revolvimento do solo, manejo sustentável de fertilizantes e adoção de culturas de cobertura, permitindo a geração de créditos de carbono vinculados à agricultura regenerativa.

Entretanto, os resultados também apontam desafios relevantes relacionados à integridade ambiental desses créditos. A ausência de padronização global, dificuldades na mensuração do carbono sequestrado no solo e riscos associados ao greenwashing comprometem a credibilidade do mercado de carbono. Nesse sentido, mecanismos rigorosos de monitoramento, verificação independente e certificação tornam-se essenciais para assegurar transparência e confiabilidade nas transações de créditos de carbono (PRAIRIE; KING; COTRUFO, 2023).

Outro aspecto relevante refere-se à regulamentação do mercado brasileiro de carbono. A criação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), instituído pela Lei nº 15.042/2024, representa avanço significativo na estruturação de um mercado regulado de carbono no país. O sistema adota o modelo cap-and-trade, estabelecendo limites de emissões e mecanismos de negociação de permissões de emissão entre agentes regulados. Apesar disso, ainda persistem desafios relacionados à integração entre mercados voluntários e regulados, bem como à definição de critérios técnicos capazes de garantir a qualidade e adicionalidade dos créditos negociados.

Nesse cenário, a agricultura regenerativa surge como oportunidade estratégica para o Brasil, considerando o potencial do país para geração de créditos de carbono associados ao manejo sustentável do solo. Além de contribuir para mitigação climática, a comercialização desses créditos pode representar fonte adicional de renda para produtores rurais e mecanismo de incentivo à adoção de práticas agrícolas sustentáveis.

Considerações Finais

A pesquisa evidenciou que a trajetória do crédito de carbono oriundo da agricultura regenerativa até sua consolidação como ativo financeiro envolve múltiplas etapas relacionadas à certificação, monitoramento, verificação e regulamentação. Observou-se que as finanças sustentáveis desempenham papel fundamental nesse processo ao criar mecanismos capazes de direcionar recursos para práticas agrícolas sustentáveis e fomentar mercados voltados à mitigação climática.

A agricultura regenerativa apresenta elevado potencial para geração de créditos de carbono devido à sua capacidade de promover sequestro de carbono no solo e redução das emissões de gases de efeito estufa. Entretanto, para que esses créditos sejam reconhecidos como ativos confiáveis e integrados ao mercado financeiro, torna-se indispensável garantir sua integridade ambiental por meio de metodologias robustas de certificação e monitoramento.

Conclui-se que o fortalecimento do ambiente regulatório brasileiro, aliado à ampliação de mecanismos de transparência e padronização, será determinante para consolidação de um mercado de carbono confiável e eficiente. Além disso, a integração entre finanças sustentáveis, agricultura regenerativa e mercado de carbono pode contribuir significativamente para o alcance das metas climáticas globais, bem como para promoção do desenvolvimento sustentável no setor agropecuário brasileiro.

Referências Bibliográficas

ADHISANKARAN, Kandasamy et al. Agricultural carbon credits: A pathway to environmental sustainability. Plant Science Today, 2024.

BARDIN, Laurence. Análise de conteúdo. Lisboa: Edições 70, 2011.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Resoluções CMN nº 4.943, 4.944 e 4.945, de 15 de setembro de 2021. Brasília: BCB, 2021.

CHALA, V.; DEMIDOV, B. Theoretical aspects of green financing for providing sustainable development. Economic Scope, n. 193, p. 37-45, 2024.

CHERUBIN, M. R. et al. Potential of no-tillage agriculture to sequester carbon and mitigate climate change in Brazil. Soil and Tillage Research, v. 186, p. 36-45, 2019.

CHERUBIN, M. R. et al. Carbon farming initiative: a national-scale public-private partnership to promote regenerative agriculture in Brazil. Experimental Agriculture, v. 60, 2024.

CRESWELL, John W. Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto. Porto Alegre: Artmed, 2003.

CVM. Comissão de Valores Mobiliários. Resolução CVM nº 175, de 23 de dezembro de 2022. Rio de Janeiro: CVM, 2022.

GILLER, K. E. et al. Regenerative Agriculture: An agronomic perspective. Outlook on Agriculture, v. 50, n. 1, p. 13-25, 2021.

MACIEL, C. V. et al. Crédito de carbono: comercialização e contabilização a partir de projetos de mecanismo de desenvolvimento. RIC - Revista de Informação Contábil, v. 3, n. 1, p. 89-112, 2009.

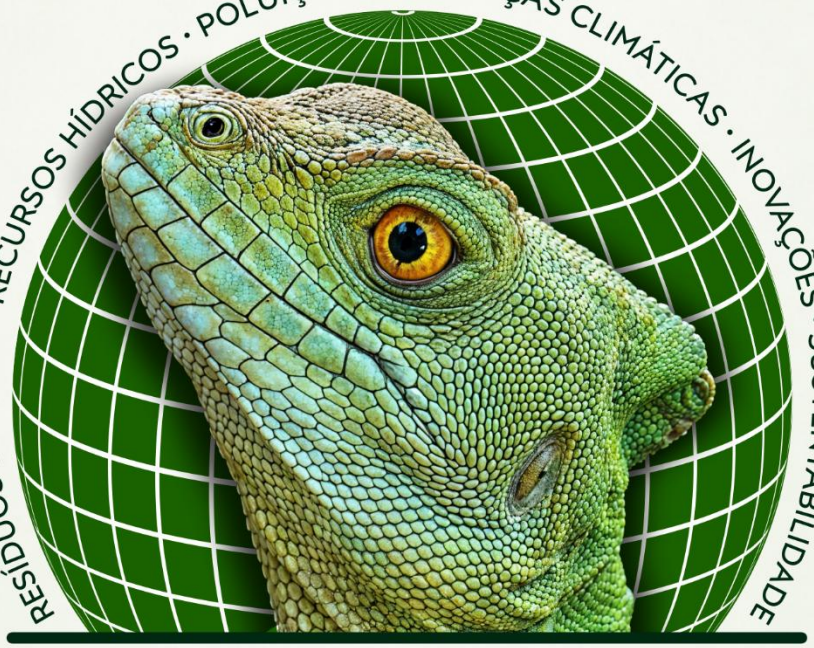
PRAIRIE, J.; KING, M.; COTRUFO, M. Sustainable agriculture through soil carbon management: a regenerative framework. Soil Biology & Biochemistry, v. 175, p. 108874, 2023.

SILVA, L. F.; MAIA, S. M. F. Emissões e sustentabilidade no agronegócio brasileiro. Revista de Gestão Ambiental, 2022.

WWF. World Economic Forum. Global Risks Report 2024. Disponível em: https://www.weforum.org/stories/2024/01/global-risks-report-2024/. Acesso em: dez. 2024.

ÁREA TEMÁTICA 2

ÁGUAS SUBTERRÂNEAS



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

CONTAMINAÇÃO E ATENUAÇÃO NATURAL EM ÁREA COM REMANESCENTE FLORESTAL IMPACTADA POR VAZAMENTO DE NAFTA

1 Flávia de Oliveira Damaceno, 2 Caetano Costanzo, 3 Beatriz Dias; 4 André Gomes Bessa Miranda, 5 Matheus Linhares, 6 Cristina Rossi Nakayama, 7 Diego Barcellos, 8 Juliana Gardenalli de Freitas

1 Universidade Federal de São Paulo, e-mail: damaceno.flavia@unifesp.br; 2 Universidade Federal de São Paulo, e-mail: caetano@walmambiental.com.br; 3 Universidade Federal de São Paulo, e-mail: beatriz.dias@unifesp.br; 4 Universidade Federal de São Paulo, e-mail:andre.miranda@unifesp.br; 5 Universidade Federal de São Paulo, e-mail: matlinhares24@gmail.com; 6 Universidade Federal de São Paulo, e-mail: crnakayama@unifesp.br; 7 Universidade Federal de São Paulo, , e-mail: diego.barcellos@unifesp.br; 8 Universidade Federal de São Paulo e-mail: jgfreitas@unifesp.br.

Palavras-chave: BTEX; TPH; atenuação natural.

Introdução

A contaminação de solos e águas subterrâneas por hidrocarbonetos derivados de petróleo representa um dos principais passivos ambientais associados a atividades industriais e de armazenamento de combustíveis. Compostos aromáticos como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (BTEX), além de hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH), apresentam elevada mobilidade relativa no meio poroso, potencial de toxicidade e persistência ambiental, podendo migrar da zona não saturada para o aquífero raso (FREEZE; CHERRY, 1979; FETTER, 2001). O comportamento dos contaminantes é complexo e depende das características hidrogeológicas do meio e das propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos. Assim, o entendimento dos processos biogeoquímicos necessita de uma abordagem integrada e interdisciplinar, e precisa ser específico para cada área de interesse. Ressalta-se que poucos estudos científicos focaram nessa avaliação para áreas em ambientes tropicais, com presença de remanescente florestal, por exemplo de Mata Atlântica.

Nesse estudo foi avaliada uma área numa faixa de dutos no município de Ferraz de Vasconcelos (SP), que apresenta histórico de contaminação decorrente de vazamento de nafta. A área se destaca por apresentar uma cobertura vegetal de remanescente de Mata Atlântica, que dificulta a aplicação de técnicas de remediação clássicas (como escavação e remoção do solo). Considerando a dinâmica de fluxo e transporte de contaminantes em aquíferos rasos, a caracterização detalhada do meio físico e químico constitui etapa fundamental para o entendimento da distribuição espacial e vertical dos compostos, bem como para a consolidação de um modelo conceitual da área, permitindo o desenvolvimento de soluções de remediação mais sustentáveis.

Assim, este trabalho apresenta os resultados da caracterização da área, com ênfase na distribuição de BTEX e TPH em solo e água subterrânea, construindo uma análise integrada para subsidiar a interpretação dos processos de transporte e atenuação natural.

Material e Métodos

O presente estudo insere-se no âmbito do projeto de pesquisa voltado à avaliação de Soluções Baseadas na Natureza (NbS) aplicadas à remediação de áreas impactadas por hidrocarbonetos. Trata-se de um caso de vazamento de nafta da faixa de dutos, onde ocorre um aquífero livre e nível d'água médio de 1 m. Na área de estudo foram definidas três unidades experimentais, denominadas Células, com base na integração de dados históricos, informações provenientes de investigações ambientais anteriores, análises hidrogeológicas e observações obtidas em vistorias de campo. As Células foram estabelecidas de modo a representar diferentes cenários ambientais e níveis de contaminação, considerando principalmente a cobertura vegetal, a distribuição espacial dos contaminantes e o sentido de fluxo da água subterrânea. Essa estratégia metodológica permite a comparação entre áreas com características contrastantes, contribuindo para a avaliação da influência da vegetação e das condições ambientais nos processos de biodegradação. Logo, foram definidas as Células de estudo como:

Célula 1 – área com fragmento florestal e maiores indícios de contaminação;
Célula 2 – área com fragmento florestal e concentrações reduzidas de contaminantes;
Célula 3 – área sem cobertura florestal, com baixas concentrações de contaminantes.

Cada célula tem aproximadamente 5x5m, e foram avaliadas com alta resolução. A Figura 01 apresenta o mapa com as três células de estudo e a localização das sondagens realizadas na área. Cada célula possui uma seção de montante e uma seção de jusante para avaliar o fluxo de massa. Para amostragem de solo foram executadas 15 sondagens distribuídas nas três Células (Figura 01), com coleta de amostras em diferentes profundidades (0,1 m; 0,5 m; 1,0 m; 2,0 m e profundidades maiores quando aplicável). As amostras de solos coletadas foram analisadas para BTEX e TPH fracionado. Os métodos analíticos seguiram procedimentos padronizados, baseados em cromatografia gasosa com detector apropriado para compostos orgânicos voláteis. Amostras de solo também foram coletadas para caracterização física, química e microbiológica.

Para caracterização da água subterrânea, foram instalados 33 poços de monitoramento em 15 conjuntos multiníveis. Os poços foram amostrados pelo método de baixa vazão para os parâmetros BTEX e TPH. Para caracterização geoquímica os parâmetros avaliados compreenderam pH, condutividade elétrica (CE), oxigênio dissolvido (OD), potencial de oxirredução

(ORP), alcalinidade, além de espécies inorgânicas potencialmente associadas a processos redutores, como ferro dissolvido (Fe^{2+}), manganês (Mn^{2+}), nitrato e sulfato, além de metano.

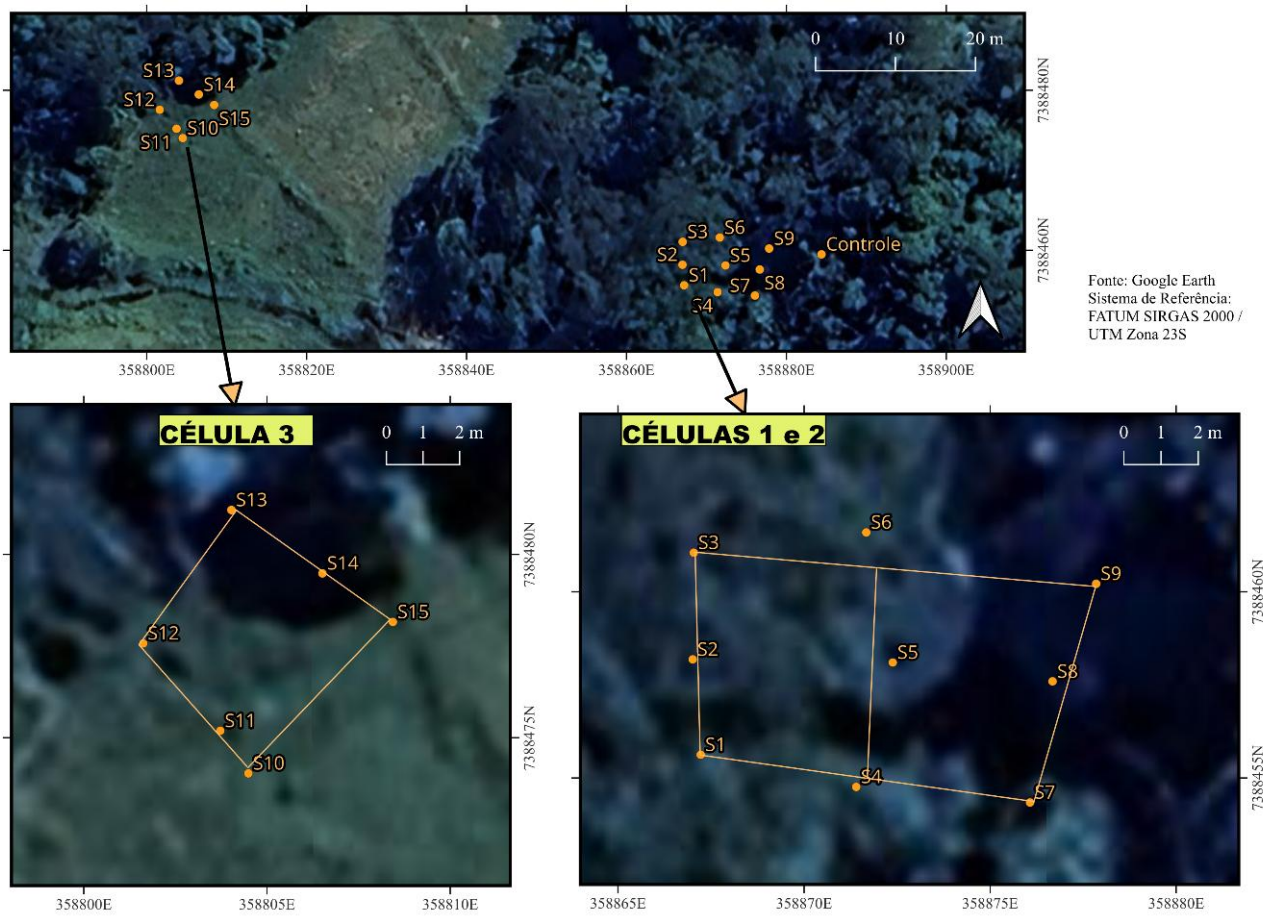


Figura 01: Localização das três células de estudo. Ferraz de Vasconselos (SP).
Fonte: Elaboração própria.

Resultados e Discussão

Para os resultados dos contaminantes orgânicos em solo, foi possível observar um comportamento heterogêneo entre as três Células. A Célula 1 apresentou as maiores concentrações de BTEX e TPH, com picos em profundidades rasas a intermediárias (0,5–1,0 m). Observa-se pico expressivo de concentração na profundidade de 0,5 m, com valores elevados de BTEX, além de concentrações relevantes de TPH na faixa C5–C8. Isso indica zona de maior retenção de contaminantes em nível raso a intermediário, provavelmente associado ao acúmulo na franja capilar e zona de oscilação do nível d'água. A distribuição vertical indica retenção preferencial em camadas específicas, possivelmente associada às características texturais do solo.

Na Célula 2, as concentrações observadas são inferiores às registradas na Célula 1, como era esperado na definição das áreas de estudo. As maiores concentrações encontram-se nas profundidades rasas (principalmente 0,5 m), com detecção de BTEX e TPH leve. Não se observa acúmulo significativo em maiores profundidades, indicando ausência de fonte secundária nesta porção da área. O solo da Célula 3 apresenta, de modo geral, concentrações abaixo do limite de quantificação para a maioria dos compostos analisados. Somente a sondagem S15 apresenta detecção pontual de etilbenzeno, xilenos e TPH na profundidade de 1 m, contudo com concentrações significativamente inferiores às da Célula 1.

Para os resultados de água subterrânea, a fase dissolvida em geral apresentou correspondência espacial com as áreas de maior concentração no solo. Na Célula 1, o benzeno apresenta as maiores concentrações entre os compostos analisados ao longo de praticamente toda a seção avaliada, com valores variando entre 986,6 e 7.852,1 µg/L. Demonstra-se um comportamento heterogêneo da pluma, possivelmente influenciado por variações pedológicas e direção preferencial de fluxo subterrâneo. Tal como para o BTEX, observa-se que as concentrações de TPH encontram-se elevadas ao longo de toda a seção, com variação de 3.500 a 12.700 ug/L, aproximadamente, indicando presença significativa de hidrocarbonetos leves na fase dissolvida. Na Célula 2, a linha de poços da seção avaliada demonstrou que as concentrações se mostram significativamente inferiores às observadas na linha da Célula 1, sendo que para o benzeno variaram entre 5,25 e 231,2 µg/L, enquanto os valores de TPH foram inferiores a 2.550 µg/L. Esse comportamento indica redução nas concentrações de fase dissolvida ao longo da linha de monitoramento, o que sugere atenuação natural da pluma. Os poços da Célula 3 apresentam concentrações muito inferiores às registradas nas

Células 1 e 2, indicando ausência de massa dissolvida significativa nessa porção da área. Isso coincide com os baixos valores observados nos resultados de concentração de contaminantes no solo.

Avaliando-se os parâmetros físico-químicos do local, para verificação do potencial de ocorrência de biodegradação e atenuação natural, de forma geral os teores dos aceptores de elétrons são baixos, principalmente o oxigênio dissolvido que apresenta valores predominantemente < 1 mg/L, assim como Nitrato. O ambiente apresenta caráter predominantemente redutor, evidenciado por valores de potencial de oxirredução majoritariamente negativos, com média de −33,55 mV. Essa condição limita a ocorrência de processos aeróbicos de degradação, favorecendo rotas metabólicas anaeróbias. A detecção de gás carbônico dissolvido reforça a ocorrência de processos de biodegradação em curso. Foram observadas baixas concentrações de ferro dissolvido (Fe^{2+}) indicando que a redução de ferro não se configura como processo redox dominante na área, seja por limitada disponibilidade de óxidos de ferro reativos no meio ou por predominância de estágios redutores mais avançados. Em contraste, as concentrações de sulfato são altas, sendo um potencial aceptor de elétrons para a biodegradação. As concentrações de sulfato são maiores onde as concentrações de benzeno são menores, o que pode indicar que o sulfato está sendo consumido na degradação anaeróbia de hidrocarbonetos.

Destaca-se a presença de metano em água subterrânea, com comportamento distinto entre as células. Nos poços correspondentes às Células 1 e 2, as concentrações de metano variam de valores baixos a moderados na maior parte dos pontos iniciais, e valores de moderados a altos na linha de jusante da Célula 2 onde as concentrações de BTEX foram menores. O aumento expressivo de metano ao longo dessas células é coerente com os resultados de BTEX e TPH, o que pode indicar que a biodegradação dos compostos orgânicos está ocorrendo em condições metanogênicas, mas principalmente fora da zona de maior concentração. Na Célula 3, as concentrações de metano são significativamente maiores às observadas na Célula 1, mas são moderados e não indicam um ambiente fortemente metanogênico tal como na linha de jusante da Célula 2. Esse comportamento está em consonância com as baixas concentrações de BTEX e TPH anteriormente descritas para essa célula. Essas concentrações podem ser decorrentes da biodegradação em condições anaeróbias de hidrocarbonetos localizados a montante, mas também podem ser decorrência da degradação de matéria orgânica de outras fontes. A ocorrência de metano nas Células 2 e 3 em maiores concentrações pode indicar a ocorrência mais significativa de processos de atenuação em regiões mais distantes da zona fonte, que pode ter condições que inibem a atividade microbiana.

Considerações Finais

Os resultados obtidos evidenciam a importância da compartimentação espacial da área para compreensão da dinâmica de transporte e atenuação dos hidrocarbonetos. A integração entre dados de solo e água subterrânea permitiu identificar clara correspondência entre zonas fonte no meio não saturado e a distribuição da fase dissolvida no aquífero raso.

Baseado nas evidências coletadas, a Célula 1 configura área com fonte secundária com menor evidências de atenuação natural significativa, enquanto as Células 2 e 3 apresentam cenário compatível com possível atenuação natural. Na Célula 2 há indícios de degradação associada à pluma de hidrocarbonetos, enquanto na Célula 3 as condições observadas sugerem menor influência da contaminação e maior proximidade com o ambiente natural do aquífero.

A avaliação dos parâmetros físico-químicos da água subterrânea indica um ambiente predominantemente redutor, caracterizado por baixos teores de oxigênio dissolvido e nitrato, além de potenciais de oxirredução negativos. Nesse contexto, a presença de sulfato como potencial aceptor de elétrons e a detecção de dióxido de carbono dissolvido sugerem que os processos de biodegradação ocorrem predominantemente sob condições anaeróbias.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer à a Transpetro pelo apoio recebido (Acordo de Cooperação Processo 23089.016697/2024-99).

Referências Bibliográficas

FETTER, C. W. *Applied Hydrogeology*. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2001. 598 p.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1979. 604 p.

CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS- QUÍMICOS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS OBTIDAS EM POÇOS TUBULARES DO MUNICÍPIO DE JUAZEIRINHO/PB

1 Bruna Isabelly Gouveia Montenegro, 2 Caio Cesar Vilar Pereira Ramalho, 3 Danúbio Leonardo Bernadino de Oliveira, 4 Edmilson Dantas da Silva Filho, 5 Francisco de Assis da Silveira Gonzaga, 6 Pedro Lucas Nunes da Silveira

1 Instituto Federal da Paraíba - Campus Campina Grande, e-mail: brunaisabellyy@icloud.com; 2 Universidade Federal da Paraíba - Campus II, e-mail: vilarcaio77@gmail.com; 3 Instituto Federal da Paraíba - Campus Campina Grande, e-mail: danubio.oliveira@ifpb.edu.br; 4 Instituto Federal da Paraíba - Campus Campina Grande, e-mail: edmilson.silva@ifpb.edu.br; 5 Instituto Federal da Paraíba - Campus Campina Grande, e-mail: francisco.gonzaga@ifpb.edu.br; 6 Instituto Federal da Paraíba - Campus Princesa Isabel, e-mail: pedro.lucas@ifpb.edu.br.

Palavras-chave: Qualidade da água; Parâmetros físico-químicos; Poços tubulares.

Resumo

Este trabalho aborda a caracterização dos parâmetros físico-químicos de águas subterrâneas obtidas em poços tubulares no município de Juazeirinho, localizado no interior da Paraíba. As coletas de água ocorreram em seis sítios da zona rural, buscando representar diferentes condições ambientais e formas de uso do solo na região. As amostras foram submetidas a análises físico-químicas no laboratório de Tratamento de Água e Efluentes do IFPB, avaliando parâmetros como pH, alcalinidade, dureza, condutividade elétrica, cálcio, magnésio, potássio e cloretos, conforme as normas estabelecidas pelo CONAMA nº 357/2005 e pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Após a realização das análises, verificou-se que algumas amostras apresentaram valores fora dos padrões esperados, não sendo condizentes com o tipo litológico da área, o que pode estar relacionado tanto a fatores naturais quanto a interferências antrópicas. Os resultados obtidos foram comparados com os padrões de potabilidade vigentes, permitindo identificar possíveis alterações na qualidade da água. Além disso, foi realizada uma análise crítica dos dados com o objetivo de avaliar a adequação dessas águas para consumo humano e uso doméstico. O estudo também considerou a influência de aspectos geológicos e das atividades humanas na composição das águas subterrâneas, destacando a importância do monitoramento contínuo desses recursos. Dessa forma, os resultados obtidos contribuem para o diagnóstico da qualidade hídrica local, auxiliando na tomada de decisões voltadas à gestão, preservação e uso sustentável da água na região semiárida.

Introdução

Segundo Mendonça (2019), apenas 2,5% da água existente no planeta é doce, sendo que apenas uma pequena fração desse total encontra-se acessível para o consumo humano. De fato, a maior parte da água doce está armazenada sob a forma de gelo na Antártida, no Ártico e em geleiras, tornando-se indisponível para uso imediato. Diante desse cenário, a gestão eficiente dos recursos hídricos torna-se fundamental, especialmente em regiões semiáridas, onde a escassez de água representa um desafio constante para a população e para o desenvolvimento socioeconômico.

A água é um recurso natural essencial à manutenção da vida e ao desenvolvimento socioeconômico. Entretanto, a intensificação das atividades humanas nas últimas décadas tem resultado em significativas alterações na qualidade dos corpos hídricos superficiais e subterrâneos. O aumento da urbanização, a expansão agrícola, o lançamento de efluentes domésticos e industriais e a ocupação desordenada das margens dos rios contribuem para a degradação dos mananciais e comprometem sua potabilidade e uso múltiplo. Assim, o monitoramento contínuo da qualidade da água é fundamental para avaliar o grau de conservação dos ecossistemas aquáticos e subsidiar políticas públicas de gestão ambiental (TUNDISI;TUNDISI, 2008).

O Nordeste do Brasil é uma região caracterizada pela distribuição irregular dos recursos hídricos, enfrentando desafios significativos relacionados à escassez de água. De acordo com dados hidrográficos, essa região abriga cerca de 6% do volume total de água doce disponível no país. No entanto, a elevada variabilidade climática, marcada por longos períodos de estiagem e por chuvas sazonais concentradas, contribui para um cenário de vulnerabilidade hídrica (BRAGA, 2019).

A água para consumo humano é, em regra, obtida a partir de água doce, tendo origens superficiais ou subterrâneas. A escolha entre estas duas possibilidades são condicionada pela dimensão da população servida (os reservatórios superficiais permitem a extração de maiores caudais), mas, também, da presença de aquíferos e das funções estratégicas em zonas sujeitas a períodos de seca prolongada. Contudo, este recurso pode ter presentes contaminantes de origem natural ou antropogênica, pelo que podem não cumprir os requisitos de águas potáveis, impondo-se o seu tratamento prévio (BAPTISTA, et al., 2010).

As águas subterrâneas são as principais fontes de água potável em regiões com déficit de água superficial ou em localidades sem sistema centralizado de abastecimento. Em muitos locais, elas funcionam como complemento às águas superficiais, sendo frequentemente consumidas de forma indiscriminada pela população, sem considerar sua qualidade, o que pode causar prejuízos ao bem-estar dos consumidores. Geralmente, os problemas relacionados à qualidade da água subterrânea são mais intensos em regiões rurais, devido à infiltração de agrotóxicos, fertilizantes, esgotos domésticos e

excrementos de animais nos aquíferos ou diretamente nos poços artesianos. Nessas regiões, os efeitos são mais significativos para os consumidores, em razão da ausência de outras opções de abastecimento (MIRLEAN et al., 2005).

As águas subterrâneas são geralmente isentas de microrganismos patogênicos e com menores teores de matéria orgânica, mas podem conter elevados teores de íons em solução. As águas de origem superficial têm, geralmente, uma grande variedade de contaminantes químicos e biológicos – em alguns casos potencialmente patogênicos. As características físicas das águas de abastecimento encerram comumente o impacto de imediato ao consumidor, podendo, com alguma frequência, concorrer para recusa da água distribuída pela concessionária. Quando tal se sucede, a opção de abastecimento recai para fonte alternativa, não necessariamente segura. Esta percepção imediata abarca os sentidos da visão (turbidez e cor), paladar e olfato (sabor e odor) (LIBÂNIO, 2010; SILVA et al., 2017).

A composição química da maioria das águas superficiais e subterrâneas resulta das interações entre água, rocha e ar. A evaporação pode concentrar solutos, levando à cristalização de minerais como calcita e gesso. Além disso, a combinação entre evaporação e precipitação mineral pode elevar as concentrações de sódio, cloro e/ou sulfatos. Os gases presentes no solo, especialmente o dióxido de carbono proveniente da respiração das raízes e da decomposição da matéria orgânica, também influenciam a composição da água. Dessa forma, a percolação da água por solos ricos em matéria orgânica pode reduzir o pH, favorecendo a dissolução de minerais solúveis em meio ácido (DUNNE, 2012).

No Seridó Paraibano, situado na mesorregião da Borborema e na região central do Estado, encontramos o município de Juazeirinho que corresponde a uma das demais cidades que fazem parte da microrregião do Seridó Ocidental. Juazeirinho possui uma área territorial correspondente a 474,606 km² e sua população estimada é de 17.007 pessoas (IBGE, 2022). Toda região ao redor do município, incluindo o mesmo, está submetida a condições climáticas que não favorecem a população, o tópico de questões hídricas, no entanto, merecem um destaque já que é um problema que afeta todos os sentidos de produção das comunidades locais. Muitas vezes pela falta de água da chuva e também por questões financeiras, o poço tubular acaba saindo mais em conta por não necessitar de um serviço de perfuração.

Material e Métodos

A princípio, foram definidas as datas das coletas, que foram realizadas no mês de Agosto de 2025, foram dois dias efetivando as coletas no município. Ao todo visitamos seis sítios na unidade da zona rural e foram colhidas oito amostras, de todas foram colhidas a água bruta e apenas no segundo e no terceiro sítio foram colhidas também amostras dessalinizadas.

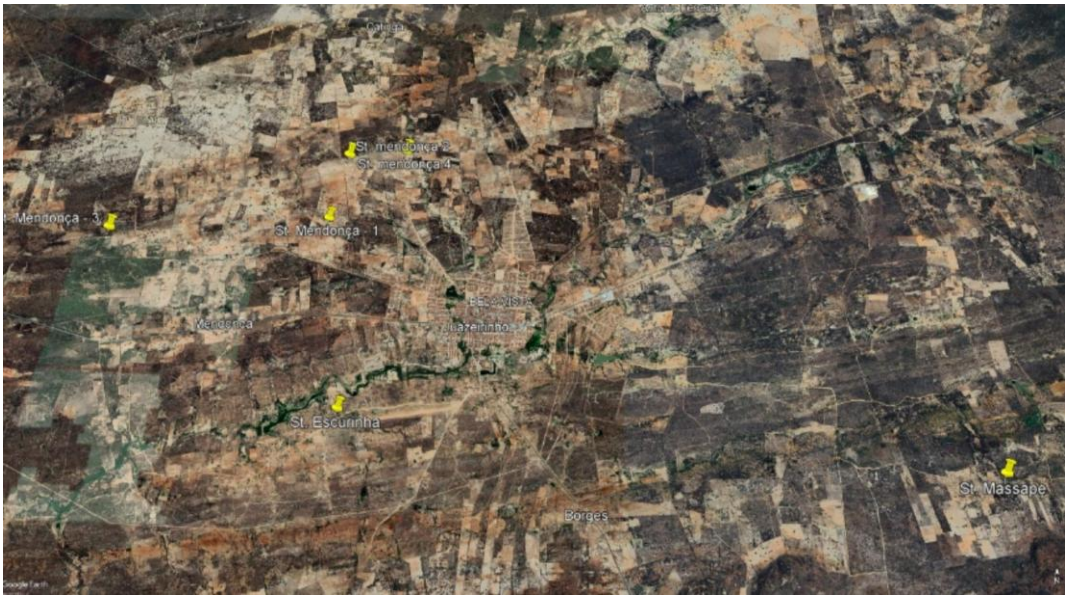


Figura 01: Localidade dos poços escolhidos.
Fonte: Google Earth Pro (2025)

Logo após realizar os processos de um prévio estudo do local e coleta, o passo seguinte foi dar início as análises laboratoriais, que consistiram em práticas no laboratório de Tratamento de Água e Efluentes do IFPB. Foram analisados os seguintes parâmetros: pH, alcalinidade (mg/L), dureza (mg/L), condutividade elétrica (mS/cm), Cálcio (Ca) (mg/L), Magnésio (Mg) (mg/L), Potássio (K) (mg/L), Cloretos (Cl) (mg/L). Não foi possível realizar a análise do parâmetro de Sódio (Na) (mg/L), devido à falta de reagente no laboratório. Para cada parâmetro, foram utilizados reagentes específicos, e os resultados foram comparados com os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005 (BRASIL, 2005), que regulamenta os padrões de qualidade da água no Brasil, e pela Portaria GM/MS nº 888/2021, que define os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seus critérios de potabilidade.



Figura 02: Instrumento utilizado para medir a condutividade da água.
Fonte: Autoria própria (2025)

Todas as análises foram realizadas em triplicata, a fim de garantir maior precisão, reprodutibilidade e confiabilidade dos resultados obtidos. Os dados experimentais foram tratados estatisticamente, considerando-se a média dos valores analisados. Os procedimentos metodológicos adotados seguiram as recomendações do Instituto Adolfo Lutz, conforme descrito em seus métodos oficiais para análises físico-químicas. Posteriormente, os resultados foram comparados com os padrões de qualidade estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021, que dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.



Figura 03: Análises físico-químicas das amostras.
Fonte: Autoria própria (2025)

Resultados e Discussão

Parâmetros	Unidade de Medida	1	2	3	4	5	6	V.M.P
pH	-	8,75	7,83	8,04	7,77	8,49	7,05	6,0 - 9,5
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L a 25ºC	5.732	3.787	3.330	1.784	7,28	795,2	*
Dureza Total	mg/L	3.850	2.400	1.500	1.370	2.430	430	500
Condutividade Elétrica	mS/cm a 25°C	11.650	7.650	6.820	3.600	6.270	1.581,83	1000
Ca	mg/L	1,9	1,5	1,46	1,37	1,56	1,57	*
Mg	mg/L	1.900	1.500	730	685	1.560	314	*
K	mg/L	12,3	20	11,1	20	20	20	*
Cl	mg/L	11	7,2	5,9	3,83	5,7	3,47	250
Alcalinidade	mg/L	66,4	113,2	116	122,66	16	1,12	250

V.M.P - Valor Máximo Permitido.

Tabela 01: Resultado das análises físico-químicas.

O pH das amostras variou entre 7,05 (poço 6) e 8,75 (poço 1), mantendo-se dentro do intervalo permitido pela Portaria GM/MS nº 888/2021, que estabelece valores entre 6,0 e 9,5 para água destinada ao consumo humano, estando também em conformidade com os padrões gerais de qualidade estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005. Observa-se que os poços 1 e 5 apresentaram valores mais elevados (8,75 e 8,49), indicando maior alcalinidade, possivelmente associada à presença de bicarbonatos e carbonatos dissolvidos, comuns em aquíferos do semiárido. Os poços 2, 3 e 4 apresentaram valores intermediários (7,83; 8,04; 7,77), enquanto o poço 6 apresentou valor mais próximo da neutralidade. Embora todos estejam dentro do padrão, valores mais elevados podem influenciar o sabor da água e reduzir a eficiência da cloração, além de interferir em processos de tratamento.

Os sólidos totais dissolvidos (STD) apresentaram valores elevados, principalmente nos poços 1 (5.732 mg/L), 2 (3.787 mg/L), 3 (3.330 mg/L) e 4 (1.784 mg/L), ultrapassando significativamente o valor de referência de 1.000 mg/L recomendado pela Portaria GM/MS nº 888/2021, além de indicarem comprometimento da qualidade segundo os parâmetros de enquadramento da Resolução CONAMA nº 357/2005. O poço 6 apresentou valor de 795,2 mg/L, estando mais próximo do aceitável, enquanto o poço 5 apresentou valor extremamente baixo (7,28 mg/L), destoando das demais amostras e podendo indicar erro experimental ou características específicas do aquífero. A elevada concentração de sólidos dissolvidos indica alta mineralização da água, o que pode comprometer seu consumo, causando sabor desagradável, rejeição pela população e possíveis efeitos adversos à saúde, além de impactar o uso agrícola devido à salinização.

A dureza total apresentou valores bastante elevados em quase todas as amostras, com destaque para os poços 1 (3.850 mg/L), 2 (2.400 mg/L), 5 (2.430 mg/L), 3 (1.500 mg/L) e 4 (1.370 mg/L), todos acima do limite máximo permitido de 500 mg/L pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Apenas o poço 6 (430 mg/L) apresentou valor dentro do padrão. Esses resultados caracterizam águas extremamente duras, o que está associado principalmente à presença de íons magnésio, conforme observado nos resultados, sendo também coerente com águas subterrâneas de regiões semiáridas descritas na literatura e compatíveis com características naturais consideradas pela Resolução CONAMA nº 357/2005. Embora a dureza não represente risco direto à saúde, pode causar desconfortos digestivos, incrustações em sistemas hidráulicos e redução da eficiência de sabões, além de elevar custos de manutenção.

A condutividade elétrica apresentou valores elevados em todas as amostras, sendo mais expressivos nos poços 1 (11.650 mS/cm), 2 (7.650 mS/cm) e 3 (6.820 mS/cm), indicando alta concentração de íons dissolvidos. Os poços 4 (3.600 mS/cm) e 5 (6.270 mS/cm) também apresentaram valores elevados, enquanto o poço 6 (1.581,83 mS/cm) apresentou o menor valor, porém ainda elevado. Embora a legislação não estabeleça limite direto para condutividade, esse parâmetro está diretamente relacionado aos sólidos dissolvidos e é amplamente utilizado como indicador indireto de qualidade da água, sendo coerente com os critérios de avaliação ambiental da Resolução CONAMA nº 357/2005, reforçando a baixa qualidade da água nos poços com valores mais altos.

O cálcio (Ca) apresentou concentrações relativamente baixas em todas as amostras, variando entre 1,37 mg/L (poço 4) e 1,9 mg/L (poço 1), indicando que esse elemento não é o principal responsável pela dureza elevada observada. Essa baixa concentração sugere que a dureza está mais associada à presença de outros íons, especialmente o magnésio, sendo um comportamento típico de águas subterrâneas de determinadas formações geológicas.

O magnésio (Mg) apresentou valores elevados, especialmente nos poços 1 (1.900 mg/L), 2 (1.500 mg/L), 5 (1.560 mg/L) e 3 (730 mg/L), sendo o principal responsável pela dureza total da água. O poço 4 apresentou valor de 685 mg/L e o poço 6 (314 mg/L), sendo este último o único com valor relativamente mais baixo. Altas concentrações de magnésio podem causar efeito laxativo e desconfortos gastrointestinais quando consumidas em excesso, além de contribuir significativamente para a classificação da água como imprópria para consumo sem tratamento, conforme critérios da Portaria GM/MS nº 888/2021.

O potássio (K) apresentou concentrações relativamente baixas e homogêneas entre os poços, variando de 11,1 mg/L (poço 3) a 20 mg/L (poços 2, 4, 5 e 6). Esses valores são comuns em águas subterrâneas e não representam risco significativo à saúde, estando associados a processos naturais de dissolução de minerais do solo e não sendo considerados parâmetros críticos pela legislação vigente.

O cloreto (Cl^-) apresentou valores abaixo do limite máximo permitido de 250 mg/L em todas as amostras, variando entre 3,47 mg/L (poço 6) e 11 mg/L (poço 1), atendendo aos padrões estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021 e compatíveis com águas de boa qualidade segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005. Esse resultado indica ausência de contaminação significativa por esgoto doméstico ou intrusão salina, sendo um aspecto positivo em relação à qualidade da água.

A alcalinidade apresentou variação significativa entre os poços, com valores mais elevados nos poços 4 (122,66 mg/L), 3 (116 mg/L) e 2 (113,2 mg/L), indicando maior presença de bicarbonatos. O poço 1 apresentou valor intermediário (66,4 mg/L), enquanto os poços 5 (16 mg/L) e 6 (1,12 mg/L) apresentaram valores baixos. Embora não haja limite restritivo para alcalinidade na Portaria GM/MS nº 888/2021, esse parâmetro está relacionado à capacidade tampão da água e influencia diretamente o pH, sendo importante para a estabilidade química e para processos de tratamento.

De modo geral, observa-se que os poços 1, 2, 3, 4 e 5 apresentam comprometimento da qualidade da água, principalmente devido aos altos valores de sólidos dissolvidos, dureza e condutividade elétrica, tornando-a inadequada para consumo humano sem tratamento prévio, conforme critérios da Portaria GM/MS nº 888/2021 e parâmetros ambientais da Resolução CONAMA nº 357/2005. O poço 6 apresentou melhores condições relativas, embora ainda apresente necessidade de avaliação complementar.

O consumo dessa água pode causar efeitos negativos à saúde humana, como problemas gastrointestinais, sobrecarga renal e formação de cálculos renais, especialmente devido ao excesso de sais minerais. Em animais, pode reduzir o consumo de água e afetar o desempenho produtivo, enquanto na agricultura pode causar salinização do solo, prejudicando o crescimento das plantas e a fertilidade do solo a longo prazo.

Diante disso, recomenda-se o tratamento dessas águas, especialmente por processos como osmose reversa, que remove sais dissolvidos, além de sistemas de troca iônica para redução da dureza. A associação com desinfecção adequada torna-se essencial para garantir a potabilidade da água conforme os padrões estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021, contribuindo para a segurança hídrica e qualidade de vida da população.

Considerações Finais

A partir dos resultados obtidos nas análises físico-químicas das águas dos poços estudados, foi possível verificar que, embora alguns parâmetros como pH e cloretos estejam dentro dos limites estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021, a maioria das amostras apresentou valores elevados de sólidos totais dissolvidos, dureza total e condutividade elétrica, indicando alta mineralização e comprometimento da qualidade da água. Os poços 1, 2, 3, 4 e 5 destacaram-se pelos elevados teores de sais dissolvidos, sendo classificados como águas impróprias para consumo humano sem tratamento prévio, enquanto o poço 6 apresentou condições relativamente melhores, porém ainda necessitando de avaliação complementar. A elevada dureza, associada principalmente ao magnésio, além de causar problemas operacionais em sistemas hidráulicos, pode gerar desconfortos ao consumo, como alterações no sabor e possíveis efeitos gastrointestinais. Além disso, a presença excessiva de sais pode ocasionar impactos à saúde humana, como sobrecarga renal e formação de cálculos, bem como prejuízos à criação de animais, reduzindo o consumo hídrico e afetando o desempenho produtivo. No âmbito ambiental, o uso dessa água na irrigação pode contribuir para a salinização do solo, comprometendo o desenvolvimento das plantas e a produtividade agrícola ao longo do tempo. Dessa forma, os resultados evidenciam a influência das características geológicas da região semiárida, bem como possíveis interferências antrópicas, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade da água subterrânea.

Diante desse cenário, torna-se indispensável a adoção de alternativas de tratamento que viabilizem o uso seguro dessas águas, especialmente para consumo humano. Tecnologias como osmose reversa, troca iônica e filtração adequada mostram-se eficientes na redução da salinidade e da dureza, podendo tornar a água compatível com os padrões de potabilidade. Além disso, práticas de manejo sustentável dos recursos hídricos, associadas ao controle de possíveis fontes de contaminação, são fundamentais para preservar a qualidade das águas subterrâneas ao longo do tempo. Portanto, o estudo contribui para a compreensão das características físico-químicas das águas da região e reforça a importância de intervenções técnicas e ambientais para garantir o acesso à água de qualidade.

Agradecimentos

Agradecemos, primeiramente, ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) – Campus Campina Grande, pelo apoio institucional e por disponibilizar toda a infraestrutura necessária para a realização deste trabalho. Destacamos a importância dos recursos laboratoriais, equipamentos e insumos fornecidos, que foram fundamentais para o desenvolvimento das análises. Ao grupo de pesquisa CATA – Ciências Agrárias e Tecnologia de Alimentos, expressamos nossa gratidão pelo suporte científico, incentivo e contribuições ao longo de todo o processo. Agradecemos também aos técnicos de laboratório do IFPB, pelo auxílio nas etapas experimentais, orientações práticas e disponibilidade durante as análises. Reconhecemos ainda o apoio dos docentes envolvidos, que contribuíram com orientações e incentivo acadêmico. Aos colegas que colaboraram direta ou indiretamente na execução das atividades, nosso sincero agradecimento. Por fim, registramos nossa gratidão a todos que contribuíram para a realização deste estudo, tornando possível a concretização desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

BAPTISTA, J.; PIRES, J.; MAÇÃS, F. **Tratamento de água para consumo humano e uso industrial.** In: BRITO, A.; OLIVEIRA, J.; PEIXOTO, J. Porto: Publindústria, 2010.

BRAGA, B.; PORTO, M.; TUCCI, C. E. M. **Monitoramento de quantidade e qualidade das águas.** In: REBOUÇAS, A. da C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (ed.). Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. São Paulo: Escrituras; USP; ABC, 2019.

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.** Brasília: CONAMA, 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.** Brasília: Ministério da Saúde, 2021.

DUNNE, R. **Water, water everywhere and not a drop to drink, nor do I know its whereabouts. In: DRELICH, J. (ed.). Water in mineral processing: First International Symposium on Water in Mineral Processing.** USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2012. ISBN 978-0-87335-349-6.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos.** 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Juazeirinho (PB).** Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pb/juazeirinho.html. Acesso em: 19 mar. 2026.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água.** 3. ed. Campinas: Átomo, 2010.

MENDONÇA, F. **Recursos hídricos e sua importância para a sustentabilidade ambiental.** São Paulo: Atlas, 2019.

MIRLEAN, N.; MACHADO, M. I.; OSINALDI, G. M.; DEMOLINER, A.; BAISCH, P. O. **Impacto industrial na composição química das águas subterrâneas com enfoque no consumo humano (Rio Grande, RS).** Química Nova, v. 28, n. 5, p. 788-791, 2005.

SILVA, A. B.; BRITO, J. M.; SILVA, R. A.; BRAZ, A. S.; SILVA FILHO, E. D. **Parâmetros físico-químicos da água utilizada para consumo em poços artesianos na cidade de Remígio-PB.** Águas Subterrâneas, v. 31, n. 2, p. 109-118, 2017. Disponível em: https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28807. Acesso em: 23 mar. 2026. DOI: http://dx.doi.org/10.14295/ras.v31i2.28807.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM CAVERNAS CÁRSTICAS TURÍSTICAS E NÃO TURÍSTICAS DO PLANALTO CENTRAL BRASILEIRO

1 Maycon Winnicius Barreira de Souza-Coelho, 2 Fernanda Sousa Santos, 3 Igor Gerolineto Alves, 4 Igor Gomes Oliveira, 5 Wilian Vaz-Silva, 6 Rodrigo Assis de Carvalho e 7Francisco Leonardo Tejerina-Garro

1 Pontifícia Universidade Católica de Goiás, e-mail: mayconwinnicius1999@gmail.com; 2 Pontifícia Universidade Católica de Goiás, e-mail: fernandamgene@gmail.com; 3 Pontifícia Universidade Católica de Goiás, e-mail: igor.heperto@gmail.com; 4 Universidade Estadual de Goiás, e-mail: igor.oliveira@ueg.br; 5 Pontifícia Universidade Católica de Goiás, e-mail: herpetovaz@gmail.com; 6 Universidade Estadual de Goiás, e-mail: decarvalho.ra@gmail.com. 7 Pontifícia Universidade Católica de Goiás e Universidade Evangélica de Goiás, e-mail: garro@pucgoias.edu.br.

Palavras-chave: Antropização; contaminantes; condutividade.

Introdução

Cavidades subterrâneas em sistemas cársticos são ambientes particularmente vulneráveis à contaminação, uma vez que a água e os solutos podem infiltrar-se rapidamente por fraturas, condutos e sumidouros, com baixa capacidade de retenção e autodepuração. Esses impactos gerados na superfície, como descarte de resíduos sólidos, lançamento de efluentes, atividades agropecuárias e ocupação humana, podem alterar a composição hidroquímica e comprometer a qualidade das águas subterrâneas em curto intervalo de tempo (JIMÉNEZ-SÁNCHEZ et al., 2008; KAÇAROGLU, 1999).

No nordeste de Goiás que faz parte do Planalto Central brasileiro, estão presentes áreas de interesse espeleológico nas quais as atividades de pesquisa e turismo coexistem e estão inseridas em uma paisagem marcada pela expansão de pastagens e transformação do uso da terra (CARNEIRO; FARIA; ROSA, 2022; FARIA; SILVA, 2020). Essas diferentes formas de uso antrópico do solo e de ocupação da paisagem podem comprometer a qualidade da água, sobretudo em sistemas cársticos como é o caso das cavernas objeto de estudo, onde a vulnerabilidade hidrogeológica favorece a entrada e o transporte de contaminantes para o meio subterrâneo (JIMÉNEZ-SÁNCHEZ et al., 2008; KAÇAROGLU, 1999).

Entre os vetores de impacto antrópico, o turismo tem recebido atenção crescente em áreas cavernícolas, pois a intensificação da visitação costuma vir acompanhada de infraestrutura, circulação de pessoas e maior pressão sobre o entorno das cavidades. Estudos em cavernas turísticas e cenotes (de origem cárstico) indicam que a visitação pode estar associada a alterações na qualidade da água, seja de forma direta, pela deposição de resíduos e matéria orgânica, seja de forma indireta, pelo adensamento do uso do solo e pela ampliação de estruturas de apoio no exterior da cavidade (ARCEGA-CABRERA et al., 2023; ZANATTO et al., 2019).

Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade das águas subterrâneas por meio da mensuração de variáveis limnológicas em cavidades cársticas turísticas e não turísticas localizadas na região nordeste do estado de Goiás.

Material e Métodos

Foram obtidos dados limnológicos de condutividade, salinidade, oxigênio dissolvido, oxigênio saturado, pH e temperatura em cavernas cársticas localizadas nos municípios de Posse, Buritinópolis e Mambaí, na porção nordeste do estado de Goiás, Brasil Central, inserida no domínio do Planalto Central Brasileiro e na Região hidrográfica do Tocantins-Araguaia (MEIRELLES; FERREIRA; TOKARSKI, 2007; Figura 01). A região integra o Domínio Morfoclimático do Cerrado, com estação chuvosa no verão e seca no inverno, sob predomínio do clima Aw, segundo Köppen-Geiger, embora haja variações regionais relacionadas à altitude e à dinâmica atmosférica (CARDOSO; MARCUZZO; RAMALHO, 2014).

As cavernas amostradas estão inseridas no domínio carbonático do Grupo Bambuí, em área onde o relevo cárstico se associa à transição entre os arenitos do Grupo Urucuia e os calcários subjacentes. Nesse contexto, a captura fluvial desempenha papel central na evolução da paisagem, favorecendo a formação de vales secos, paleocanais e depósitos sedimentares preservados após a migração do fluxo superficial para o subterrâneo, como descrito para a bacia do rio Vermelho (NOGUEIRA et al., 2022; SILVA-TAVARES et al., 2025).

As cavidades situam-se na Área de Proteção Ambiental Nascentes do Rio Vermelho, mas permanecem sujeitas a pressões antrópicas. Parte das áreas sobrejacentes apresenta redução da cobertura natural e avanço da antropização, com remanescentes vegetacionais concentrados sobretudo nas bordas da Serra Geral e nos limites da unidade de conservação. Além disso, os acessos às cavidades, como bocas de cavernas, fendas, fraturas, diaclases abertas, claraboias e dutos, sofrem influência da proximidade com pastagens, mosaicos agropecuários, áreas agrícolas, estradas vicinais, trilhas e uso turístico no interior da unidade (FARIA; SILVA, 2020).

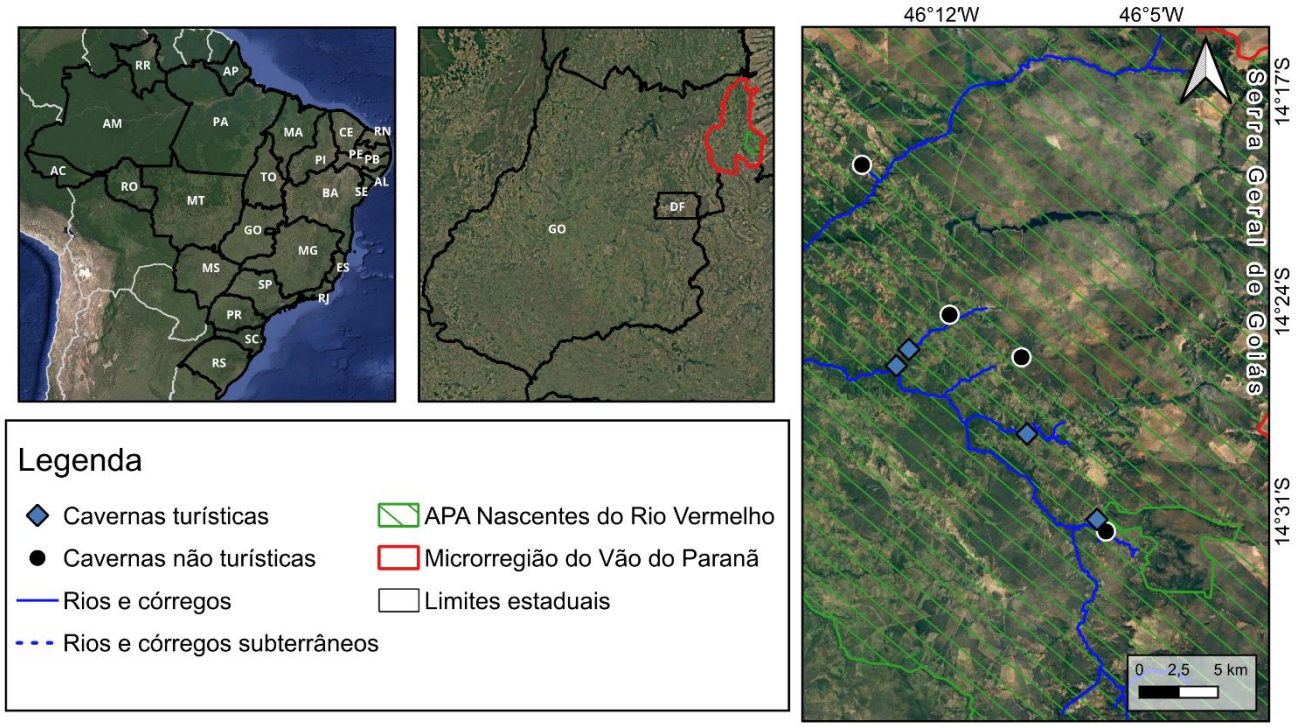


Figura 01: Localização da área de estudo. Fonte: QGIS Desktop versão 3.44.6, 2026. Dados Google Satélite do QGIS 2026; IBGE (2021), Sistema de Coordenadas Geográficas, Datum SIRGAS 2000. Elaboração: Maycon Winnicius Barreira de Souza-Coelho.

As variáveis limnológicas foram mensuradas com sonda multiparâmetro ©Hannah HI98194 em cada cavidade, nas zonas fótica, de penumbra e afótica, quando presentes. Para as leituras, a sonda foi submersa a aproximadamente 30 cm de profundidade. As coletas foram realizadas entre julho e agosto de 2025, durante o período seco.

Os dados foram tabulados em matriz e submetidos inicialmente ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($p = 0,05$). Em seguida, foi realizada uma Análise de Componentes Principais (PCA), a partir da matriz de correlação, para explorar os padrões multivariados de variação limnológica entre as amostras. Posteriormente, aplicou-se o teste de Mann-Whitney para avaliar diferenças univariadas entre os grupos. Todas as análises foram conduzidas no software PAST, versão 5.3 (HAMMER et al., 2001).

Resultados e Discussão

A PCA indicou separação parcial entre cavernas turísticas e não turísticas, com maior agrupamento das turísticas e maior dispersão das não turísticas (Figura 02). Entre as variáveis limnológicas, a condutividade foi a que mais contribuiu para essa distinção, com valores mais elevados nas cavernas turísticas, enquanto a salinidade apresentou tendência semelhante na ordenação, mas sem diferença significativa. O teste de Mann-Whitney corroborou esse padrão ao indicar condutividade ($U = 24$, $p = 0,0317$) significativamente maior nas cavernas turísticas (média = 256,6 $\mu S.cm^{-1}$) que nas não turísticas (média = 152,9 $\mu S.cm^{-1}$), enquanto a salinidade ($U = 47,50$, $p = 6,190$) não diferiu entre as categorias (turísticas, média = 0,087 PSU e não turísticas, média = 0,073 PSU). Essa tendencia sugere maior carga iônica dissolvida nas águas das cavidades turísticas, o que pode refletir influência de fontes antrópicas locais.

Essa tendencia pode estar associado à presença de resíduos sólidos observados no canal dos cursos hídricos dessas cavernas, onde foram registrados plásticos, metais, tecidos, vidro e outros materiais retidos em rochas, raízes e troncos. Em ambientes aquáticos, o descarte irregular de resíduos pode elevar a condutividade pela liberação e dissolução de sólidos e sais na água. Sampaio et al. (2007) demonstraram relação linear entre condutividade elétrica e sólidos totais e dissolvidos em diferentes águas residuárias, indicando que o aumento da carga de sólidos pode se refletir diretamente na condutividade. De modo semelhante, Bangani et al. (2023) verificaram deterioração da qualidade da água após áreas de despejo irregular, com aumento da condutividade nos pontos a jusante dos depósitos de resíduos.

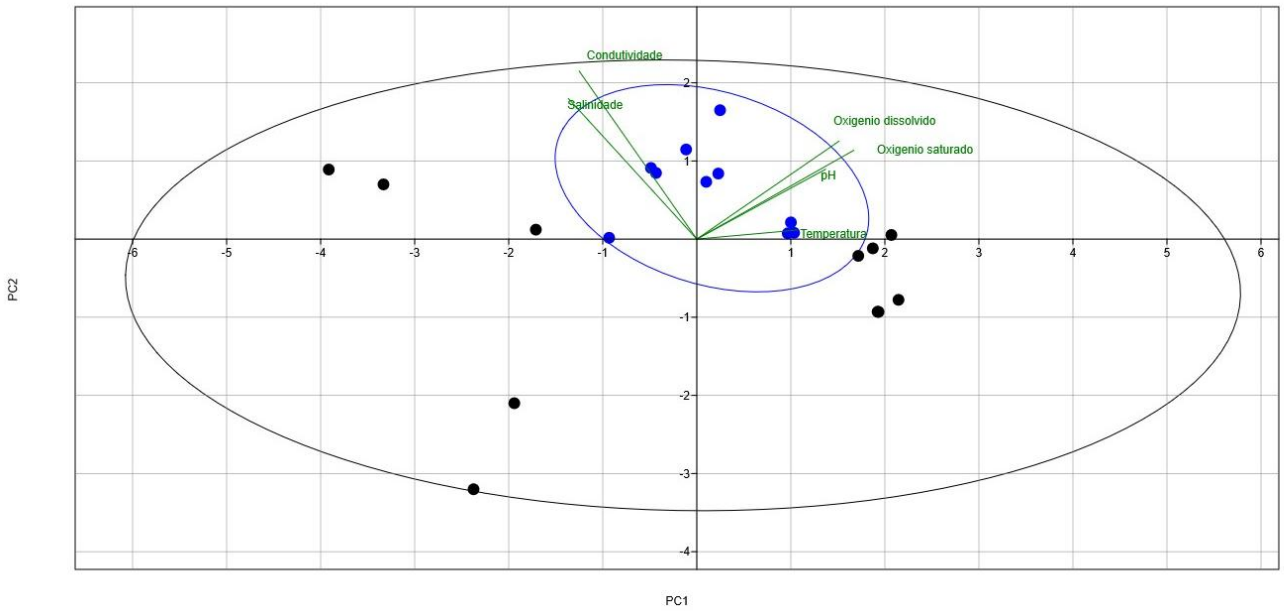


Figura 02: Análise de Componentes Principais (PCA), com elipses de dispersão, com base nas variáveis limnológicas. Pontos e elipse azuis = cavernas turísticas, e pontos e elipse preto = cavernas não turísticas; PC1 = eixo x, PC2 = eixo y.

No contexto cárstico, esse processo tende a ser intensificado pela alta vulnerabilidade hidrogeológica desses sistemas. Aquíferos cársticos apresentam fluxo rápido, pouca atenuação natural e conexão direta entre superfície e subterrâneo, o que favorece a entrada e o transporte de contaminantes oriundos do uso do solo. Kaçaroglu (1999) destaca que a disposição de resíduos sólidos, efluentes e outras fontes poluidoras em áreas cársticas compromete rapidamente a qualidade da água subterrânea. Da mesma forma, Jiménez-Sánchez et al. (2008) mostraram que cavernas com pecuária concentrada ou sistemas urbanos e residenciais instalados acima da cavidade exibem maior contaminação hídrica, com alterações hidroquímicas e, em alguns casos, redução da disponibilidade de oxigênio dissolvido.

Assim, embora a visitação turística possa contribuir diretamente para a deposição de resíduos sólidos e para a pressão sobre o sistema subterrâneo, os resultados sugerem que a maior condutividade nas cavernas turísticas decorre da ação conjunta de múltiplas pressões antrópicas. Além do turismo, a presença de atividades pecuaristas e de ocupação por pequenos agricultores sobre as cavidades provavelmente amplia o aporte de materiais, nutrientes e solutos para o sistema hídrico subterrâneo. Esse entendimento é compatível com estudos em ambientes cársticos turísticos, nos quais a visitação, a infraestrutura associada e o uso do solo no entorno atuam conjuntamente na degradação da qualidade da água (ARCEGA-CABRERA et al., 2023; JIMÉNEZ-SÁNCHEZ et al., 2008).

Considerações Finais

Com base nos resultados, o estudo indica uma maior condutividade nas cavidades turísticas, sugerindo que as pressões antrópicas sobre esses sistemas cársticos podem estar influenciando a qualidade das águas subterrâneas. Nesse contexto, a urbanização, as atividades agropecuárias e, principalmente, a visitação turística pode estar relacionada à alteração das variáveis limnológicas, uma vez que moradores do entorno e visitantes podem introduzir contaminantes nas cavidades, como resíduos sólidos, cuja decomposição no ambiente favorece mudanças na composição da água. Assim, os dados reforçam a necessidade de monitoramento contínuo e de medidas de manejo e conservação que considerem não apenas o uso turístico das cavernas, mas também as atividades desenvolvidas em suas áreas de influência.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas integrais concedidas aos três primeiros coautores; à Pontifícia Universidade Católica de Goiás pelo recurso de pesquisa concedido ao último coautor (Edital Nº 001/2024 GAB/R – Programa Institucional de Apoio à Pesquisa da PUC Goiás (PAP/PUC Goiás), Processo 2024.01.20041316); à Universidade Estadual de Goiás e ao Emílio Manoel Calvo pelo apoio logístico.

Referências Bibliográficas

ARCEGA-CABRERA, Flor; LEÓN-AGUIRRE, Karina; ENSEÑAT-SOBERANIS, Fernando; GIÁCOMAN-VALLEJOS, Germán; RODRÍGUEZ-FUENTES, Gabriela; OCEGUERA-VARGAS, Ismael; LAMAS-COSÍO, Elizabeth; SIMOES, Nuno. Use of microbiological and chemical data to evaluate the effects of tourism on water quality in karstic cenotes in Yucatan, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 111, 2023. DOI: 10.1007/s00128-023-03761-1.

BANGANI, Lazola; KABITI, Hlekani Muchazotida; AMOO, Oseni; NAKIN, Motebang D. V.; MAGAYIYANA, Zendy. Impacts of illegal solid waste dumping on the water quality of the Mthatha River. *Water Practice & Technology*, v. 18, n. 5, p. 1011-1019, 2023. DOI: 10.2166/wpt.2023.053.

JIMÉNEZ-SÁNCHEZ, Monserrat; STOLL, Heather; VADILLO, Iñaki; LÓPEZ-CHICANO, Manolo; DOMÍNGUEZ-CUESTA, María; MARTÍN-ROSALES, Wenceslao; MELÉNDEZ-ASENSIO, Mónica. Groundwater contamination in caves: four case studies in Spain. *International Journal of Speleology*, v. 37, n. 1, p. 53-66, 2008.

KAÇAROGLU, Fikret. Review of groundwater pollution and protection in karst areas. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 113, p. 337-356, 1999.

SAMPAIO, Silvio Cesar; SILVESTRO, Marciane G.; FRIGO, Elisandro Pires; BORGES, Cristiane M. Relação entre série de sólidos e condutividade elétrica em diferentes águas residuárias. *Irriga*, Botucatu, v. 12, n. 4, p. 557-562, 2007.

CARDOSO, M. R. D.; MARCUZZO, F. F. N.; RAMALHO, J. R. Classificação climática de Köppen-Geiger para o estado de Goiás e o Distrito Federal. *Acta Geográfica*, Boa Vista, v. 8, n. 16, p. 40–55, 2014. DOI: 10.18227/2177-4307.acta.v8i16.1384.

HAMMER, Ø.; HARPER, D.A.T.; RYAN, P.D., 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, v. 4, n. 1, 9 pp. Disponível em: http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm.

NOGUEIRA, Adivane Morais; CALDEIRA, Dandara; UAGODA, Rogério; MENDES, Leonardo Chaves. Sedimentary Records in Karstic Dry Valleys: Mambaí, Central Brazil. *SSRN Electronic Journal*, 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4261942.

SILVA-TAVARES, André; AYER, Joaquim Ernesto Bernardes; UAGODA, Rogério Elias Soares. Hydro-sedimentological interactions between a tropical fluviokarst system and surface waters in the Brazilian Savannah. *Catena*, v. 254, 108966, 2025. DOI: 10.1016/j.catena.2025.108966.

FARIA, Karla Maria Silva de; SILVA, Edson Vicente da. Dinâmica das paisagens antropogênicas na microrregião do Vão do Paranã (GO). *Revista Geográfica Acadêmica*, v. 14, n. 2, p. 141–152, 2020. DOI: 10.18227/1678-7226rga.v14i2.6905.

MEIRELLES, E. M. L., FERREIRA, E. A. B., & TOKARSKI, D. J. (2007). Caracterização regional. Em: BRASIL. E. W. (Ed.). Bacia Hidrográfica do Alto Tocantins Retatos e Reflexões. p. 102.

CARNEIRO, Ana Flávia Soares; FARIA, Karla Maria Silva de; ROSA, Lucas Espíndola. Perda de solos em bacias hidrográficas da microrregião do Vão do Paranã – GO. *Boletim de Geografia*, v. 39, e61356, p. 440-458, 2022.

ZANATTO, Vinícius Galvão; SILVA, Bárbara Costa; SILVA, Wallace Vieira da; MENDES, Venícius Juvêncio de Miranda; STEINKE, Valdir. Avaliação rápida de impactos em cavernas turísticas do Parque Estadual de Terra Ronca, Goiás, Brasil. *Physis Terrae*, v. 1, n. 2, p. 83-100, 2019.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E ANÁLISE ESTATÍSTICA DE POÇOS NO CARIRI OCIDENTAL PARAIBANO

1 Francisco de Assis da Silveira Gonzaga, 2 Lázaro Nobrega Farias, 3 Edmilson Dantas da Silva Filho, 4 Pedro Lucas Nunes da Silveira

1 IFPB campus Campina Grande, e-mail: franciscoagonzaga@hotmail.com; 2 IFPB campus Campina Grande, e-mail: lazaro.nobrega@academico.ifpb.edu.br; 3 IFPB campus Campina Grande, e-mail:edmilson.silva@ifpb.edu.br; 4 IFPB campus Princesa Isabel, e-mail: Pedro.lucas@ifpb.edu.br

Palavras-chave: Aquíferos fissurais; Qualidade da água subterrânea; Semiárido Paraibano.

Introdução

As rochas cristalinas compõem extensos cinturões pré-cambrianos em diversas regiões do mundo. No Brasil, essas formações geológicas são de grande importância hidrogeológica, especialmente no Nordeste e Sudeste. No Nordeste, a disponibilidade hídrica é limitada devido ao clima semiárido, que impede o desenvolvimento de um manto de intemperismo espesso para a formação de aquíferos. Já no Sudeste, a exploração intensiva da água subterrânea para abastecimento urbano e industrial impacta a disponibilidade do recurso (NEVES, 2005).

A captação de água subterrânea em aquíferos fraturados tem ganhado destaque nas últimas décadas, apesar de sua baixa permeabilidade e da complexidade na perfuração de poços. Historicamente, esses aquíferos foram subestimados, mas a crescente demanda hídrica tem impulsionado pesquisas sobre seu potencial para o abastecimento rural e urbano (NEVES, 2005). Os aquíferos fissurais, típicos de rochas cristalinas, armazenam e conduzem água por meio de fraturas e descontinuidades estruturais. Por serem sistemas heterogêneos e anisotrópicos, suas propriedades hidráulicas variam significativamente. A condutividade hidráulica depende diretamente do grau de fraturamento da rocha, e a porosidade secundária não se distribui uniformemente, dificultando a previsão da explotação sustentável desses aquíferos (GONZAGA, 2011).

Na região semiárida do Cariri Ocidental Paraibano, a perfuração de poços tubulares tem sido uma alternativa essencial para suprir a demanda hídrica da população rural, onde o abastecimento convencional é frequentemente insuficiente. No entanto, a intensificação da explotação e a contaminação decorrente de atividades antrópicas tornam imprescindível o monitoramento da qualidade da água subterrânea (GOMES, 2005).

Neste contexto, este estudo tem como objetivo analisar a qualidade físico-química das águas subterrâneas de poços tubulares na região do Cariri Ocidental Paraibano, com foco nos parâmetros de cloretos, dureza, sólidos totais dissolvidos (STD) e condutividade elétrica. Além disso, busca-se compreender a influência da mineralogia das rochas encaixantes na composição dessas águas, contribuindo para um diagnóstico hidroquímico da região e para o planejamento sustentável dos recursos hídricos locais.

Materiais e Métodos

Simplificadamente, a região do cariri ocidental paraibano (Figura 1), apresenta geologia caracterizada pela majoritária presença de granada-biotita-xisto, onde são comumente observados veios quartzo feldspáticos remobilizados e diques pegmatíticos intensamente boudinados devido a tectônica regional (Figura 2). Estão inseridos nesta formação granitoides indiscriminados e biotita-hornblenda-piroxênio-alcalifeldspato granito/sienito, representantes da Suíte Trinfo. Estas unidades são limitadas pelo Complexo Serrinha-Pedro Velho, representado por ortognaisses de composição variando de tonalítico-trondhjemítico à granítico migmatizado, além de migmatitos datados do Paleoproterozóico (Beltrão et al. 2005).

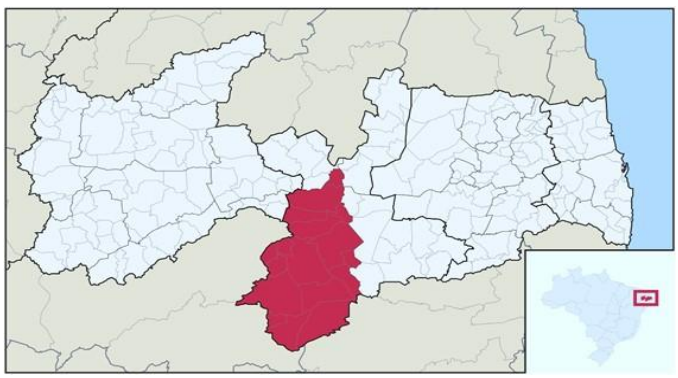


Figura 1 – Mapa de localização do Cariri Ocidental Paraibano.
Fonte: Governo da Paraíba (2016)

Diferente dos aquíferos granulares, que apresentam porosidade associada aos vazios entre os grãos, os aquíferos fissurais apresentam padrão de armazenamento de água apenas em fraturas, fendas e/ou foliações distribuídas ao longo do corpo rochoso (Gonzaga, 2011). As rochas cristalinas da região de estudo podem ser divididas quanto sua composição química e mineralógica como ácidas e básicas (Figura 2). As rochas de caráter ácido, apresentam predominantemente minerais com maiores teores de Sílica (SiO2), K e Al. Enquanto as rochas básicas são caracterizadas pela predominância em minerais compostos por Fe, Mg e Ca. Essas diferenças químicas e mineralógicas conferem comportamentos reológicos distintos para esses dois grupos de rochas. Consequentemente, as diferenças no padrão de deformação irão refletir no grau de porosidade secundária e na qualidade da água destes aquíferos (Singhal & Gupta, 2010).

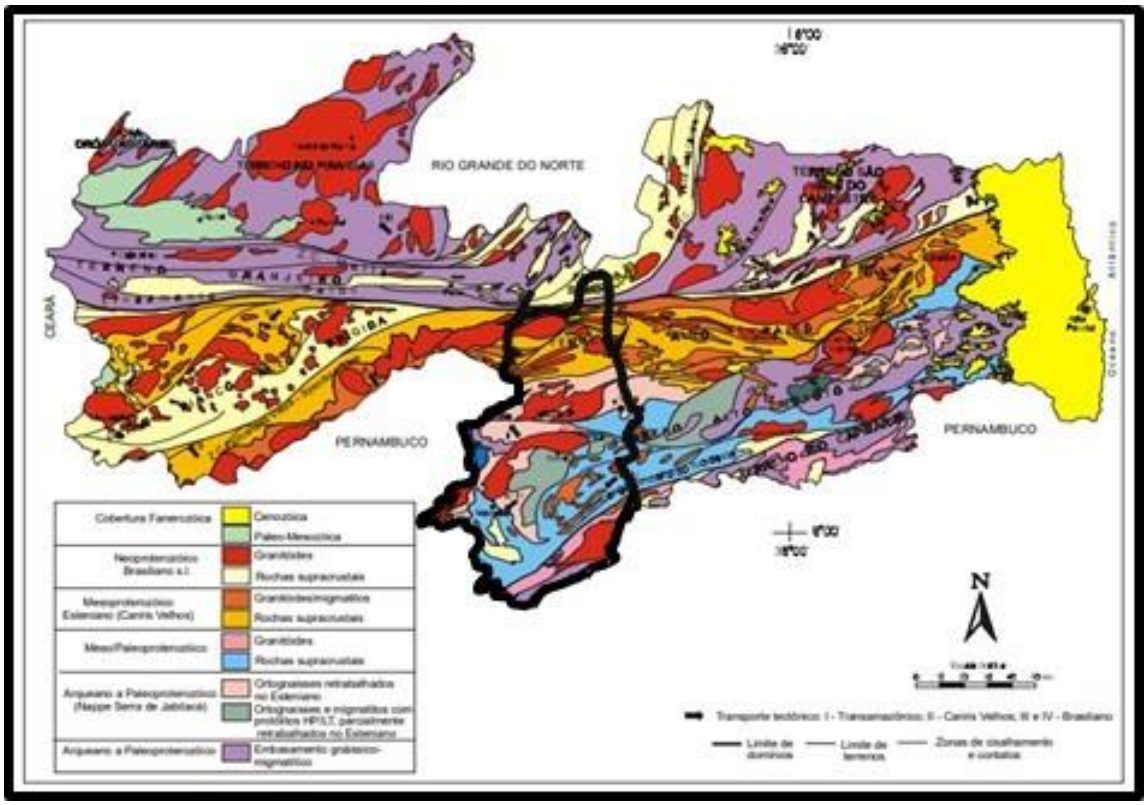


Figura 2 – Mapa Geológico da região do Cariri Ocidental Paraibano.
Fonte: CPRM (2002). Contorno aproximado.

A seleção dos pontos de amostragem foi realizada com base em levantamento bibliográfico e dados geológicos, buscando representar as diferentes litologias presentes na área de estudo. Foram considerados aspectos como profundidade do lençol freático, uso do solo, atividades antrópicas e proximidade de potenciais fontes de contaminação.

As amostras de água subterrânea foram coletadas durante visitas técnicas, com registro das coordenadas geográficas e da profundidade de amostragem de cada poço. Posteriormente, foram realizadas análises físico-químicas para determinação da condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais, concentração de íons cloreto e dureza total. As análises seguiram as metodologias estabelecidas pela American Public Health Association (APHA, 1998), utilizando métodos titulométricos e de imersão direta.

Adicionalmente, foram aplicadas análises estatísticas com o objetivo de avaliar as relações entre os parâmetros físico-químicos e as características litológicas dos municípios estudados. Foram utilizadas estatísticas descritivas e inferenciais, incluindo testes de normalidade e correlações de Pearson, conforme a distribuição dos dados, permitindo uma interpretação mais robusta dos resultados obtidos.

Resultados e Discussão

A partir dos resultados das análises físico-químicas, foram realizados testes estatísticos para avaliar a distribuição dos dados e a existência de diferenças significativas entre os municípios estudados. O teste de Shapiro-Wilk foi empregado para verificar a normalidade dos dados, e análises descritivas foram conduzidas para caracterizar os parâmetros avaliados em cada localidade (Tabela 1).

Parâmetro	Cidade	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	W	p
Condutividade Elétrica	Sumé	4	2051	1321	1649,8	1064	4500	0,732	0,026
	Prata	3	1087	1077	358,4	734	1450	0,999	0,955
	Ouro Velho	3	742	765	52	683	779	0,859	0,265
STD	Sumé	4	1100	798	792,6	531	2274	0,765	0,053
	Prata	3	545	542	179,8	367	726	1.000	0,971
	Ouro Velho	3	372	384	26,4	341	390	0,836	0,203
Cloreto	Sumé	4	808	445	796,8	340	2000	0,693	0,01
	Prata	3	324	321	106,5	219	432	0,999	0,953
	Ouro Velho	3	221	228	15,1	204	232	0,855	0,253
Dureza	Sumé	4	413	262	349	197	933	0,733	0,027
	Prata	3	300	350	180,3	100	450	0,942	0,537
	Ouro Velho	3	163	140	40,4	140	210	0,75	<,001

Tabela 1. Estatísticas descritivas dos parâmetros analisados.

O teste de Shapiro-Wilk indicou que algumas variáveis não seguem uma distribuição normal ($p < 0,05$), sendo elas: Condutividade Elétrica (Sumé), Cloreto (Sumé) e Dureza (Sumé e Ouro Velho). Dessa forma, análises comparativas entre os municípios devem considerar testes não paramétricos.

Observou-se também que o comportamento da normalidade variou entre os municípios. Em Sumé, os parâmetros apresentaram maior variabilidade e tendência a não normalidade, sugerindo uma possível heterogeneidade nas condições ambientais ou nos fatores de contaminação locais. Em Prata, a maioria dos dados seguiu uma distribuição normal, indicando uma relativa estabilidade nos parâmetros analisados. Já em Ouro Velho, os resultados mostraram uma tendência intermediária, com alguns parâmetros normais e outros não, o que pode indicar condições ambientais de transição entre as características observadas em Sumé e Prata.

Os dados indicam que a cidade de Sumé apresentou os maiores valores médios para Condutividade Elétrica (2051 µS/cm) e Cloreto (808 mg/L), além de maior dispersão nos resultados. Esses valores sugerem uma variação considerável na qualidade da água, possivelmente associada a fatores ambientais ou antrópicos locais.

A cidade de Prata apresentou valores intermediários, com menor variabilidade nos dados, enquanto Ouro Velho apresentou os menores valores médios para todos os parâmetros analisados, com menor dispersão.

Os resultados sugerem que há variações espaciais importantes na qualidade da água entre os municípios estudados, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo e de investigações adicionais para identificar possíveis fontes de contaminação e variações geológicas ou climáticas que possam influenciar os parâmetros analisados.

Além disso, foi construída uma matriz de correlações entre os parâmetros analisados, apresentada na Tabela 2. Essa matriz permite avaliar as relações entre as variáveis e identificar possíveis associações entre elas.

	Condutividade Elétrica	STD	Cloreto	Dureza
Condutividade Elétrica	——			
STD	0,989	——		
Cloreto	0,994	0,990	——	
Dureza	0,961	0,941	0,941	——

Tabela 2. Matriz de Correlações

A Tabela 2 apresenta a matriz de correlações entre os parâmetros físico-químicos analisados. Observa-se que todas as variáveis apresentam correlações positivas e elevadas entre si, com coeficientes superiores a 0,94. A condutividade elétrica apresentou forte correlação com os demais parâmetros, especialmente com o cloreto (r = 0,994) e o STD (r = 0,989), indicando que esses parâmetros podem estar influenciados por fatores semelhantes. A dureza também demonstrou correlação significativa com as demais variáveis, sugerindo uma possível relação com a composição mineralógica da água.

Considerações Finais

A análise da qualidade da água subterrânea na região do Cariri Ocidental Paraibano revelou variações significativas entre os municípios estudados, evidenciando a influência da geologia local na composição hidroquímica. A alta condutividade elétrica e os elevados teores de cloretos observados em algumas localidades sugerem possíveis processos de dissolução mineral e influências antrópicas, enquanto as diferenças na dureza da água indicam a diversidade litológica da região. Além disso, a forte correlação entre os parâmetros físico-químicos analisados demonstra que fatores ambientais e geológicos desempenham um papel essencial na qualidade da água subterrânea.

Esses resultados reforçam a necessidade de monitoramento contínuo, especialmente em áreas com maior vulnerabilidade à contaminação e salinização. Para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos na região, recomenda-se a adoção de medidas como a proteção das áreas de recarga, o controle da perfuração de poços e a implementação de programas de dessalinização e tratamento da água, assegurando o abastecimento adequado para a população local.

Agradecimentos

Os Autores agradecem ao Instituto Federal da Paraíba pelo apoio prestado no desenvolvimento da pesquisa.

Referências Bibliográficas

APHA (1998) - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 20th ed. Washington.

BELTRÃO B.A. et al. (2005) - Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea

Estado da Paraíba: Diagnóstico do município de Amparo. CPRM. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/15788/1/Rel_Amparo.pdf. Acesso em: 07 mar. 2026.

CPRM – SANTOS, E.J.; FERREIRA, C.A.; SILVA JR, J.M.F. (2002) - Geologia e Recursos Minerais do Estado da Paraíba, [map]. 1:500 000. In: CPRM, Recife, p. 233.

FEITOSA, F. A. C e DINIZ, J. A. O. (2011) - Água subterrânea no cristalino da região semiárida brasileira. II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, São Paulo, SP, 2011. Disponível em: https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28026/18153. Acesso em: 27 jan 2026.

GOMES, J. L. (2005) - Panorama da Qualidade das Águas Subterrâneas no Brasil.

GONZAGA, F. A. S. (2011) - Uma Metodologia Para Determinação da Vazão de Explotação em Poços do Sistema Aquífero Cristalino no Cariri Paraibano. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande.

GOVERNOR DA PARAÍBA (2016) - Projeto PROCASE: Projeto de Desenvolvimento Sustentável do Cariri, Seridó e Curimataú.

JARDIM DE SÁ, E. F. et al. (2008) - Conceitos de análises estrutural aplicados à hidrogeologia de terrenos cristalinos. In: Hidrogeologia conceitos e aplicações. CPRM, 3ª Ed. Revisada e ampliada. Rio de Janeiro, RJ. 2008, 835 p.

NEVES, M. A. (2005) - Análise Integrada Aplicada à Exploração de Água Subterrânea na Bacia do Rio Jundiaí (SP). Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geologia Regional. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP.

SINGHAL, B. B. S.; GUPTA, R.P. (2010) - Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. Springer Science + Business Media B.V. DOI 10.1007/987-90-481-8799-7_8.

RESULTADOS DE SEIS TESTES DE CAMPO IN SITU PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA IMPACTADA POR PFAS

1 Bruno Vanderlinde Damasio, 2 Rick McGregor, 3 Débora Vieira Bueno
1 Aquífero Serviços de Remediação, e-mail: brunod@aquiferoservicos.com.br; 2 Aquífero Serviços de Remediação, e-mail rickm@irsl.ca; 3 Aquífero Serviços de Remediação, e-mail: deborab@aquiferoservicos.com.br

Palavras-chave: PFAS; carvão ativado coloidal; BRP

Introdução

As substâncias per- e polifluoroalquil (PFAS) foram identificadas por muitas agências regulatórias como contaminantes emergentes de interesse ambiental em diversos meios, incluindo as águas subterrâneas. Atualmente, existem poucas tecnologias disponíveis para tratar os PFAS em águas subterrâneas, com a abordagem frequentemente mais utilizada sendo a extração (ou seja, bombeamento e tratamento). Embora essa abordagem possa ser eficaz na contenção de plumas de PFAS, estudos anteriores sobre programa de bombeamento e tratamento tiveram sucesso de remediação limitado. Os estudos de tratamento in situ de PFAS têm se limitado a estudos de laboratório e a alguns estudos de campo. Foram realizados seis estudos de campo em escala piloto em um aquífero de areia não confinado, que foi contaminado por hidrocarbonetos de petróleo e PFAS, para determinar se uma variedade de reagentes poderia ser utilizada para atenuar os PFAS em fase dissolvida na presença de hidrocarbonetos de petróleo. Os seis reagentes consistiram em dois oxidantes químicos, sendo peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e persulfato de sódio ($Na_2S_2O_8$), e quatro adsorventes, sendo utilizados carvão ativado em pó (CAP), carvão ativado coloidal (CAC), resina de troca iônica (RTI) e biocarvão (*biochar*).

Testes laboratoriais e revisões da literatura sobre o tratamento in situ da água subterrânea contaminada por PFAS têm avaliado inúmeros reagentes, incluindo oxidantes químicos e meios de adsorção. Os resultados desses testes sugerem que os meios baseados em sorção podem ser eficazes em tratar os PFAS e, por outro lado, os oxidantes em baixas temperaturas e pressão apresentaram limitações no tratamento de PFAS. O estudo foi conduzido utilizando esses reagentes em um site para avaliar a eficácia na utilização de oxidantes e adsorventes em um aquífero de areia siltosa contaminado por concentrações moderadas de vários PFAS. Seis reagentes foram injetados utilizando *Direct Push Technology* (DPT), com um reagente sendo aplicado em cada BRP, e então monitorados ao longo de um período de 18 meses.

Metodologia

Seis barreiras reativas permeáveis (BRPs) foram implementadas em um aquífero de areia siltosa, no qual o lençol freático estava a aproximadamente 0,9 metros abaixo da superfície do solo. Foi determinado que a pluma de PFAS estava localizada entre 0,9 e 1,8 metros abaixo da superfície do solo, por meio de monitoramento multinível de alta definição. As condições geoquímicas no aquífero foram caracterizadas como redutoras de ferro e sulfato, com concentrações de até 5.800 µg/L de PHCs incluindo faixas de gasolina, e aditivos como o MTBE e TBA, juntamente com os PFAS.

Em toda a extensão da pluma, foram instalados poços de monitoramento para realizar as coletas de amostras de água subterrânea antes e após as injeções. Foram monitorados uma variedade de parâmetros orgânicos e inorgânicos incluindo pH, ORP, cloretos, sulfatos, nitratos, ferro e manganês totais e dissolvidos, juntamente com vários PFAS, incluindo PFOA, PFOX, PFBS, PFHxS, PFDS, PFOSA, PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFNA, PFDA, PFUnA e PFDoA, e hidrocarbonetos de petróleo. Foram realizadas análises isotópicas de compostos específicos e microbiológicas de sequenciamento de próxima geração em amostras selecionadas.

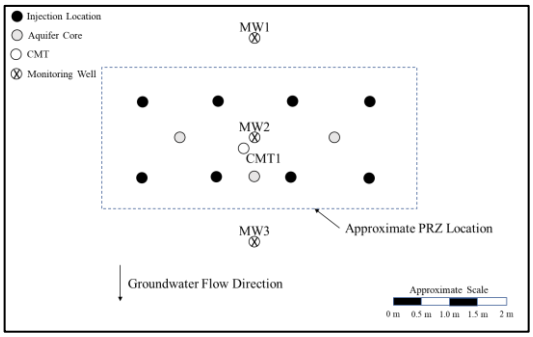


Figura 01: *Layout* das BRPs mostrando os poços de monitoramento (MW) e CMT, e os pontos de amostragens e injeções. Fonte: McGregor, 2020

Os reagentes foram diluídos em água potável e injetados utilizando *Direct Push Technology* (DPT), durante 2 dias em 8 pontos de injeção em cada BRP (Figura 1), com pressões até 25 psi para os reagentes dissolvidos e até 225 psi para os reagentes particulados.

Resultados e Discussão

Os resultados das seis BRPs sugerem que os oxidantes químicos (peróxido de hidrogênio e persulfato de sódio ativado), não foram eficazes em atenuar os compostos PFAS analisados, apresentando mínima ou nenhuma redução das concentrações. Os resultados dessas BRPs baseadas em sorção indicaram que a redução das concentrações de PFAS ocorreu nas BRPs onde foram injetados todos os adsorventes, demonstrando o melhor desempenho de tratamento nos primeiros 90 dias. Entretanto, após 90 dias as BRPs com biocarvão e CAP demonstraram aumento das concentrações dos PFAS sendo monitorados (Figuras 2 e 3). A BRP composta de RTI demonstrou o aumento das concentrações de PFAS após 180 dias (Figura 3). Análises dos sólidos dos aquíferos para a condutividade hidráulica indicaram que lentes de areia estavam presentes no aquífero, cuja condutividade hidráulica era aproximadamente 50 vezes maior que os materiais circundantes no aquífero. Além disso, análises físicas e químicas dos sólidos do aquífero indicaram que os reagentes se acumularam preferencialmente nessas lentes de areia (Figuras 6 a 8). Com base nessas medições e análises, levanta-se a hipótese de que as partículas de tamanho maior do biocarvão, CAP e RTI resultaram na má distribuição dos reagentes, resultando, portanto, no tratamento incompleto e preferencial dos PFAS. Os resultados da BRP de CAC indicaram a remoção completa dos PFAS ao longo do período de monitoramento de 18 meses em níveis abaixo do método dos limites de detecção analítico (10 ng/L) em todas as amostras de água subterrânea coletadas após as injeções.

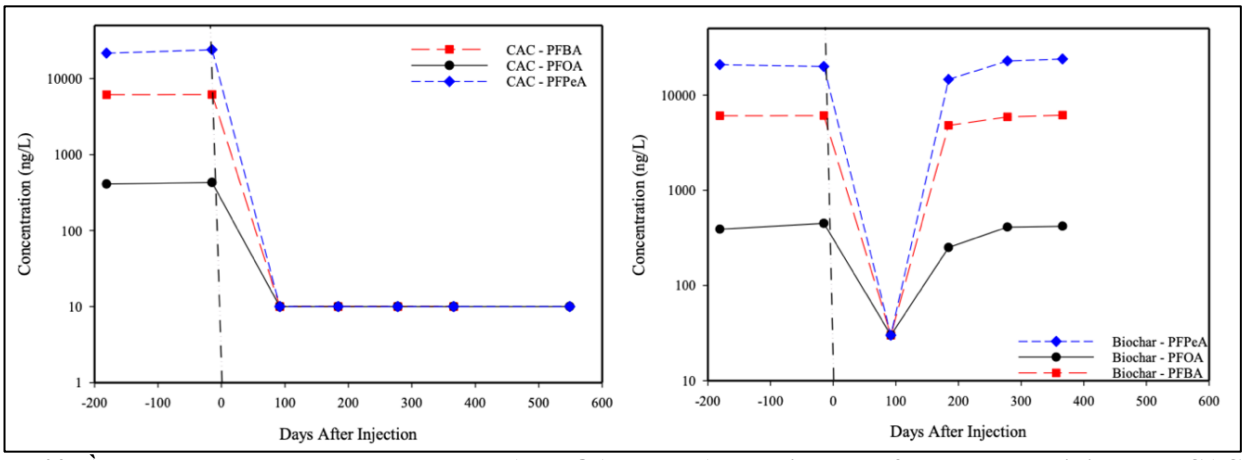


Figura 02: À esquerda, as concentrações de PFBA, PFOA e PFPeA reduziram em 3 meses após a injeção de CAC. Os resultados demonstram que todos os PFAS analisados estavam em níveis abaixo dos limites de detecção analíticos nos primeiros 1,5 anos de monitoramento. À direita, as concentrações desses PFAS aumentaram entre 6 e 9 meses após a injeção de biocarvão.
Fonte: McGregor, 2020

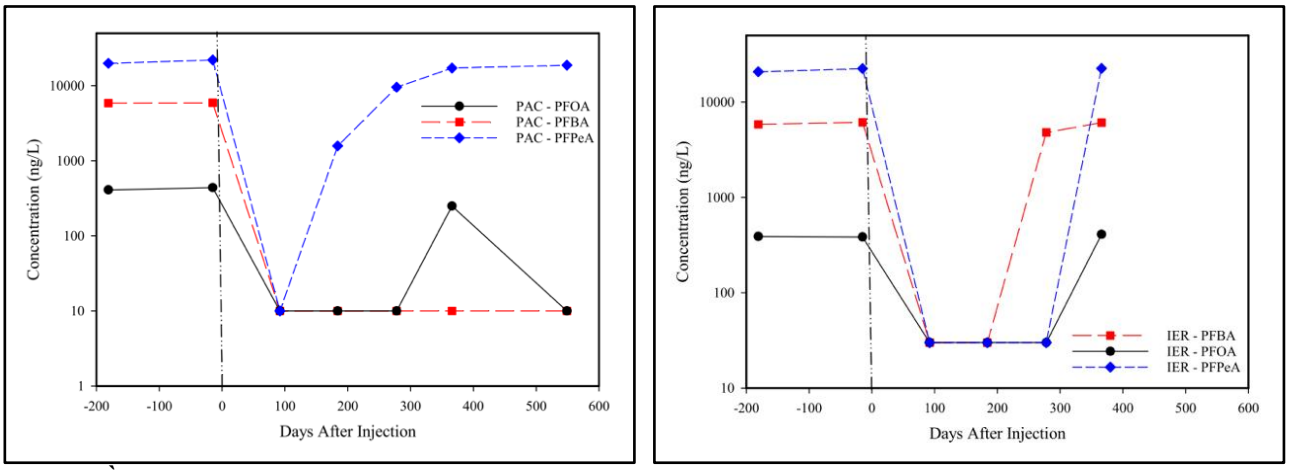


Figura 03: À esquerda, as concentrações dos PFAS selecionados ao longo do tempo nas amostras de água subterrânea coletadas da BRP de CAP. À direita, as concentrações desses PFAS nas amostras de água subterrânea coletadas da BRP de RTI.
Fonte: McGregor, 2020

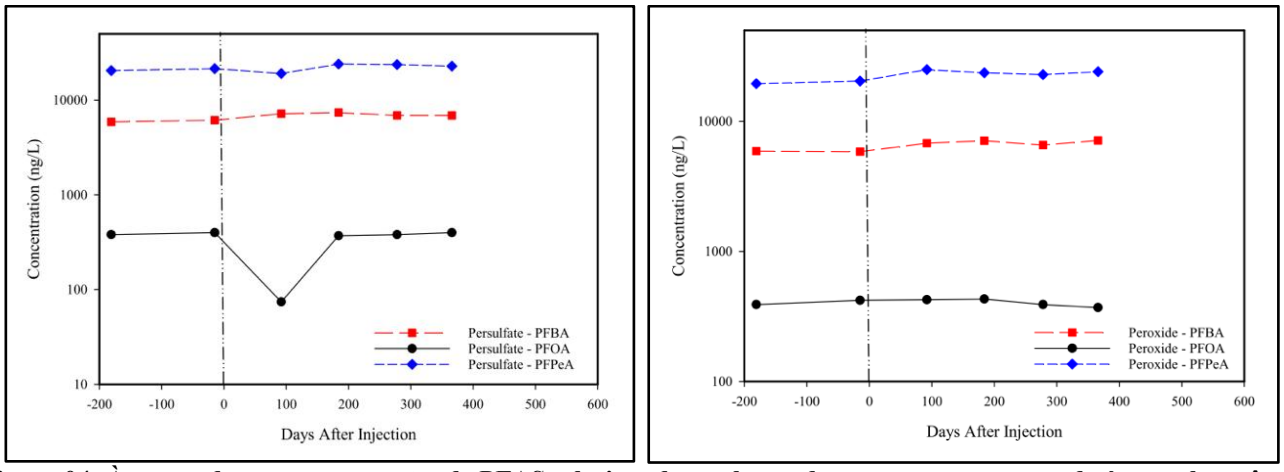


Figura 04: À esquerda, as concentrações de PFAS selecionados ao longo do tempo nas amostras de água subterrânea coletadas da BRP de persulfato de sódio, enquanto o gráfico à direita mostra os PFAS selecionados ao longo do tempo nas amostras de água subterrânea coletadas da BRP de peróxido de hidrogênio.
Fonte: McGregor, 2020

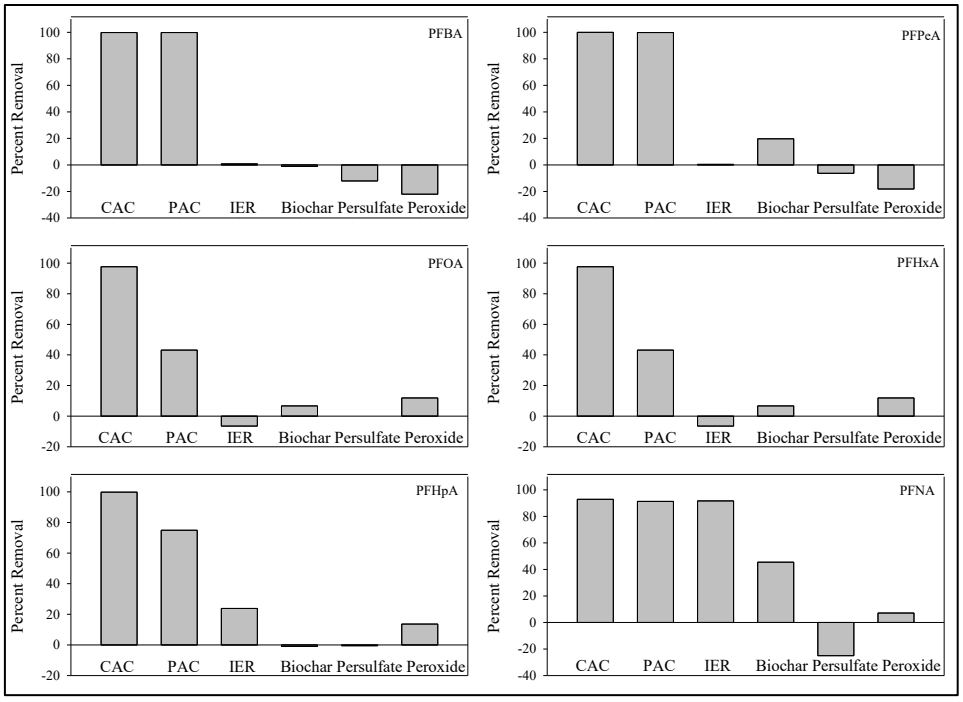


Figura 05: Percentual da redução das concentrações de PFAS após 366 dias de tratamento nas 6 BRPs.
Fonte: McGregor, 2020

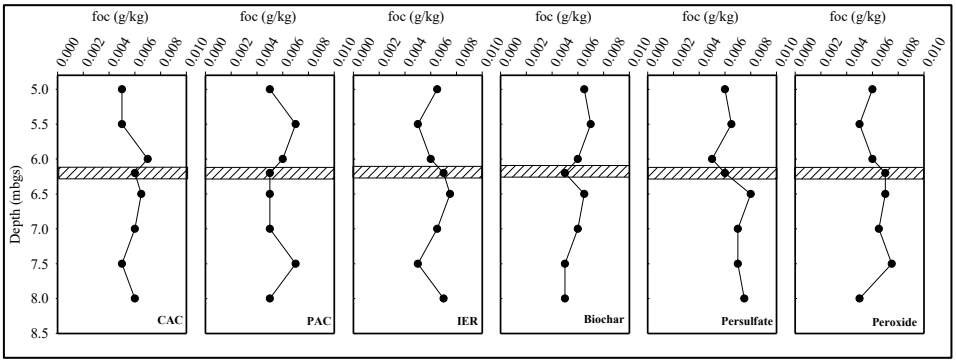


Figura 06: Perfis dos TOCs dos sólidos obtidos por sondagens realizadas no aquífero em cada BRP antes das injeções. As áreas hachuradas representam a camada de areia grossa.
Fonte: McGregor, 2020

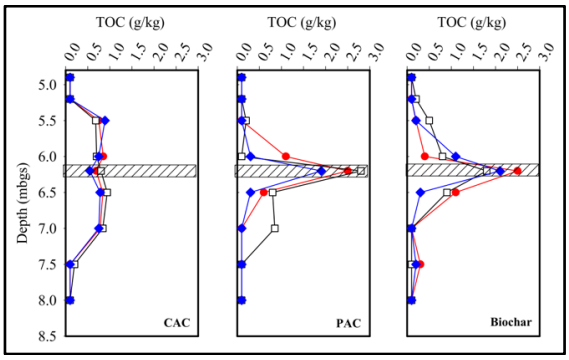


Figura 07: Perfis de concentração de carbono orgânico total (TOC) nos sólidos dos aquíferos, de sondagens coletadas das BRPs de CAC, CAP e biocarvão, após as injeções. Os círculos vermelhos (●) representam os resultados da Sondagem 1, os quadrados brancos (□) da Sondagem 2, e os quadrados azuis (■) da Sondagem 3. As áreas hachuradas representam a camada de areia grossa.
Fonte: McGregor, 2020

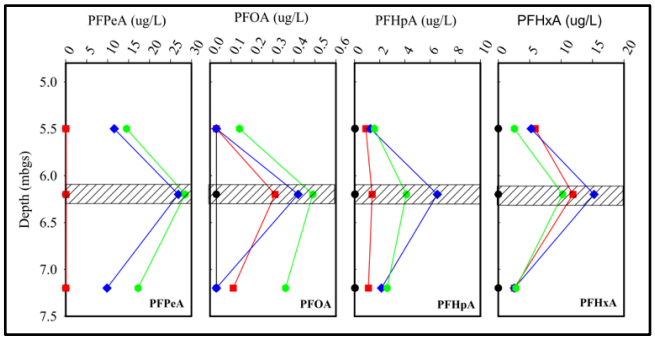


Figura 08: Concentrações de PFAS dissolvidas por profundidade após 366 dias. Os quadrados vermelhos (■) representam os PFAS na BRP com CAP, os diamantes azuis (◆) os PFAS na BRP com biocarvão, os hexágonos verdes (⬢) os PFAS na BRP de RTI, e os círculos pretos (●) os PFAS na BRP com CAC. As áreas hachuradas representam a camada de areia grossa.
Fonte: McGregor, 2020

Considerações Finais

Os resultados a curto e longo prazo dessa aplicação de CAC na pluma combinada de PHC e PFAS, sugerem que o CAC está sendo um meio de tratamento eficaz tanto para baixas como altas concentrações em fase dissolvida de PFOS, PFOA e outros PFAS durante um período de 6 anos. Resultados da distribuição de CAC após as injeções indicam que a distribuição foi eficaz nas zonas-alvo, aumentando as concentrações de carbono orgânico total (TOC) em pelo menos duas ordens de grandeza em comparação com as concentrações de TOC antes das injeções.

Agradecimentos

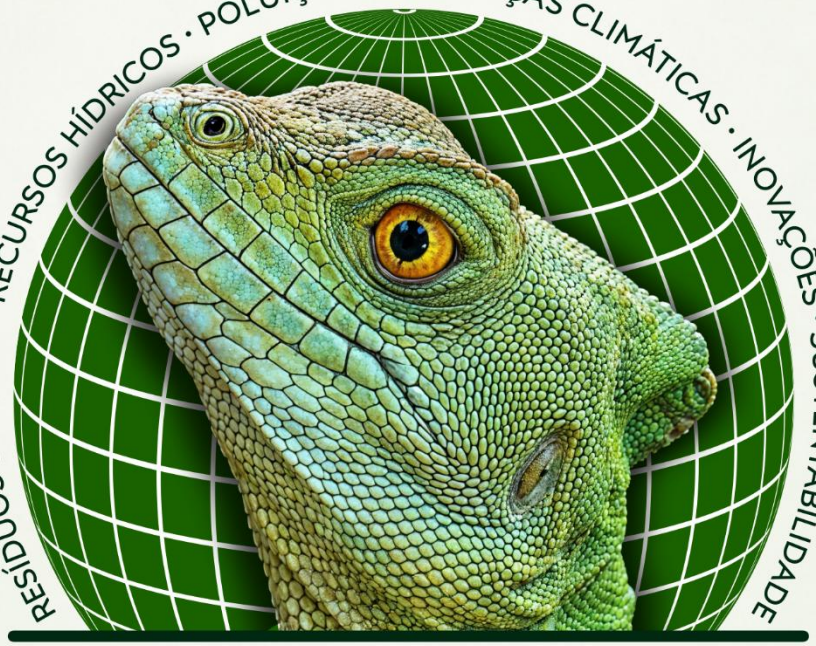
Os autores gostariam de agradecer aos Grupos de Pesquisa de PFAS da Porewater Solutions, da Universidade de Waterloo, da Carleton University, da Universidade de Toronto, a Regenesis Remediation Solutions pelo seu apoio e incentivo, e os financiamentos dos governos de Canadá e Ontário.

Referências Bibliográficas

McGregor, R. **Six pilot-scale studies evaluating the in situ treatment of PFAS in groundwater**. *Remediation*. 2020;30:39–50. Disponível em: https://doi.org/10.1002/rem.21653.

ÁREA TEMÁTICA 4

DESASTRES NATURAIS



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À INUNDAÇÃO NO MUNICÍPIO DE PITANGA-PR

1 Felipe Foleto Braz, 2 Dimaghi Schwamback
1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Guarapuava, e-mail: brazfelipefoleto@gmail.com;
2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Guarapuava; Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental - PPGCTA; e-mail: dimaghis@professores.utfpr.edu.br

Palavras-chave: Inundação; geoprocessamento; gestão de riscos.

Introdução

Inegavelmente, a água é um dos elementos mais importantes no contexto urbano, de modo que, historicamente, os primeiros núcleos urbanos se consolidaram próximos a rios e outros corpos d'água, em razão da dependência desses recursos para atividades essenciais, como consumo humano, abastecimento, agricultura, transporte e desenvolvimento econômico (Rezende e Araujo, 2016). No entanto, esse fato propicia maior suscetibilidade a alagamentos e inundações em determinadas regiões dessas cidades durante eventos naturais de chuvas intensas e cheias de rios. Essas ocorrências decorrem tanto das oscilações naturais do regime hidrológico quanto de intervenções antrópicas que tendem a intensificá-las, como o desmatamento, a poluição e a ocupação irregular de áreas ribeirinhas. Ainda assim, é fundamental reconhecer que parte significativa desses eventos está relacionada ao próprio funcionamento natural da Terra, um sistema dinâmico, sujeito a transformações climáticas e geológicas desde sua formação (Navarro, 2004).

As inundações podem ser descritas como eventos que ocorrem quando precipitações intensas superam a capacidade de escoamento dos cursos d'água, ocasionando o extravasamento da água para áreas adjacentes (Villela e Mattos, 1975). Enquanto esse fenômeno decorre de ocorrências meteorológicas e hidrológicas excepcionais, os alagamentos caracterizam-se pelo acúmulo temporário de água em áreas específicas, resultante da insuficiência ou ineficiência dos sistemas de drenagem (Ferraz *et al.*, 2022).

Nesse contexto, o município de Pitanga, localizado na região central do estado do Paraná, enfrenta constantemente problemas relacionados a alagamentos e inundações em áreas relevantes de sua zona urbana (ver Figura 1). O primeiro registro de enchente no município data de 1987, sendo que esses eventos passaram a se tornar mais frequentes, sobretudo após 2009, essa mudança está atrelada ao aumento do volume e intensidade da precipitação atrelado a falta de um planejamento urbano e ambiental eficiente (Gonçalves *et al.*, 2022).



Figura 1: Registros fotográficos de inundações em Pitanga.
Fonte: Gonçalves *et al.* (2022).

Apesar de tais eventos serem de difícil previsão, as áreas com maior probabilidade de ocorrência podem ser identificadas, possibilitando seu mapeamento e a aplicação de investimentos públicos, com o intuito de reduzir perdas humanas e materiais. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo construir um mapa das áreas urbanas mais suscetíveis a processos de inundação por meio de técnicas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) integradas à análise das características geomorfológicas do município de Pitanga-PR.

Área de Estudo

O presente estudo tem como foco o município de Pitanga–PR, que possui extensão territorial de 1.693,402 km² (IBGE, 2024) e população estimada em 33.567 habitantes (IBGE, 2022). O município apresenta Produto Interno Bruto (PIB) per capita anual de R$ 43.017,52 (IBGE, 2023) e Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) de 0,702 (IBGE, 2010). A área urbanizada corresponde a 10,02 km² (IBGE, 2019), estando o território inserido no bioma Mata Atlântica (IBGE, 2024). A cidade

é banhada por dois rios: o Rio Pitanga, de porte mediano, e o Rio Ernesto, de pequeno porte, cuja desembocadura ocorre no Rio Pitanga (Gonçalves et al., 2022). A topografia da área em estudo varia de 831 m a 1.174 m, apresentando amplitude altimétrica de 343 m, o que indica relevo fortemente ondulado. A zona urbana localiza-se, em sua maior parte, em áreas de menor altitude.

A área total de uso e ocupação recortada para estudo é de 81,53 km², dos quais a cultura da soja corresponde à maior parcela de uso do solo, com 29,65 km², seguida pelo mosaico de usos, com 19,87 km², e pela formação florestal, com 18,51 km². A área urbana e outras áreas não vegetadas totalizam 8,44 km². Esses dados evidenciam que parcela significativa do território é destinada a atividades agropecuárias, resultando na redução da cobertura vegetal nativa, que atualmente corresponde a apenas 22,7% da área total.

O município apresenta recorrentes episódios de inundação, os quais ocasionam impactos relevantes sobre a infraestrutura urbana e a qualidade de vida da população. Em 2023, aproximadamente 447 pessoas foram desalojadas, além do registro de danos estruturais em pontes, algumas das quais foram arrastadas pelas enxurradas (G1, 2023). De acordo com o Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA, 2023), cerca de 517 domicílios encontram-se situados em áreas com risco de inundação, o que corresponde a 5,9% do total de domicílios. Nos cinco anos anteriores à pesquisa, foram contabilizados 503 registros de inundação, enxurrada ou alagamento. Esses dados evidenciam a vulnerabilidade da área urbana frente a eventos hidrometeorológicos extremos.

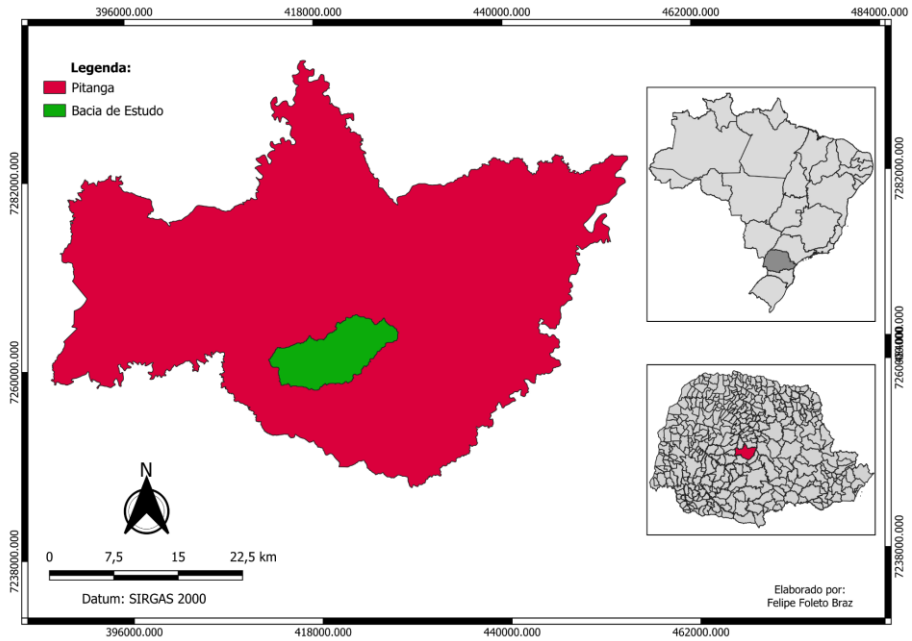


Figura 2: Localização da área de estudo.
Fonte: Autoria própria.

Procedimentos Metodológicos

Para a realização deste trabalho, foi utilizada a ferramenta Quantum GIS (QGIS), que, segundo Souza *et al.* (2021), além de ser uma plataforma livre, possibilita a execução automatizada das análises espaciais e a obtenção rápida de informações do meio físico, configurando-se como um software eficiente para estudos ambientais.

Inicialmente, foram inseridas as camadas referentes aos limites territoriais em nível federal, estadual e municipal. Em seguida, foram adicionados às bases temáticas de uso e ocupação do solo, pedologia e o Modelo Digital de Elevação (MDE) do município de Pitanga. As informações de uso e ocupação do solo foram obtidas a partir da base MapBiomas (2024), enquanto o MDE foi adquirido junto à Embrapa, com articulação compatível à escala 1:250.000 (IBGE), adequada para análises em escala municipal. A partir do MDE, foram geradas as camadas derivadas de altitude e declividade.

Posteriormente, realizou-se a delimitação da bacia hidrográfica que abrange a zona urbana do município, com o objetivo de identificar a área de contribuição associada às inundações registradas na cidade. Conforme Costa, Souza e Silva (2016), a bacia hidrográfica constitui uma unidade ideal de planejamento ambiental, uma vez que seus limites naturais são relativamente estáveis e permitem o acompanhamento das transformações decorrentes da ação antrópica e dos processos naturais, favorecendo o controle do uso do solo e dos recursos hídricos. Dessa forma, a delimitação da bacia possibilitou uma análise mais direcionada à área urbana, contribuindo para maior precisão na identificação das zonas suscetíveis a inundações. Cada camada temática foi recortada segundo os limites da bacia e reclassificadas (ferramenta *Reclassificação*) com a atribuição de valores variando de 1 a 10, conforme o potencial de cada característica em favorecer a ocorrência de inundações. A definição dos pesos foi fundamentada em literatura técnica especializada, considerando a influência das variáveis no escoamento superficial. Quanto maior o valor atribuído, maior a contribuição estimada para a ocorrência de inundações. Na Tabela 1 estão descritos os valores atribuídos a cada classe.

Após a etapa de reclassificação, as camadas foram integradas por meio de álgebra de camadas (ferramenta *Calculadora Raster*), utilizando operação de multiplicação entre os rasters reclassificados. A adoção da combinação multiplicativa permitiu evidenciar as áreas onde múltiplos fatores apresentam elevada influência simultaneamente, intensificando o contraste espacial das zonas de maior suscetibilidade. O produto resultante foi, então, reclassificado em cinco categorias de risco: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto, possibilitando a elaboração do mapa final de suscetibilidade a inundações no perímetro urbano. Neste trabalho, a pedologia foi desconsiderada, em razão da bacia hidrográfica ser pequena e estar localizada sobre uma única tipologia pedológica.

Uso e ocupação	Peso	Altitude (m)	Peso	Declividade (graus)	Peso
Formação florestal	1	< 900	10	0-2	10
Silvicultura	2	900-1000	5	2-5	9
Pastagem	3	1000-1100	3	5-8	8
Café	4	> 1100	1	8-12	7
Soja	4			12-16	5
Outras lavouras temporárias	4			16-20	3
Mosaico de usos	5			20-24	2
Área urbanizada	8			24-30	1
Outras áreas não vegetadas	8				
Rios ou lagos	10				

Tabela 1: Pesos atribuídos para cada variável geoambiental.
Fonte: Autoria própria.

Resultados e Discussões

Inicialmente, pode-se observar, na Figura 2, o aspecto da bacia hidrográfica que abrange a região urbana. Essa primeira análise permite verificar que o formato da bacia é alongado, o que, conforme Villela e Mattos (1975), tende a torná-la menos suscetível a cheias súbitas. A partir das avaliações e da sobreposição das camadas de uso e ocupação do solo, declividade e altitude, foi possível construir o mapa apresentado na Figura 3, que demonstra quais zonas urbanas estão mais sujeitas a alagamentos e inundações em períodos de alta intensidade de precipitação.

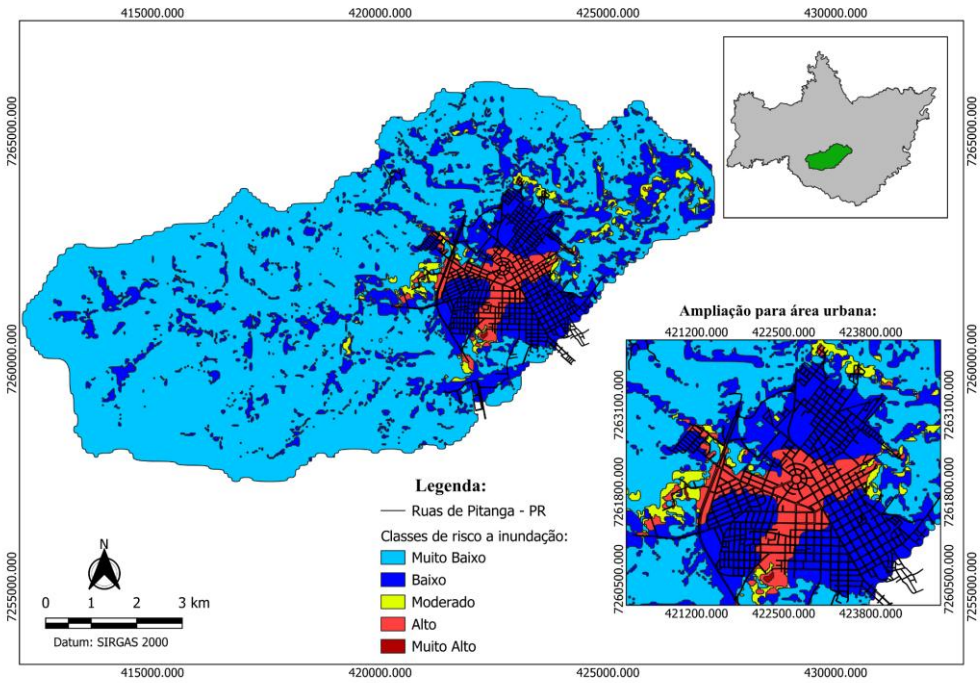


Figura 3: Mapa de suscetibilidade a inundações da zona urbana de Pitanga-PR.
Fonte: Autoria própria.

A área total analisada no mapa de suscetibilidade à inundação foi de 76,91 km². Desse total, 56,71 km² foram classificados como de risco muito baixo e 16,33 km² como de risco baixo, correspondendo conjuntamente a 94,96% da área de estudo. As áreas com risco moderado perfizeram 1,50 km² (1,95%). Por sua vez, as classes de risco alto e muito alto abrangeram 2,35 km² e 0,022 km², respectivamente, totalizando 3,09% da área analisada. Observa-se que uma parcela expressiva das áreas classificadas como de alto risco está concentrada no perímetro urbano do município, conforme evidenciado na Figura 3.

Ao comparar o mapa com os dados obtidos em reportagens e junto à Defesa Civil, verifica-se que os locais onde os alagamentos costumam ocorrer estão em conformidade com as áreas de alto risco (Figura 2). As únicas áreas classificadas como de risco muito alto correspondem às regiões próximas a lagos. No entanto, tais áreas não costumam sofrer alagamentos, uma vez que esses lagos foram construídos de forma planejada em parques municipais, apresentando sistema de drenagem adequado e, consequentemente, baixa recorrência de transbordamentos.

Com o presente estudo, foi possível verificar que as características das localidades inundadas favorecem o acúmulo de água superficial em momentos de grande volume de precipitação. Essas áreas apresentam baixa declividade, resultando em terrenos mais planos e, consequentemente, mais suscetíveis ao acúmulo de água, além de menor altitude, o que favorece a migração do excedente hídrico proveniente das áreas mais elevadas. Soma-se a isso a ocupação urbana próxima aos corpos d'água, que intensifica a impermeabilização do solo e favorece o escoamento superficial.

Além disso, o mapa de suscetibilidade pode servir como instrumento de apoio à gestão pública e à população, ao indicar previamente as áreas mais vulneráveis a alagamentos. Essas informações podem orientar o planejamento urbano, a priorização de obras de drenagem e a definição de medidas preventivas. Em municípios que ainda não possuem mapeamento da Defesa Civil, a metodologia aplicada pode contribuir como base técnica inicial para a identificação e mitigação de áreas de risco.

Considerações Finais

Com base nos resultados obtidos, compreende-se que o principal fator associado às recorrências de acúmulo de água superficial na zona urbana de Pitanga está relacionado à crescente impermeabilização do solo. Esse processo reduz a infiltração da água e aumenta o escoamento superficial, gerando sobrecarga no sistema de drenagem urbana, especialmente durante eventos de precipitação intensa. Diante desse cenário, torna-se necessário adotar estratégias que melhorem a drenagem e ampliem a permeabilidade urbana, como a implantação de telhados verdes, pavimentos permeáveis e a ampliação de áreas vegetadas. Além disso, o mapa de suscetibilidade elaborado neste estudo pode servir como instrumento de apoio ao planejamento urbano e à tomada de decisões durante a alocação de investimentos públicos.

Referências Bibliográficas

COSTA, F. R da; SOUZA, R. F. de; SILVA, S. M. P. da. Análise comparativa de metodologias aplicadas à delimitação da bacia hidrográfica do Rio Doce – RN. **Sociedade & Natureza**, v. 28, n. 3, p. 429-442, dez. 2016.

FERRAZ, C. M. Leal; VALADÃO, R. C.; PINTO, D. B. F.; ALMEIDA, R. A. Inundações e alagamentos em Teófilo Otoni, Minas Gerais, Brasil, segundo indicadores geomorfológicos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 4, p. 1893–1910, 2022.

G1. **Enxurrada arrasta mais de 50 pontes em Pitanga; comunidades estão isoladas e há 400 pessoas desalojadas**. 2023. Disponível em: https://g1.globo.com/pr/campos-gerais-sul/noticia/2023/10/30/enxurrada-arrasta-mais-de-50-pontes-em-pitanga-comunidades-estao-isoladas-e-ha-400-pessoas-desalojadas.ghtml. Acesso em: 23 ago. 2024.

GONÇALVES, C.; FRAGA, N. C.; BUENO, V. J.; LIMA, F. B. de. Planejamento urbano e inundações: um estudo de caso sobre o território da cidade de Pitanga, PR. In: **Congresso internacional de política social e serviço social: desafios contemporâneos; seminário nacional de território e gestão de políticas sociais; congresso de direito à cidade e justiça ambiental.** Londrina: UEL, 2022. v. 4, p. 1-15.

INSTITUTO ÁGUA E SANEAMENTO. **Municípios e saneamento: Pitanga (PR)**. Dados do Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA). Disponível em: https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/pr/pitanga. Acesso em: 27 fev. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pitanga (PR). Brasília: IBGE. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/pitanga/panorama. Acesso em: 10 fev. 2026.

NAVARRO, A. F.. Alagamentos, inundações, deslizamentos de encostas, desabamentos de prédios, vendavais: velhos ou novos problemas. **Editora Roncarati**, p. 1-32, 2004.

REZENDE, G. B. de M.,; ARAUJO, S. M. S. de. As cidades e as águas: ocupações urbanas nas margens de rios. **Revista de Geografia**, Recife, v. 33, n. 2, p. 119-135, jul. 2016.

SOUZA, Ê. G. F.; NASCIMENTO, A. H. C. do; CRUZ, E. A. da; PEREIRA, D. de F.; SILVA, R. S. da; SILVA, T. P. da; FREIRE, W. A.. Delimitação e caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Riacho do Navio, Pernambuco, a partir de dados SRTM processados no QGIS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 14, n. 3, p. 1530-1540, jun. 2021.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.

MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À INUNDAÇÃO NO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA

1 Marcus Vinícius Maximovitz, 2 Dimaghi Schwamback

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail:marcusmaximovitz@alunos.utfpr.edu.br;
2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: dimaghis@professores.utfpr.edu.br

Palavras-chave: Planejamento Urbano; Gestão de Riscos; Suscetibilidade à inundação

Introdução

As inundações estão entre os desastres hidrometeorológicos mais frequentes e impactantes no mundo, causando perdas humanas, danos à infraestrutura e prejuízos socioeconômicos (Lima et al., 2025). Recentemente, a magnitude e a frequência desses eventos têm se intensificado, impulsionadas primordialmente pelas mudanças climáticas, que alteram os regimes de precipitação e exacerbam os extremos hidrológicos (Alam et al., 2026; Sousa et al., 2026). No Brasil, a problemática é agravada por processos de urbanização desordenada, que frequentemente ocorrem sem um planejamento adequado da base espacial, resultando na ocupação de áreas ambientalmente frágeis e várzeas de rios (Rezende et al., 2017). Esse processo favorece o extravasamento de canais e amplia os impactos das inundações (Silva et al., 2025).

Apesar da ênfase em grandes centros, cidades de médio porte ainda carecem de mapeamentos detalhados para o planejamento preventivo (Lima et al., 2025). No município de Guarapuava, essa vulnerabilidade é evidenciada, pela expansão urbana acelerada e desordenada sobre as planícies de inundação do rio Cascavel, que resultou em um cenário onde 61% dos bairros apresentam áreas suscetíveis, condição agravada pela intensa impermeabilização do solo em setores consolidados (Machado & Vestena, 2024).

Nesse contexto, o mapeamento da suscetibilidade à inundação é uma ferramenta estratégica, definida pela propensão do terreno com base em fatores como relevo, clima e uso do solo (Silva et al., 2025). O uso de geotecnologias, com integração de SIG e Sensoriamento Remoto, destaca-se como abordagem eficiente (Lima et al., 2025).

Diante disso, o município de Guarapuava demanda diagnósticos técnicos para a gestão de riscos hidrológicos. Assim, este trabalho tem como objetivo mapear áreas suscetíveis à inundação, subsidiando políticas públicas, planejamento territorial e ações de mitigação, contribuindo para a resiliência urbana e a preservação ambiental.

Área de Estudo

O objeto deste estudo é o município de Guarapuava, localizado na Mesorregião Centro-Sul Paranaense. Com área de 3.167,830 km², é o maior município do Paraná em extensão territorial. Segundo o Censo de 2022, possui 182.093 habitantes, densidade demográfica de 57,48 hab/km², PIB per capita de R$ 54.170,74 e IDH de 0,731 (IBGE, 2024).

A rede hidrográfica do município integra a bacia do Rio Iguaçu, com destaque para o Rio Cascavel, cuja bacia abrange grande parte da área urbana e é considerada prioritária em estudos de macrodrenagem (FUNPAR, 2022). A malha hídrica urbana inclui ainda arroios relevantes, como Pocinho, Central, Engenho e Xarquinho, além de sub-bacias como Olarias, Barro Preto, Caveira, Chácara, Carro Quebrado, Esperança, Invernada e Monjolo. Outros rios importantes no território são o das Pedras e o Jordão, este último associado a áreas com recorrência de inundações (FUNPAR, 2022).

O município apresenta histórico recorrente de alagamentos em áreas urbanas. Em junho de 2022, um acumulado de 63 mm de chuva gerou 15 atendimentos emergenciais e resgates em bairros como Xarquinho, Industrial, Vila Carli e Jardim das Américas (DEFESA CIVIL, 2022). Essa vulnerabilidade é agravada pelo fato de apenas 22,9% dos domicílios urbanos possuírem urbanização adequada (IBGE, 2024). Diante disso, o Plano Municipal de Drenagem definiu áreas suscetíveis como zonas prioritárias, com foco nas bacias dos arroios Central, Pocinho e do Rio Cascavel, visando identificar falhas no sistema de drenagem (FUNPAR, 2022). Medidas preventivas, como limpeza de galerias e desassoreamento, têm se mostrado eficazes, como observado em 2025, quando chuvas superiores a 130 mm resultaram em poucos danos devido à preparação prévia (Oliveira, 2025).

Procedimentos Metodológicos

Os procedimentos foram realizados na plataforma *Quantum Geographic Information System* (QGIS), possui código aberto para processamento de dados espaciais e integração de informações do meio físico. O banco de dados foi estruturado com malhas do IBGE e integrado a dados de uso da terra, pedologia e MDE, sendo o uso do solo obtido do MapBiomas.

A análise do relevo baseou-se no MDE da Embrapa Territorial (Brasil em Relevo), do qual foi derivada a declividade em SIG. Delimitou-se a bacia do rio Cascavel, com área de 1766,43 Km^2, que abrange a maior parte da área urbana, como unidade de análise por sua relevância no planejamento hidrológico (Machado & Vestena, 2024; PARANÁ, 2011; Silva et al., 2025; Vestena et al., 2020). Os dados foram recortados para a bacia (75,2% da área urbana) e reclassificados (ferramenta *Reclassificação*) em escala de 1 a 10 conforme o potencial de inundação, com base em literatura especializada, quanto maior o valor atribuído, maior a contribuição estimada para a ocorrência de inundações (Lima et al., 2025; Vestena et al., 2020).

Na pedologia, Neossolos receberam pesos elevados (8) por serem rasos e pouco espessos, limitando a infiltração, enquanto Cambissolos e Latossolos apresentaram pesos baixos (2–3) por serem mais profundos e bem drenados. No uso e

ocupação, a formação florestal recebeu peso mínimo (1) devido à alta retenção hídrica, ao passo que áreas urbanas receberam peso máximo (10) pela impermeabilização, assim como corpos d'água, pois já estão inundados. Quanto à declividade, áreas planas (0–2%) receberam peso 10 por favorecerem o acúmulo de água, enquanto terrenos mais inclinados (>10%) receberam peso 1 por facilitarem a drenagem. Por fim, na altitude, cotas mais baixas (899–939 m) receberam peso 10 por concentrarem fluxo hídrico, enquanto áreas mais elevadas receberam pesos menores por apresentarem menor propensão ao acúmulo de água (Machado et al., 2024; Rezende et al., 2017). Essa metodologia proporcionou uma representação mais realista do escoamento superficial (Silva et al., 2025). A síntese dos critérios e pesos está apresentada na Tabela 1.

Pedologia	Peso	Uso e Ocupação	Peso	Declividade	Peso	Altitude	Peso
Cambissolo Háplico Alumínico	2	Formação Florestal	1	0-2	10	899-939	10
Latossolo Bruno Alumínico	3	Silvicultura	2	2-4	8	939-979	9
Latossolo Vermelho Aluminoférrico	3	Campo alagado e área pantanosa	8	4-6	6	979-1019	8
Nitossolo Bruno Aluminoférrico	6	Formação Campestre	4	6-8	4	1019-1059	7
Neossolo Litólico Distrófico	8	Pastagem	3	8-10	2	1059-1099	6
Neossolo Litólico Eutrófico	8	Mosaico de Usos	5	10-12	1	1099-1139	5
		Área Urbanizada	9	12-14	1	1139-1179	4
		Outras Áreas não Vegetadas	9	14-16	1	1179-1219	3
		Rio, Lago e Oceano	10	16-18	1	1219-1259	2
		Soja	4	18-20	1	1259-1299	1
		Outras Lavouras Temporárias	4	20-22	1	1299-1339	1
		Café	4	22-24	1		
		Outras Lavouras Perenes	4	24-26	1		
		Área Urbana	10	26-28	1		
		Corpo d'água continental	10	28-30	1		

Tabela 1 – Pesos e notas das variáveis de suscetibilidade a inundações.
Fonte: Os autores (2026).

Após a reclassificação, os planos de informação (pedologia, uso e ocupação, declividade e altitude) foram integrados em SIG por meio de álgebra de mapas, utilizando a multiplicação dos rasters conforme os pesos definidos (Machado et al., 2024). A utilização da multiplicação dos rasters (procedimento central na álgebra de mapas) justifica-se, primordialmente, pela necessidade de aplicar a Combinação Linear Ponderada (WLC) em estudos de suscetibilidade e risco. Esse método permite integrar diversas variáveis ambientais, garantindo que cada uma contribua para o resultado final conforme sua importância específica (Machado et al., 2024; Rezende et al., 2017). E a partir disso, foi possível destacar áreas com atuação simultânea de fatores críticos, intensificando o contraste das zonas mais suscetíveis. O resultado foi classificado em cinco níveis de risco: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto. Como validação dos resultados obtidos foram gerados dois mapas (Figura 01 e 02) que representam as classes e pontos de suscetibilidade à inundação do município de Guarapuava-Pr, onde o primeiro mapa destaca pontos de suscetibilidade na bacia hidrográfica de Guarapuava, e o segundo mapa destaca suscetibilidade na área urbana de Guarapuava.

Resultados e Discussões

A Figura 1 apresenta o mapa de suscetibilidade à inundação em nível de bacia hidrográfica, permitindo uma visão macroscópica da unidade de planejamento que sustenta o perímetro urbano de Guarapuava. Observa-se a predominância da classe de suscetibilidade muito baixa em grande parte da extensão territorial da bacia, representada pela coloração verde. A análise em nível de bacia revela ainda que as zonas de maior risco acompanham fielmente a rede de drenagem, especialmente o curso principal do rio Cascavel e seus afluentes.

Os resultados do mapeamento de suscetibilidade para a área de estudo, a bacia do rio Cascavel, que compreende um total de 1766,43 km², revelam que a maior parte do território encontra-se em condições de segurança hidrológica, com 95,71% (1690,74 km²) da área classificada como de Muito Baixa suscetibilidade e 2,23% (39,36 km²) como Baixa. Em contrapartida, as zonas que demandam maior atenção para a gestão de riscos e planejamento urbano, representadas pelas classes Alta e Muito Alta, somam juntas 1,13% (19,91 km²). Especificamente, a categoria de Muito Alta suscetibilidade isoladamente ocupa 0,29% (5,18 km²) da bacia, concentrando-se em setores onde a topografia plana e o adensamento das edificações dificultam a infiltração e potencializam o acúmulo hídrico. Essa distribuição espacial corrobora a literatura técnica, indicando que, embora as áreas críticas sejam percentualmente menores, sua localização em fundos de vale e zonas de baixa declividade intensifica a exposição humana e os potenciais danos socioeconômicos durante eventos de precipitação extrema (Rezende et al., 2017).

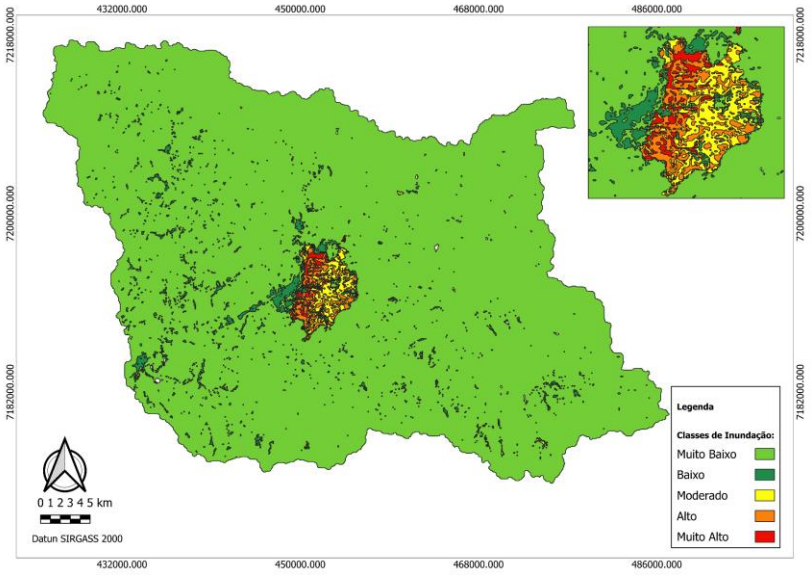


Figura 1: Mapa de suscetibilidade à inundação na bacia hidrográfica de Guarapuava – PR
Fonte: Os autores (2026).

A ampliação para a área urbana de Guarapuava, ilustrada na Figura 2, revela uma distribuição espacial heterogênea da suscetibilidade, onde a configuração do uso do solo e a morfometria local definem o zoneamento de risco detalhado. Nota-se a predominância das classes moderada e alta (tons de amarelo e laranja) em grande parte da malha urbana, o que é corroborado pelo fato de que mais de 60% dos bairros do município possuem áreas suscetíveis à inundação em diferentes níveis. Esse padrão está intrinsecamente ligado ao processo de urbanização, que resultou em alta impermeabilização do solo, reduzindo a capacidade de infiltração e potencializando vazões máximas em curto espaço de tempo. As zonas classificadas com suscetibilidade muito alta (coloração vermelha) concentram-se de forma crítica em setores consolidados e próximos aos cursos d'água, com destaque para os bairros Vila Bela, Industrial e Vila Carli, que historicamente se confirmam com dados do Corpo de Bombeiros (2005-2011), que Vila Carli e Primavera sozinhos concentram 31% das ocorrências de alagamentos no município devido à ocupação desordenada de várzeas (Vestena et al., 2020). Assim como, Machado & Vestena (2024), indicam que o bairro Vila Bela teve um aumento de quase 100% em sua área construída sobre terrenos inundáveis entre 2014 e 2023, o que justifica a classificação de suscetibilidade "Muito Alta" atribuída ao setor e observado na Figura 2.

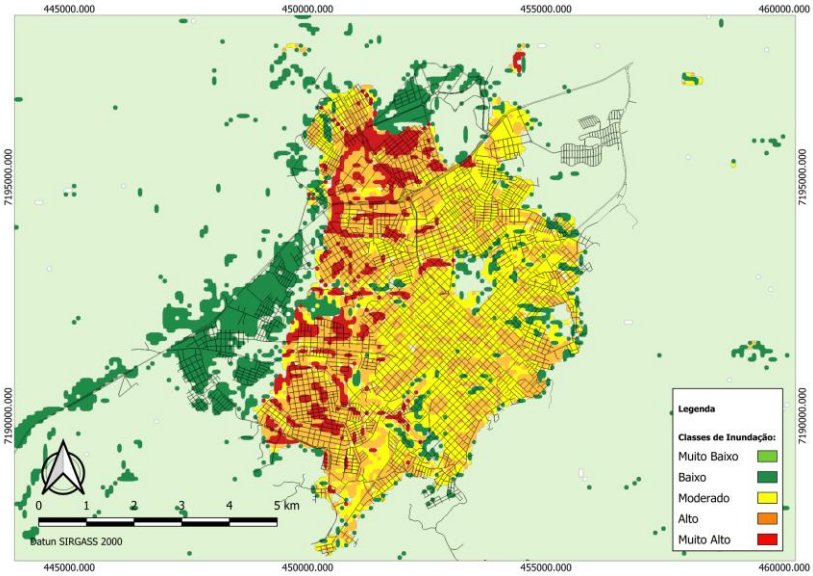


Figura 2 - Mapa de suscetibilidade à inundação na área urbana de Guarapuava – PR.
Fonte: Os autores (2026).

Por outro lado, as classes de baixa e muito baixa suscetibilidade aparecem de forma mais dispersa, geralmente associadas a áreas periféricas de relevo mais elevado ou com maior cobertura vegetal arbórea, onde os solos permitem melhor drenagem e infiltração. A intercalação dessas manchas dentro do perímetro urbano reforça que o risco não é uniforme, sendo condicionado pela proximidade da rede de drenagem e por gargalos na infraestrutura de micro e macrodrenagem.

Considerações Finais

O mapeamento demonstrou que a modelagem multicritério é uma ferramenta eficaz para a gestão pública, evidenciando que 1,13% da bacia de Guarapuava concentra áreas suscetíveis à inundação, associadas à rede de drenagem e à urbanização. A identificação dessas zonas permite orientar o planejamento territorial, restringir ocupações em áreas vulneráveis e priorizar intervenções estruturais. Recomenda-se a incorporação de dados históricos de eventos para validação e aprimoramento do modelo em estudos futuros.

Referências Bibliográficas

ALAM, Sk Asraful; MAITI, Ramkrishna. Flood risk and community resilience mapping at the Mouza level: Insights from the 2024 Malda Flood, India. Global and Earth Surface Processes Change, v. 5, p. 100011, jan. 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gespch.2026.100011.

DEFESA Civil atende casos de alagamentos em Guarapuava. Extra Guarapuava, 2 jun. 2022. Disponível em: https://www.extraguarapuava.com.br/ultimas-noticias/defesa-civil-atende-casos-de-alagamentos-em-guarapuava/. Acesso em: 22 mar. 2026.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. SRTM - Shuttle Radar Topography Mission. Campinas: Embrapa Territorial. Disponível em: https://www.embrapa.br/territorial/satelites-de-monitoramento/missoes/srtm. Acesso em: 20 mar. 2026.

FUNPAR. PREFEITURA MUNICIPAL DE GUARAPUAVA. Plano Municipal de Drenagem de Guarapuava: Relatório Técnico Parcial II: Anexo C: Topobatimetria – Rio Cascavel. Guarapuava: Funpar, dez. 2021.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Guarapuava (PR): panorama. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/guarapuava/panorama. Acesso em: 22 mar. 2026.

LIMA, Klaus Cardoso Oliveira; FERRAZ, Lorena Lima; SANTANA, Gregório Matheus; GOMES, Ronaldo Lima; SANTOS, Carlos Amilton Silva; PEREIRA, Thais Barros; JESUS, Raildo Mota de. Integrated use of the analytical hierarchy process method for mapping areas susceptible to flooding in the urban area in a city in southwest Bahia, Brazil. Journal of South American Earth Sciences, v. 167, p. 105778, set. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105778.

MACHADO, Fabiula Eurich; VESTENA, Leandro Redin. Evolução da mancha de inundação e de áreas edificadas em terrenos inundados na cidade de Guarapuava, Paraná. Revista de Geociências do Nordeste, v. 10, n. 1, p. 537-550, 2024.

MACHADO, Gilnei; GASPERI, Jhonatan Furtado de; MAGALHÃES, Kelvin Saymon. Susceptibilidade a inundações na Região Norte Central do Estado do Paraná. BORINELLI, Benilson; COSTA, Rogério Santos da; MACHADO, Gilnei (org.). Água: gestão, conflitos e desigualdades. Criciúma, SC: Ediunesc, 2024. p. 263-285.

OLIVEIRA, Thiago de. Chuva forte causou poucos estragos em Guarapuava. Rede Sul de Notícias, 29 out. 2025. Disponível em: https://redesuldenoticias.com.br/noticias/chuva-forte-causou-poucos-estragos-em-guarapuava/. Acesso em: 22 mar. 2026.

PARANÁ. Base Hidrográfica do Estado do Paraná 1:50.000: relatório técnico. Curitiba: Copel/ÁguasParaná, set. 2011.

REZENDE, Patrícia Soares; MARQUES, Daniela Vieira; OLIVEIRA, Luiz Antônio de. Construção de modelo e utilização do método de processo analítico hierárquico – AHP para mapeamento de risco a inundação em área urbana. Caminhos de Geografia, Uberlândia, v. 18, n. 61, p. 01–18, mar. 2017.

SILVA, Wesley Lopes da; FRANCO, Gustavo Barreto; JESUS, José Alves de. Geoprocessamento aplicado ao mapeamento de suscetibilidades a inundações no município de Jacobina (BA). Caminhos de Geografia, Uberlândia, v. 26, n. 103, p. 257–268, fev. 2025.

SOUSA, Milena Rosa de; MENDIONDO, Eduardo Mario; GOMES JÚNIOR, Marcus Nóbrega. Hydrological-hydrodynamic modeling of climate-induced urban flooding of design storms using HydroPol2D: a case study in São Carlos, Brazil. RBRH, Porto Alegre, v. 31, e02, 2026. DOI: https://doi.org/10.1590/2318-0331.312620250090.

VESTENA, Leandro Redin; ALMEIDA, D. E. F.; GEFFER, Edivaldo. Análise espacial e temporal da distribuição dos alagamentos e inundações na cidade de Guarapuava, Paraná. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 5, p. 24923-24941, maio 2020.

MAPEAMENTO DE ÁREAS DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA NO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA-PR

1 Rodrigo Augusto Cleto de Farias, 2 Dimaghi Schwamback
1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: rodrigoaugusto_cf@hotmail.com
2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, e-mail: dimaghis@professores.utfpr.edu.br

Palavras-chave: Movimentos de massa; Suscetibilidade; Guarapuava.

Introdução

Os movimentos de massa são processos geodinâmicos naturais resultantes da ação direta da gravidade sobre materiais constituintes das vertentes, como solos e rochas (Vieira, 2008; Ferreira, 2016). No cenário brasileiro, estes fenômenos assumem o status de desastres socioambientais quando associados à ocupação antrópica desordenada em áreas de fragilidade intrínseca (Pinto, 2015; Pessoa Neto et al., 2025). A urbanização acelerada sobre encostas geologicamente instáveis e o manejo inadequado do solo convertem processos evolutivos do relevo em catástrofes que resultam em severos prejuízos econômicos e na perda de vidas humanas (Moro et al., 2019; Silva et al., 2024).

Diante deste panorama, o mapeamento de suscetibilidade configura-se como um subsídio técnico indispensável para a gestão de riscos e para o planejamento do ordenamento territorial (Araújo et al., 2024; Tabalipa e Fiori, 2008). Para a Defesa Civil e a administração pública, a posse de bases cartográficas precisas permite a priorização de intervenções mitigadoras e a atualização de Planos Diretores, reduzindo a subjetividade na tomada de decisão governamental (Soares Júnior et al., 2022; Silva et al., 2024). Este estudo objetiva realizar tal mapeamento integrando variáveis geoambientais via álgebra de mapas em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica).

Área de Estudo

O município de Guarapuava situa-se na região Centro-Sul do Paraná, na transição entre o Segundo e o Terceiro Planalto Paranaense (Vieira, 2008; Pachechenik, 2004). Possui uma extensão territorial de 3.163,89 km², sendo a vasta área rural composta por 3.124,07 km² e o núcleo urbano central por 39,82 km² (IBGE, 2025). A população estimada é de aproximadamente 189.630 habitantes (IBGE, 2025). O relevo é marcado por desníveis acentuados na escarpa basáltica da Serra da Esperança (Mineropar, 2001; Vieira, 2008), apresentando altitudes que variam entre 639 e 1.346 metros, conforme os dados extraídos do Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado nesta pesquisa.

Geologicamente, a área é sustentada pelos derrames vulcânicos da Formação Serra Geral, que recobrem os arenitos da Formação Botucatu (Vieira, 2008). O clima é do tipo Cfb (Subtropical Úmido ou Temperado Oceânico), com pluviosidade média anual entre 1.800 e 2.000 mm, bem distribuída ao longo do ano, fator que atua como principal agente deflagrador de instabilidades (Pachechenik, 2004; Vieira, 2008). Predominam solos como o Latossolo Bruno e o Nitossolo Bruno, além de Neossolos Litólicos associados a áreas de relevo acidentado e maior fragilidade (Santos et al., 2007; Pachechenik, 2004).

Procedimentos Metodológicos

O processamento espacial foi realizado no software QGIS versão 3.34.8-Solothurn (QGIS.ORG, 2024). Foram utilizadas quatro camadas: Pedologia (IBGE, 2025), Altitude e Declividade derivadas de Modelo Digital de Elevação ALOS PALSAR (ASF, 2011), e Uso e Ocupação do Solo (MapBiomas, 2024). Todas as camadas foram harmonizadas para uma resolução espacial de 12,5 metros e recortadas conforme o limite municipal oficial (IBGE, 2025; Zighmi et al., 2025).

Seguindo a metodologia de valoração proposta por Silva et al. (2024), atribuiu-se pesos heurísticos de 1 a 10 (Tabelas 01 e 02) para as classes de cada variável, onde a nota 1 indica estabilidade e 10 indica instabilidade máxima. Corpos d'água receberam nota 0 e foram excluídos da análise por não apresentarem suscetibilidade intrínseca (Tabalipa e Fiori, 2008).

Classificação das Camadas Utilizadas

Uso e Ocupação (classes)	Peso	Pedologia (classes)	Peso	Declividade (%)	Peso	Altitude (m)	Peso
Área Urbanizada	8	Área Urbana	8	0 - 3	1	639 – 780,4	1
Café	5	Cambissolo Háplico	8	3 - 8	3	780,4 – 921,8	3
Campo Alagado e Área Pantanosa	1	Corpo d'água	0	8 - 20	5	921,8 – 1063,2	5
Formação Campestre	4	Latossolo Bruno	2	20 - 45	8	1063,2 - 1204,6	8

Tabela 01: Pesos atribuídos para as camadas utilizadas.
Fonte: Autores (2026).

Classificação das Camadas Utilizadas							
Uso e Ocupação (classes)	**Peso**	**Pedologia (classes)**	**Peso**	**Declividade (%)**	**Peso**	**Altitude (m)**	**Peso**
Formação Florestal	1	Latossolo Vermelho	3	45 - 75	9	1204,6 - 1346	10
Mosaico de Usos	6	Neossolo Litólico	10	>75	10		
Outras Áreas não Vegetadas	9	Nitossolo Bruno	5				
Outras Lavouras Perenes	5						
Outras Lavouras Temporárias	8						
Pastagem	8						
Rio, Lago e Oceano	0						
Silvicultura	3						
Soja	8						

Tabela 02: Pesos atribuídos para as camadas utilizadas.
Fonte: Autores (2026).

A integração ocorreu por multiplicação direta via Calculadora Raster, como também realizado por Ferreira (2016):

$$Suscetibilidade = Pedologia \cdot Altitude \cdot Declividade \cdot Uso\ e\ Ocupação\ do\ Solo$$

O índice final obtido através da álgebra de mapas variou de 0 a 7.200. Para a espacialização dos resultados, os dados foram reclassificados em cinco níveis qualitativos de suscetibilidade, seguindo uma lógica de crescimento exponencial para isolar as zonas de maior perigo acumulado: Muito Baixa (0-500), Baixa (500-1.500), Moderada (1.500-3.000), Alta (3.000-5.000) e Muito Alta (5.000-7.200). A adoção de sistemas numéricos e a atribuição de pesos para compor o mapa final de suscetibilidade em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) seguem as diretrizes metodológicas de Soares Júnior et al. (2022) e Silva et al. (2024). A atribuição de pesos para as classes de Declividade seguiu os parâmetros heurísticos de Silva et al. (2024) e Pessoa Neto et al. (2025). Já as classes de Uso do Solo e Pedologia basearam-se em Moro et al. (2019) e Ferreira (2016). A escala hipsométrica (Altitude) e o esquema de classificação numérica basearam-se nas diretrizes metodológicas de Moro et al. (2019) e Soares Júnior et al. (2022), onde a altitude amplia a energia potencial hídrica, convertendo-a em energia cinética e potencial erosivo vertente abaixo (Crepani et al., 2001; Pinto, 2015).

Resultados e Discussões

Os resultados (Tabela 03) indicam estabilidade natural em 88,52% do território de Guarapuava, com predominância das classes Muito Baixa (67,76%) e Baixa (20,76%), reflexo das superfícies aplainadas do platô (Pachechenik, 2004; Moro et al., 2019). Contudo, as zonas de Alta e Muito Alta suscetibilidade totalizam 79,62 km² (2,52%), identificando setores críticos na Zona Rural 79,24 km² (2,53%) e áreas onde relevos acentuados e fragilidades geológicas potencializam processos erosivos (Vieira, 2008; Silva et al., 2024). No Urbano Central, a classe Moderada é alarmante, abrangendo 24,50 km² (61,52%), o que evidencia que a urbanização acelerada sobre cabeceiras de encostas converte suscetibilidade natural em risco emergente (Moro et al., 2019; Silva et al., 2024).

Embora a suscetibilidade Alta urbana represente apenas 0,95%, o adensamento populacional nessas áreas eleva o risco de danos socioeconômicos (Silva et al., 2024; Zighmi et al., 2025). Para validação dos resultados obtidos, foram gerados dois mapas que representam as classes e pontos de suscetibilidade do município (Figuras 01 e 02). O primeiro mapa detalha a espacialização de todas as classes no município, enquanto o segundo destaca a região íngreme em frente ao Parque do Lago, ratificando que a ocupação de bordas de platô converte suscetibilidade natural em risco emergente (Pessoa Neto et al., 2025).

Classes	**Área (km²)**	**Município (%)**	**Área (km²)**	**Urbano Central (%)**	**Área (km²)**	**Zona Rural (%)**
Muito Baixa	2143,84	67,76%	3,40	8,55%	2140,43	68,51%
Baixa	656,69	20,76%	11,54	28,99%	645,14	20,65%
Moderada	283,75	8,97%	24,50	61,52%	259,25	8,30%
Alta	67,35	2,13%	0,38	0,95%	66,97	2,14%
Muito Alta	12,27	0,39%	0,00	0,00%	12,27	0,39%
Total	**3163,89**	**100%**	**39,82**	**100%**	**3124,07**	**100%**

Tabela 03: Porcentagem relativa em relação a área de abrangência municipal, área urbana e zona rural.
Fonte: Autores (2026).

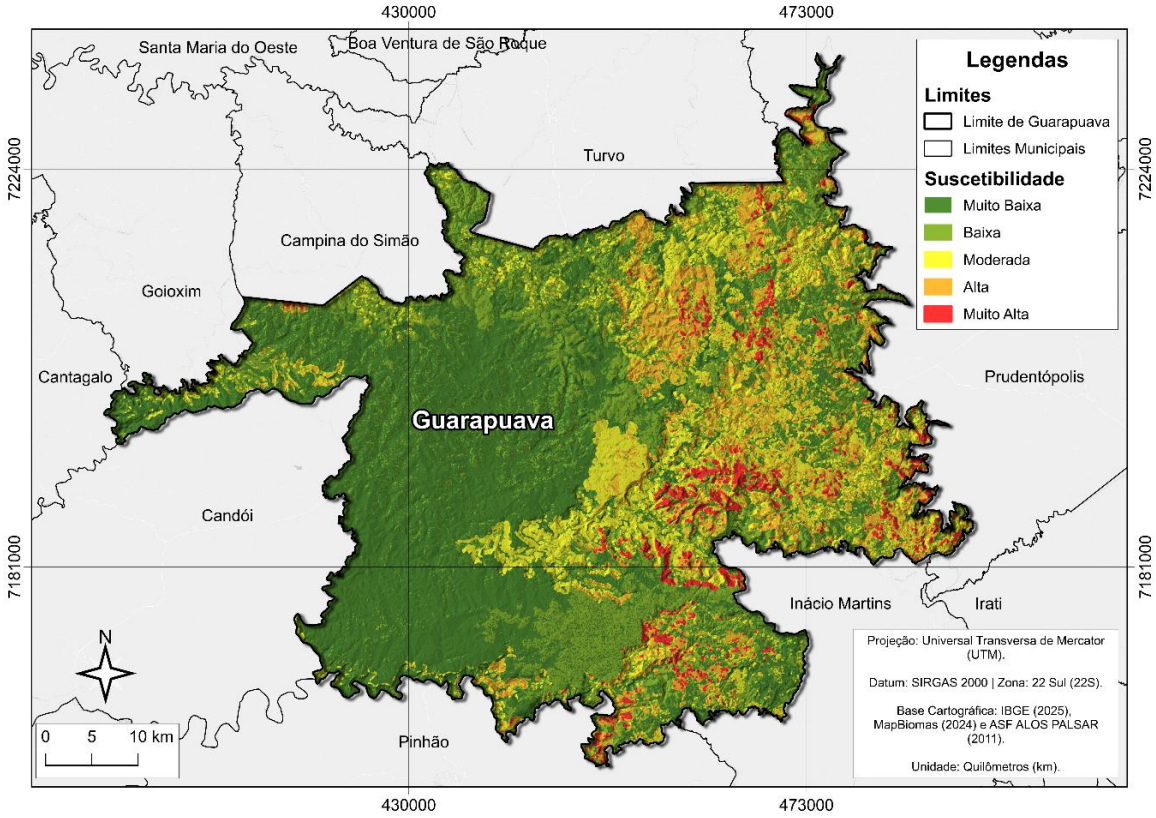


Figura 01: Mapeamento completo de áreas de suscetibilidade do município de Guarapuava-Pr
Fonte: Autores (2026).

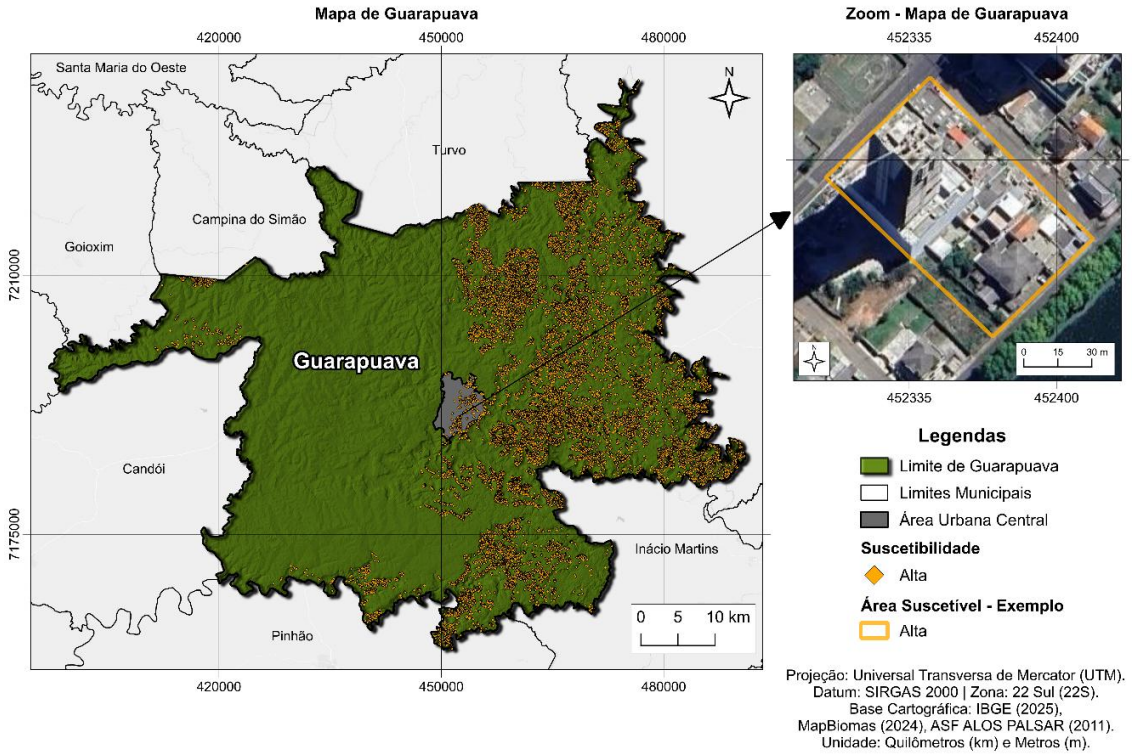


Figura 02: Identificação de um ponto de suscetibilidade alta no município de Guarapuava-PR.
Fonte: Autores (2026).

Considerações Finais

O mapeamento demonstrou que a modelagem multicritério é uma ferramenta eficaz para a gestão pública, revelando que mais de 62% da área urbana central de Guarapuava exige atenção e monitoramento preventivo devido à predominância da

classe moderada. A identificação dessas zonas permite ao poder público restringir a ocupação em setores de transição e orientar o ordenamento territorial. Recomenda-se a incorporação de inventários históricos de cicatrizes para validar a acurácia do modelo em estudos futuros.

Referências Bibliográficas

ARAÚJO, B. H. B. et al. Mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massas na área urbana de Areia-PB. **Revista de Geociências do Nordeste**, Caicó, v. 10, n. 2, p. 420-437, 2024.

ALASKA SATELLITE FACILITY (ASF). **ALOS PALSAR - Radiometric Terrain Correction (RTC)**. Fairbanks: ASF, 2011. Disponível em: https://search.asf.alaska.edu/.

CREPANI, E. et al. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001. 100 p.

FERREIRA, A. C. S. **Evolução Espaço Temporal do Uso de Cobertura de Terra e a Suscetibilidade do Município de Angra dos Reis aos Escorregamentos de terra**. 2016. 84 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2016.

IBGE. **Portal IBGE: Cidades, Malhas Territoriais e Pedologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: https://www.ibge.gov.br.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas - Coleção 9.0**: Série Histórica de Uso e Cobertura da Terra no Brasil. 2024. Disponível em: https://mapbiomas.org.

MINEROPAR. **Atlas comentado da geologia e dos recursos minerais do estado do Paraná**. Curitiba: Mineropar, 2001.

MORO, M. et al. **Análise multicritério na definição de vulnerabilidade ambiental**. Terr@ Plural, Ponta Grossa, v. 13, n. 3, p. 272-295, 2019.

PACHECHENIK, P. E. **Caracterização hidrológica e da fragilidade ambiental na bacia do Rio das Pedras, Guarapuava – PR**. 2004. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

PESSOA NETO, A. G. et al. Mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massa utilizando análise multicritério. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v. 35, n. 81, p. 487-512, 2025.

PINTO, R. C. **Identificação e mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa através de avaliação multicritério em SIG**. 2015. Tese (Doutorado) – UFPR, Curitiba, 2015.

QGIS.ORG. **QGIS Software (v. 3.34.8)**. Open Source Geospatial Foundation Project, 2024. Disponível em: http://qgis.org.

SANTOS, L. J. C. et al. Mapeamento da vulnerabilidade ambiental aos processos de erosão e movimentos de massa no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, n. 2, 2007.

SILVA, B. A. et al. **Aplicação de Geotecnologias no Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Eventos Geodinâmicos em Teófilo Otoni - MG**. In: XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), 2024, Balneário Camboriú. Anais... São Paulo: ABMS, 2024.

SOARES JÚNIOR, A. V. et al. **Dados geológicos e de sensoriamento remoto aplicados ao mapeamento da suscetibilidade a movimentos de massa: estudo de caso em Mairiporã, Estado de São Paulo – Brasil**. Boletim Paranaense de Geociências, Curitiba, v. 80, n. 2, p. 166-187, 2022.

TABALIPA, N. L.; FIORI, A. P. **Influência da vegetação na estabilidade de taludes na bacia do Rio Ligeiro (PR)**. Geociências, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 387-399, 2008.

VIEIRA, S. F. **Análise e mapeamento das áreas suscetíveis a movimentos de massa no setor central da Serra da Esperança, na divisa entre os municípios de Guarapuava e Prudentópolis – PR**. 2008. 191 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – UFSC, Florianópolis, 2008.

ZIGHMI, K. et al. **GIS-based multicriteria evaluation for landslide susceptibility mapping in the Tellian Atlas (NE Algeria)**. Scientific Reports, v. 15, 2025.

IDENTIFICAÇÃO, AVALIAÇÃO E MONITORAMENTO DOS RISCOS DE EVENTOS CLIMÁTICOS VISANDO A QUALIFICAÇÃO DOS SISTEMAS PÚBLICOS DE ALERTA PARA AS REGIÕES DO VALE DO RIO PARDO E VALE DO TAQUARI

1 Carlos Antonio da Costa Tillmann, 2 Jorge André Ribas Moraes, 3 Bruno Deprá, 4 Rafael Sobroza Becher, 5 Gilson Augusto Helfer, 6 Luiz Schneider, 7 Markus Brose, 8 Leonel Pablo Tedesco

1 Universidade de Santa Cruz do Sul, e-mail: tillmann@unisc.br; 2 Universidade de Santa Cruz do Sul, e-mail: jorge@unisc.br; 3 Universidade de Santa Cruz do Sul, e-mail: brunodepra@unisc.br; 4 Universidade de Santa Cruz do Sul, e-mail: rafaelsob@unisc.br; 5 Universidade de Santa Cruz do Sul, e-mail: ghelfer@unisc.br; 6 Universidade de Santa Cruz do Sul, e-mail: luizcs@unisc.br; 7 Universidade de Santa Cruz do Sul, e-mail: markus@unisc.br; 8 Universidade de Santa Cruz do Sul, e-mail: leoneltedesco@unisc.br

Palavras-chave: Monitoramento de riscos; Resiliência regional; Adaptação climática

Introdução

Um primeiro registro com enchentes de grandes proporções ocorreu em abril e maio de 1941, o lago Guaíba transbordou e cobriu o centro histórico da capital Porto Alegre. O que não aprendemos com as enchentes de 1941 se encontra na raiz dos elementos que contribuíram para o desastre de maio de 2024. Além da inundação ter atingido uma área de mais de 5 mil km², foram reconhecidos 95 municípios em estado de calamidade e outros 323 em situação de emergência, ou seja, 84% dos 497 municípios gaúchos foram impactados, afetando 2,398 milhões de pessoas, 22% da população total do estado (GZH, 2024)

O desastre climático ocorrido no Rio Grande do Sul foi resultado da combinação de dois fatores: um global — a emergência climática — diz respeito a ações de políticas públicas e a transição de um modelo econômico como opção as sociedades atingidas, e outro local — os riscos existentes — os quais exigem uma revisão profunda da infraestrutura urbana e rural (CCS, 2025).

As cheias devastadoras de 2024, que destruíram parte da serra gaúcha com deslizamentos de terra e mais aos vales, os principais rios e lagos transbordaram em razão das intensas chuvas. Entre as áreas mais afetadas, destacam-se as cidades das regiões dos Vales, propiciando o rápido aumento da vazão e a subida do nível da água durante as grandes precipitações, demandando um sistema de monitoramento constante e um sistema de alerta para a população ribeirinha

Particularmente, a proposta do projeto visa instalar pontos de monitoramento da bacia hidrográfica do Rio Pardo, o rio Pardinho, afluente do rio Pardo, que cruza a zona urbana dos municípios de Santa Cruz do Sul e Sinimbu, onde não possui nenhuma estação fluviométrica em atual funcionamento a montante de Santa Cruz do Sul. Na parte alta de seu curso, o rio atravessa a região da Reserva Particular do Patrimônio Natural – RPPN da Universidade de Santa Cruz do Sul, em uma localidade conhecida como Salto do Rio Pardinho, no interior do município de Sinimbu.

Destaque ainda no arroio Lajeadinho, afluente da margem direita do rio Pardinho, na localidade de Serafin Schmidt na divisa dos municípios de Gramado Xavier e Boqueirão do Leão e o rio Pardo na localidade de Costa do Rio no município de Lagoão.

Na bacia hidrográfica do rio Taquari-Anta, municípios de Venâncio Aires e Cruzeiro do Sul, as margens do rio Castelhano e Taquari, respectivamente, que foram fortemente atingidos pelas enchentes que ocorreram no ano de 2024.

O monitoramento climático é essencial para entender, prever e mitigar os efeitos das mudanças climáticas, beneficiando setores como políticas públicas, planejamento urbano, agricultura e gestão de desastres. Com dados históricos e em tempo real coletados por satélites, estações meteorológicas, estações fluviométricas e sensores atmosféricos, podemos assim identificar padrões e tendências climáticas, fornecendo informações cruciais para decisões informadas.

Intervenções estruturais propostas, tornam-se necessárias, a instalação de 3 estações fluviométricas que monitorem os rios em questão, além de 2 estações meteorológicas para controle e registro dos eventos meteorológicos nestas regiões. Paralelamente às intervenções estruturais, é essencial qualificar os recursos humanos para o enfrentamento dos impactos climáticos, envolvendo a capacitação da Defesa Civil, dos profissionais da saúde humana e animal, e da educação — com foco especial nos gestores de unidades básicas e da atenção psicossocial.

Objetivos e justificativa

Objetivo Geral

Adotar medidas integradas que combine ações estruturais e não estruturais visando identificar e mensurar a restauração das áreas atingidas pelas enchentes e inundações, com a pretensão de proteger vidas, propriedades e o meio ambiente urbano e rural.

Objetivos Específicos:

- ✓ Ajudar, por meio dos dados gerados, no gerenciamento das águas da bacia para questões ambientais;
- ✓ Desenvolver estação de monitoramento por imagem;

- ✓ Validar os dados de monitoramento por imagem comparativamente aos dados das estações fluviométricas;
- ✓ Desenvolver um serviço web para alimentação de dados, tomada de decisão e mecanismo de alerta;
- ✓ Capacitar as comunidades e prefeituras das cidades nas regiões de estudo, Vale do Rio Pardo e Vale do Taquari para a gestão de emergências;
- ✓ Divulgar os resultados e produtos da pesquisa por meio de publicações e ações educativas em escolas e prefeitura dos Vales do Rio Pardo e Taquari;
- ✓ Divulgar por meio de artigos científicos a serem submetidos para periódicos ou em eventos os resultados deste projeto de pesquisa;
- ✓ Implementar estratégias de comunicação digital, por meio de redes sociais, para divulgar informações e dados coletados pelo projeto a fim de engajar as comunidades locais na prevenção e gestão de riscos climáticos.

Metodologia e estratégias de ação

A proposta do projeto visa instalar pontos de monitoramento da bacia hidrográfica do Rio Pardo, o rio Pardinho, afluente do rio Pardo, que cruza a zona urbana dos municípios de Santa Cruz do Sul e Sinimbu, onde não possui nenhuma estação fluviométrica em atual funcionamento a montante de Santa Cruz do Sul. Na parte alta de seu curso, o rio atravessa a região da Reserva Particular do Patrimônio Natural – RPPN da Universidade de Santa Cruz do Sul, em uma localidade conhecida como Salto do Rio Pardinho, no interior do município de Sinimbu.

Destaque ainda no arroio Lajeadinho, afluente da margem direita do rio Pardinho, na localidade de Serafin Schmidt na divisa dos municípios de Gramado Xavier e Boqueirão do Leão e o rio Pardo na localidade de Costa do Rio no município de Lagoão.

Na bacia hidrográfica do rio Taquari-Anta, municípios de Venâncio Aires e Cruzeiro do Sul, as margens do rio Castelhano e Taquari, respectivamente, que foram fortemente atingidos pelas enchentes que ocorreram no ano de 2024.

O projeto contempla em suas ações relatadas nas metas, linhas de pesquisa que atendam as áreas temáticas relacionadas aos desastres climáticos que atingiram esses municípios.

- ✓ Aspectos das áreas tecnológicas, engenharia, arquitetura, agronomia e infraestrutura na capacidade de resistência a desastres naturais;
- ✓ Atendimento aos riscos decorrentes de desastres climáticos nas comunidades urbana e rural;
- ✓ Desenvolvimento, difusão e adoção de medidas de resiliência e resposta a desastres climáticos;
- ✓ Gerenciamento ecológico de recursos hídricos e naturais através do conhecimento do comportamento dos recursos hídricos, flora e fauna presentes;
- ✓ Agricultura sustentável e resiliente que colabora na orientação e indicação da ocupação e uso do solo, bem como, espécies florestais específicas, voltado as regiões urbanas e rurais;
- ✓ Processos de gestão pública relacionados a resiliência e respostas perante desastres climáticos, na orientação e treinamento de equipes do poder público e
- ✓ Orientação e divulgação das condições presentes em possíveis desastres climáticos, às comunidades e nas escolas de todos os níveis.

Metas adotadas para implantação do projeto nas áreas consideradas:

META 1 – Caracterização de um sistema de monitoramento hidrológico, hidráulico e meteorológico automatizado para gestão dos recursos hídricos e meteorológicos.
META 2 – Monitoramento dos Sinais
META 3 – Respostas Comunidades Afetadas
META 4 – Capacitação quanto a Gestão de Emergências
META 5 – Recuperação de áreas e ações de infraestruturas atuantes nas zonas rurais com origem nos danos causados por eventos extremos.
META 6 – Abastecimento de água e saneamento urbano e rural.
META 7 – Educação e conscientização ambiental.

Resultados esperados

A proposta pretende alcançar, baseado nos objetivos, resultados que contribuam para a qualificação da capacidade de análise e prevenção de riscos em duas universidades comunitárias na Região Funcional de Planejamento 2, a UNISC e UNIVATES, fortalecendo a resiliência regional face aos próximos eventos extremos.
1) Estabelecer a capacidade física para coleta e processamento de dados meteorológicos e hidrológicos de modo contínuo nas bacias do Rio Pardinho e Rio Taquari;
2) Qualificar as iniciativas de pesquisa para a difusão do conhecimento sistemático sobre mudanças climáticas e prevenção de desastres na graduação e pós-graduação nas universidades;
3) Ampliar a produção acadêmica dos programas de pós-graduação para subsidiar instâncias de tomada de decisão coletiva;

4) Identificar e mapear lacunas de conhecimento entre gestores públicos e privados na região para aperfeiçoar as políticas públicas;
5) Promover divulgação científica do conhecimento gerado mediante ações de capacitação em articulação com organizações representativas da sociedade.

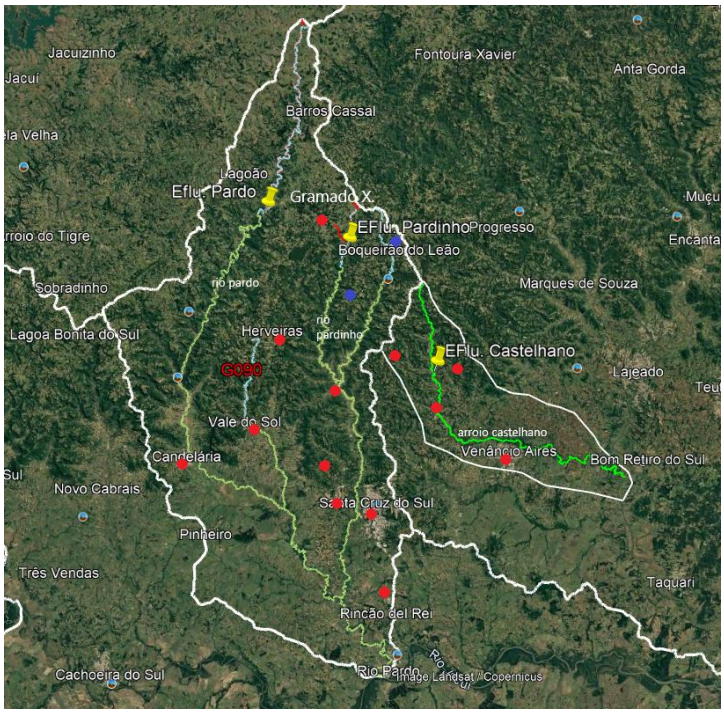


Figura 01: Mapa da região contemplada com as estações meteorológicas e fluviométricas Vale do Rio Pardo e Vale do Rio Taquari. Fonte: Autores (2026)

Referências Bibliográficas

BRASIL.MinistériodaIntegraçãoedoDesenvolvimentoRegional.SecretariadeProteçãoeDefesaCivil.UniversidadeFederaldeSanta Catarina.CentrodeEstudosePesquisasemEngenhariaeDefesaCivil.AtlasDigitaldeDesastresnoBrasil.Brasília:MIDR,2023.Disponí velem:**https://atlasdigital.mdr.gov.br/paginas/institucional.xhtml**.Acessoem3demaiode2025.

BOLAN,S.etal.Impactsofclimatechangeonthefateofcontaminantsthroughextremeweatherevents.ScienceoftheTotalEnvironment, ElsevierBV,v.909,p.168388,jan.2024.ISSN00483-9697.Disponívelem:http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168388

BROSE,MarkusE.MUDANÇASCLIMÁTICASNORIOGRANDEDOSUL:UMADÉCADADERISCOSEINOVAÇÕES.Santa CruzdoSul:EDUNISC,2021,103p.

CCS.ClimateChangeSummit2025.**Summitemmudançasclimáticas.CartadePortoAlegre.**2e3demaio2025.UFRGS.PortoAlegr e,RS.2025.Disponívelem:http://www.climatesummit.com.brAcessoem3dejunho2025.

CORREIODAMANHÃ.AsenchentesdoRioGrandedoSul:orelatóriodoengenheiroHildebrandodeAraújoGóis.RiodeJaneiro,18set. 1941,p.5.Facsímile,BibliotecaNacional.Disponívelem:https://memoria.bn.gov.br/docreader/DocReader.aspx?bib=089842_05& pagfis=11229.Acessoem:20set.2024.

GEOINOVA.MONITORAMENTODOCLIMA:UMAFERRAMENTACRUCIALPARAACONSCIENTIZAÇÃOAMBIENTA L.GeoInova,21Fevereiro2024.Disponívelem:<https://geoinova.com.br/monitoramento-do-clima-uma-ferramenta-crucial-para-a-conscientizacao-ambiental/>.Acesso:31/10/2024.

GRUBER,T.R.Atranslationapproachtoportableontologyspecifications.KnowledgeAcquisition,ElsevierBV,v.5,n.2,p.199– 220,jun.1993.ISSN1042-8143.Disponívelem:<http://dx.doi.org/10.1006/knac.1993.1008>.

INMET.SobreoINMET.InstitutoNacionaldeMeteorologia,2024.Disponívelem:<https://portal.inmet.gov.br/sobre>.Acessoem:30 /10/2024.

GZH.2024.Volumedechuvaemmaiode2024foimaiordoqueodaenchentede1941noRS,dizempesquisadores.GZH.Disponívelem:https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2024/06/volume-de-chuva-em-maio-de-2024-foi-maior-do-que-o-da-enchente-de-1941-no-rs-dizem-pesquisadores-clxp3s7ta01rh012eh9qh1sdw.html#:~:text=Outra%20diferen%C3%A7a%20identificada%20pelos%20pesquisadores,2024%20do%20que%20em%201941.Acessoem:21/08/2024.

KIM,J.;HAN,Y.;HAHN,H.Image-basedwaterlevelmeasurementmethodunderstainedruler.2010.

KOTZIAN,HenriqueB.;PEREIRA,Daniel;MOTTAMARQUES,DavidM.L.da.ZoneamentoAmbientaldaBaciadoRioPardinho(RS,Brasil).XVSimpósioBrasileirodeRecursosHídricos,Curitiba,2003,18p.

MORAES,O.L.L.;AGUILAR-MUÑOZ,V.;NOBRE,C.;ORSINI,J.;ALVALÁ,R.C.S. A CompositeIndextoEstimateLossesandDamagesDuetoNaturalHazardsintheBRICSCountries.Disponívelem::**http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5011221**Acessoem:3demaiode2025.

MURRAY,V.etal.HazardInformationProfiles:SupplementtoUNDRR-ISCHazardDefinition&ClassificationReview:TechnicalReport:Geneva,Switzerland,UnitedNationsOfficeforDisasterRiskReduction;Paris,France,2021.Disponívelem:**https://council.science/wp-content/uploads/2020/06/Hazard-Information-Profiles-Supplement-to-UNDRR-ISC-Hazard-Definition-Classification-Review-Technical-Report-2021.pdf**Acessoem:3demaiode2025.

OLIVEIRA,G.G.Análiseespacialdodesastrehidrológicoocorridonaporçãocentraldo RioGrandedoSulemjaneirode2010.Encontro NacionaldeDesastres,4p.25a27dejulho.PortoAlegre.2022.

PIELKE,R.A.,etal.ClarifyingtheAttributionofRecentDisasterLosses:AResponsetoEpsteinandMcCarthy.BulletinoftheAmerican MeteorologicalSociety86(10),1481–83.(2005).Disponívelem:**http://www.jstor.org/stable/26221370**Acessoem:3May2025.
PublicEM-DATA.Dadoslevantadosnafonte.Disponívelporbuscaem:**https://public.emdat.be/data**Acessoem:3demaiode2025.

SEMA,SecretariadoMeioAmbientedoEstadodoRioGrandedoSul.Disponívelem:https://www.sema.rs.gov.br/bacias-hidrograficas.Acessoem27/10/2024.

TORRES,L.H.Águasdemaio:aenchentede1941emRioGrande.Historiæ,RioGrande,v.3,n.3,p.239-254,2012.

VALENTE,PedroTeixeira.EventosextremosdeprecipitaçãonoRioGrandedoSulnoSéculoXXapartirdedadosdereanáliseeregistros históricos.DissertaçãodeMestrado,PortoAlegre:UFRGS,2018,100p.

VLASCEANU,M.etal.Addressingclimatechangewithbehavioralscience:Aglobalinterventiontournamentin63countries.Sci.Adv.10(6),eadj5778(2024).Disponívelem:**https://doi.org/10.1126/sciadv.adj5778**Acessoem:3demaiode2025.

WAINWRIGHT,T.etal.Opendataplatformsfortransformationalentrepreneurship:Inclusionandexclusionmechanisms.InternationalJournalofInformationManagement,ElsevierBV,v.72,p.102664,out.2023.ISSN0268-4012.Disponívelem:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2023.102664>.

ANÁLISE DA ESTRUTURA LEGAL E ADMINISTRATIVA DA GESTÃO DE RISCOS E DESASTRES SOCIOAMBIENTAIS: O CASO DOS MUNICÍPIOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO HERCÍLIO EM SANTA CATARINA

1 Grazielly Büchling, 2 Rogério Simões, 3 João Marcos Bosi Mendonça de Moura

1 Universidade do Estado de Santa Catarina, e-mail: grazielly.buchling@edu.udesc.br; 2 Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), e-mail: rogerio.simoes@udesc.br; 3 Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), e-mail: joao.moura@udesc.br.

Palavras-chave: Desastres socioambientais; Gestão de riscos; Plano de contingência.

Introdução

A importância da Proteção e Defesa Civil vem crescendo a cada desastre socioambiental que ocorre nos municípios, especialmente em regiões onde há maior propensão natural a inundações e movimentos gravitacionais de massa. Nos últimos anos, Santa Catarina registrou eventos extremos significativos, sendo o Alto Vale do Itajaí uma das regiões mais afetadas do estado. O Alto Vale do Itajaí com mais de vinte municípios recorrentemente é atingido por inundações consideráveis que provocam danos à infraestrutura urbana, interrupções de serviços essenciais e significativo desalojamento de pessoas, prejudicando diretamente a segurança e a qualidade de vida das comunidades locais. O Alto Vale do Itajaí é considerado uma região com maior possibilidade de eventos extremos de cheia devido as suas características geomorfológicas (Marcuzzo *et al.*, 2011). O Alto Vale do Itajaí faz parte da bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu que é composto por sub-bacias localizadas na região, como o Rio Hercílio, Rio Itajaí do Sul e Rio Itajaí do Oeste.

O rio Hercílio possui 185 km de comprimento, considerando trecho da sua nascente, no município de Papanduva/SC, até o deságue no rio Itajaí-Açu. A bacia hidrográfica do rio Hercílio possui área aproximada de 3.354 km e nela está localizada uma das maiores barragens de contenção de cheias (Barragem Norte) já construída no Brasil. Localizada no município de José Boiteux/SC a estrutura tem capacidade de armazenar cerca de 357 milhões de metros cúbicos de água (Comitê do Itajaí, 2010). No ano de 2023, alguns municípios de bacia hidrográfica do rio Hercílio foram atingidos por vários eventos de movimento de massa, alagamentos e inundações. Destaca-se que nesse mesmo ano a Barragem Norte atingiu sua capacidade máxima de armazenamento, com ocorrência de vertimento pela primeira vez desde o início de sua operação, em 1992. Esse evento evidencia a magnitude das inundações na região e reforça a necessidade de atuação eficaz dos órgãos de proteção e defesa civil, como as Coordenadorias Municipais de Proteção e Defesa Civil (COMPDEC), bem como da elaboração e implementação de instrumentos como o Plano Municipal de Contingência (PLAMCON), voltados ao enfrentamento de desastres socioambientais, especialmente as inundações. O PLAMCON configura-se como um documento técnico-operacional essencial, ao estabelecer diretrizes, procedimentos e responsabilidades para a atuação em situações de emergência, além de demandar a existência e consolidação de uma estrutura legal e institucional adequada nos municípios inseridos na bacia do rio Hercílio.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar a estrutura legal e administrativa dos municípios localizados na bacia hidrográfica do rio Hercílio, em Santa Catarina — Dona Emma, Ibirama, Itaiópolis, José Boiteux, Papanduva, Presidente Getúlio, Santa Terezinha, Vitor Meireles e Witmarsum —, buscando compreender de que forma as legislações municipais e os planos de contingência estão estruturados. Ao articular essa análise com o cenário de intensificação dos desastres, o trabalho pretende contribuir para o aprimoramento das políticas públicas locais, fortalecendo a governança do risco e a capacidade adaptativa dos municípios frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

A relevância deste estudo se intensifica no contexto das mudanças climáticas, que têm contribuído para o aumento da frequência e da intensidade de eventos hidrológicos extremos, como cheias e enxurradas, ampliando a exposição e a vulnerabilidade dos municípios. Nesse cenário, a capacidade de resposta e adaptação das administrações locais passa a depender não apenas de ações emergenciais, mas também da solidez de seus marcos legais, instrumentos de planejamento e arranjos institucionais. Assim, analisar a estrutura legal e administrativa dos municípios torna-se fundamental para compreender o nível de preparação frente a esses eventos e identificar lacunas que possam comprometer a gestão de riscos.

A análise em nível de bacia hidrográfica justifica-se pelo fato de que a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997) estabelece a bacia como unidade territorial de planejamento e gestão. Essa abordagem permite uma compreensão integrada dos processos institucionais, considerando as interdependências entre os municípios inseridos em uma mesma bacia hidrográfica. Dessa forma, a avaliação da estrutura legal e administrativa no contexto da bacia do rio Hercílio possibilita identificar não apenas fragilidades individuais, mas também desafios e oportunidades de articulação regional, fundamentais para o fortalecimento da governança do risco e para a implementação de estratégias mais eficazes de adaptação às mudanças climáticas.

Material e Método

O levantamento de dados e informações legislativas de cada município foi realizado por meio de pesquisa documental nos sites institucionais das prefeituras, contemplando planos diretores, planos de contingência, legislações vigentes e demais

instrumentos normativos relacionados à defesa civil e à gestão de riscos. Complementarmente, foram consultados artigos científicos para embasar a elaboração do trabalho, a partir de buscas no Google Acadêmico com as palavras-chave: desastres naturais, desastres socioambientais, defesa civil, rio Hercílio, rio Itajaí do Norte, enchentes, análise do plano de contingência, gestão de riscos e desastres, Barragem Norte, bacia hidrográfica e desastres naturais no Alto Vale. A área de estudo compreende os municípios inseridos na bacia do rio Hercílio, conforme delimitação proposta pelo Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí (Comitê do Itajaí, 2010). Ressalta-se que foram incluídos na análise todos os municípios que possuem parte de seu território inserido na bacia, não se restringindo apenas àqueles cujo centros administrativos se localizam integralmente dentro de seus limites. Essa abordagem amplia a compreensão das dinâmicas territoriais e institucionais, considerando a influência hidrológica e administrativa exercida pela bacia sobre diferentes porções municipais. Foram analisados critérios como a existência de órgãos municipais de defesa civil, a presença de legislações específicas (leis ordinárias, complementares e orgânicas), a existência de plano diretor e de plano municipal de contingência. Os dados coletados foram organizados em uma tabela comparativa, permitindo a visualização sistematizada das estruturas legais e administrativas dos municípios, bem como a identificação de padrões, lacunas e assimetrias no contexto da gestão de riscos e desastres.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos a partir da análise da estrutura legal e administrativa dos municípios da bacia do rio Hercílio indicam que, embora todos possuam instrumentos normativos básicos (como Lei Orgânica, leis complementares e Plano Diretor), há lacunas importantes no que se refere à incorporação explícita de diretrizes voltadas à gestão de áreas de risco e à prevenção de desastres socioambientais. Tal constatação evidencia um desalinhamento parcial com a Lei Federal nº 12.608/2012 (Brasil, 2012), que institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) e atribui aos municípios a responsabilidade de planejar, coordenar e executar ações de prevenção, preparação, resposta e recuperação, incluindo a elaboração e atualização do Plano Municipal de Contingência (PLAMCON) e a identificação de áreas de risco.

No âmbito da estrutura administrativa, observa-se que todos os municípios analisados possuem formalmente instituídas suas Coordenadorias Municipais de Proteção e Defesa Civil, o que representa um avanço institucional relevante, embora a pesquisa não entre no mérito sobre o grau de mobilização e efetividade dos trabalhos dessas coordenadorias. No entanto, a análise da Tabela 1 revela assimetrias significativas quanto à existência, disponibilidade e atualização dos Planos de Contingência. Enquanto municípios como Itaiópolis, José Boiteux, Presidente Getúlio, Vitor Meireles e Ibirama apresentam e disponibilizam ao público o PLAMCON, outros municípios como Dona Emma, Papanduva, Santa Terezinha e Witmarsum não tiveram seus planos localizados na pesquisa, o que pode refletir tanto a inexistência do documento quanto limitações relacionadas à transparência e à gestão da informação.

Municípios da bacia do rio Hercílio, Santa Catarina	Legislação municipal que institui COMPDEC ou congênere	Plano de Contingência está disponível ao público? (PLAMCON)	Há revisão periódica do PLAMCON?
Dona Emma	Lei nº 1432/2013 (Dona Emma, 2013)	Não	Não
Itaiópolis	Lei nº 369/2010 (Itaiópolis, 2010)	Sim	Não
José Boiteux	Lei Orgânica do município (José Boiteux, 2022)	Sim	Não
Papanduva	Lei nº 1444/1997 (Papanduva, 1997)	Não	Não
Presidente Getúlio	Lei nº 2931/2013 (Presidente Getúlio, 2013)	Sim	Não
Santa Terezinha	Lei nº 27/2014 (Santa Terezinha, 2014)	Não	Não
Vitor Meireles	Lei nº 0848/2013 (Vitor Meireles, 2013)	Sim	Não
Witmarsum	Lei nº 1506/2017 (Witmarsum, 2017)	Não	Não
Ibirama	Lei nº 3.810/2025 (Ibirama (2025)	Sim	Sim

Tabela 1: Comparativos da estrutura legal e administrativa dos municípios da bacia do rio Hercílio. Fonte: Autores (2026).

A Tabela 1 também evidencia que, mesmo entre os municípios que possuem PLAMCON, a prática de revisão periódica ainda é incipiente, conforme as consultas realizadas na internet. O município de Ibirama destaca-se positivamente por apresentar evidências de atualização contínua do plano, indicando maior maturidade institucional e alinhamento com boas práticas de gestão de riscos, uma vez que a revisão periódica é fundamental para incorporar novos cenários, atualizar dados e aprimorar estratégias de resposta. Nos demais municípios, a ausência de informações sobre revisões sugere possível desatualização dos planos, o que pode comprometer sua efetividade em situações reais de emergência.

Outro aspecto relevante diz respeito à transparência e ao acesso à informação. Conforme estabelece a Lei Federal nº 12.527/2011 - Lei de Acesso à Informação (Brasil, 2011), documentos públicos devem ser disponibilizados de forma clara e acessível à população. Nesse sentido, a dificuldade de acesso aos PLAMCONs em alguns municípios representa uma fragilidade institucional, especialmente considerando que esses documentos são fundamentais para orientar a população quanto a rotas de fuga, pontos de abrigo e procedimentos de segurança em situações de desastre.

Esse cenário torna-se ainda mais crítico quando considerado o contexto climático regional, frequentemente influenciado por eventos como o El Niño, que tendem a intensificar os volumes de precipitação no Sul do Brasil, aumentando a probabilidade de inundações e movimentos de massa na bacia do rio Hercílio. A ocorrência ou previsão desses eventos reforça a necessidade de estruturas institucionais robustas, planos atualizados e sistemas de resposta eficientes. Assim, a ausência ou fragilidade de instrumentos como o PLAMCON, bem como a falta de sua revisão periódica, pode ampliar significativamente os riscos e impactos negativos associados a eventos extremos.

Considerações Finais

De forma geral, os resultados evidenciam uma heterogeneidade significativa na capacidade institucional dos municípios frente à gestão de riscos e desastres, revelando avanços formais importantes (como a existência de estruturas administrativas), mas também lacunas críticas relacionadas à efetividade dos instrumentos de planejamento, especialmente no que se refere à elaboração, atualização e transparência dos Planos Municipais de Contingência. Essas fragilidades comprometem não apenas a capacidade de resposta em situações de emergência, mas também a prevenção e a preparação, etapas fundamentais para a redução de riscos. A ausência ou desatualização de planos, aliada à dificuldade de acesso público às informações, indica que parte dos municípios ainda enfrenta desafios na consolidação de uma governança do risco estruturada e alinhada às diretrizes nacionais.

Nesse contexto, torna-se imprescindível fortalecer as estruturas locais de proteção e defesa civil, com ênfase na integração entre instrumentos legais, planejamento contínuo e qualificação da gestão da informação. Portanto, não é suficiente que exista uma COMPEDEC, mas que haja condições de governança qualificada para o enfrentamento dos desastres socioambientais de maneira articula em toda a bacia hidrográfica. A incorporação sistemática de variáveis climáticas nos processos decisórios, especialmente diante da intensificação de eventos extremos, como aqueles associados ao El Niño, é fundamental para aumentar a resiliência dos municípios. Assim, mais do que a existência formal de instrumentos, é necessário garantir sua efetiva implementação, atualização periódica e acessibilidade, de modo a promover uma gestão de riscos mais eficiente, transparente e capaz de proteger a população frente aos crescentes desafios socioambientais.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Programa de Iniciação à Pesquisa da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) por meio da concessão de bolsa à primeira autora.

Referências Bibliográficas

BRASIL. **Lei nº 12.527, de 18 de novembro de 2011**. Regula o acesso a informações previsto no inciso XXXIII do art. 5º, no inciso II do § 3º do art. 37 e no § 2º do art. 216 da Constituição Federal. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 221, p. 1–4, 18 nov. 2011. Disponível em: https://www.gov.br/imprensanacional/pt-br
. Acesso em: 29 abr. 2026.

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: seção 1, Brasília, DF, n. 71, p. 1, 11 abr. 2012. Disponível em: https://www.gov.br/imprensanacional/pt-br
. Acesso em: 28 abr. 2026.

COMITÊ DO ITAJAÍ. **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Itajaí**: caderno síntese. Blumenau: Fundação Agência de Água do Vale do Itajaí, 2010. Disponível em: https://www.aguas.sc.gov.br
. Acesso em: 24 abr. 2026.

DONA EMMA (SC). **Lei nº 1.432, de 22 de outubro de 2013**. Cria o Sistema Municipal de Proteção e Defesa Civil (SIMPDEC) e dá outras providências. Dona Emma, SC, 2013. Disponível em: https://leis.org/municipais/sc/dona-emma/lei/lei-ordinaria/2013/1432/lei-ordinaria-n-1432-2013-cria-o-sistema-municipal-de-protecao-e-defesa-civil-simpdec-o-conselho-municipal-de-protecao-e-defesa-civil-compdec-o-fundo-municipal-de-protecao-e-defesa-civil-fumpdec-e-a-coordenadoria-municipal-de-protecao-e-defesa-civil-coompdec-do-municipio-de-dona-emma-e-estabelece-outras-providencias
. Acesso em: 30 abr. 2026.

IBIRAMA (SC). **Lei nº 3.810, de 23 de setembro de 2025**. Dispõe sobre a regulamentação da Lei Federal nº 12.608/2012 no município de Ibirama. Diário Oficial dos Municípios de Santa Catarina, Ibirama, SC, 24 set. 2025. Disponível em: https://s3cache.dom.sc.gov.br/edicoes/2025/09/1758733231_edicao_4949_assinada.pdf
. Acesso em: 30 abr. 2026.

JOSÉ BOITEUX. **Lei Orgânica do Município de José Boiteux**. José Boiteux, SC: Câmara Municipal, [2022]. Disponível em: https://www.camarajoseboiteux.sc.gov.br/dados/pastaarquivo/lei-organica.pdf. Acesso em: 1 maio 2026.

ITAIÓPOLIS (SC). **Lei Ordinária nº 369, de 8 de junho de 2010**. Cria a Coordenadoria Municipal de Defesa Civil (COMDEC) do município de Itaiópolis. Itaiópolis, SC, 2010. Disponível em: https://itaiopolis.sc.gov.br/legislacao/norma-26749/
. Acesso em: 30 abr. 2026.

MARCUZZO, Francisco F. N.; CARDOSO, Murilo R. D.; FILHO, Ricardo Pinto; ROMERO, Vanessa. Caracterização hidromorfológica da bacia do Vale do Itajaí. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. **Anais** [...]. Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/79/END181.pdf
. Acesso em: 22 abr. 2026.

PAPANDUVA (SC). **Lei nº 1.444, de 1997**. Cria a Comissão Municipal de Defesa Civil (COMDEC) do município de Papanduva. Diário Oficial dos Municípios de Santa Catarina, Papanduva, SC, 1997. Disponível em: https://www.camarapapanduva.sc.gov.br
. Acesso em: 30 abr. 2026.

PRESIDENTE GETÚLIO (SC). **Lei nº 2.931, de 4 de junho de 2013**. Cria o Sistema Municipal de Defesa Civil (SIMDEC) e dá outras providências. Diário Oficial dos Municípios de Santa Catarina, Presidente Getúlio, SC, 4 jun. 2013. Disponível em: https://www.camarapresidentegetulio.sc.gov.br
. Acesso em: 30 abr. 2026.

SANTA TEREZINHA (SC). **Lei Complementar nº 27, de 2014**. Dispõe sobre a estrutura administrativa do município. Diário Oficial dos Municípios de Santa Catarina, Santa Terezinha, SC, 2014. Disponível em: https://leismunicipais.com.br
. Acesso em: 30 abr. 2026.

VITOR MEIRELES (SC). **Lei nº 848, de 27 de maio de 2013**. Cria a Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil (COMPDEC). Diário Oficial dos Municípios de Santa Catarina, Vitor Meireles, SC, 27 maio 2013. Disponível em: https://leismunicipais.com.br
. Acesso em: 30 abr. 2026.

WITMARSUM (SC). **Lei nº 1.506, de 7 de março de 2017**. Cria a Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil (COMPDEC). Diário Oficial dos Municípios de Santa Catarina, Witmarsum, SC, 7 mar. 2017. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/a/sc/w/witmarsum/lei-ordinaria/2017/150/1506/lei-ordinaria-n-1506-2017-cria-a-coordenadoria-municipal-de-protecao-e-defesa-civil-compdec-e-da-outras-providencias
. Acesso em: 30 abr. 2026.

ANÁLISE DAS ARQUITETURAS DE REDES NEURAIS APLICADAS À PREVISÃO DE ENCHENTES: UMA REVISÃO DE TRABALHOS RECENTES

1 Pedro Rodrigues Dourado, 2 João Marcos Bosi Mendonça de Moura
1 Universidade do Estado de Santa Catarina, e-mail: pedrordourado@gmail.com; 2 Universidade do Estado de Santa Catarina, e-mail: joao.moura@udesc.br

Palavras-chave: Redes Neurais; Gestão de Riscos e Desastres; Redução de Riscos e Desastres

Introdução

Os desastres hidrológicos, especialmente as inundações, representam a maioria das catástrofes naturais registradas globalmente, afetando milhões de pessoas anualmente e gerando prejuízos econômicos que ultrapassam trilhões de dólares (Souza; Silva, 2025). No Brasil, esse cenário não é diferente. Entre 1991 e 2012, as inundações representaram 12% de todos os desastres naturais, consolidando-se como uma das três principais causas de eventos catastróficos no país (Souza; Silva, 2025). Atualmente, fatores como a urbanização desordenada, a impermeabilização do solo e as mudanças climáticas têm tornado esses eventos cada vez mais frequentes e severos, exigindo respostas mais rápidas e eficientes por parte da gestão pública (Souza; Silva, 2025).

Prever esses eventos com precisão, no entanto, é um grande desafio técnico. De acordo com Maddodi *et al*. (2026) o comportamento de uma bacia hidrográfica é extremamente complexo e depende de muitas variáveis que não seguem um padrão simples. Por muito tempo, a engenharia dependeu exclusivamente de modelos físicos tradicionais, baseados em equações matemáticas complexas. Embora esses modelos sejam fundamentais, eles possuem limitações importantes: costumam ser lentos para processar, exigem um custo computacional elevado e precisam de uma quantidade enorme de dados locais (Maddodi *et al*., 2026).

Neste cenário, a Inteligência Artificial (IA) surge como uma alternativa eficiente e de alta performance (Kumar; Pradhan; Tyagi, 2024). Diferente dos modelos físicos tradicionais, as ferramentas de IA, com destaque para as Redes Neurais, utilizam uma abordagem orientada a dados (Refadah, 2025). Isso permite que os algoritmos identifiquem padrões complexos entre os índices de chuva e a elevação do nível dos rios a partir do processamento de séries históricas, entregando previsões rápidas mesmo em situações de alta incerteza (Chowdhury *et al*., 2026). Com o avanço do Deep Learning, surgiram arquiteturas como as redes LSTM (Long Short-Term Memory), que possuem uma capacidade superior para processar sequências temporais, tornando-se a principal referência tecnológica para a previsão de cheias na literatura atual, conforme explicam Duangkhwan *et al*. (2026) e Onsaya, Bulao e Rabajante (2025).

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho é analisar as principais arquiteturas de redes neurais aplicadas à previsão de inundações, a partir de uma revisão de artigos recentes publicados em 2026. Busca-se identificar as abordagens mais utilizadas, suas características, vantagens e limitações, bem como compreender tendências emergentes no uso de técnicas de aprendizado de máquina no domínio hidrológico. Além disso, pretende-se discutir como diferentes tipos de dados de entrada têm influenciado o desenvolvimento desses modelos, contribuindo para avanços na previsão de cheias e, por consequência, no estabelecimento de sistemas de alerta eficazes para a sociedade.

Material e método

Na etapa de coleta de dados, foi realizada uma busca na base ScienceDirect, considerando apenas publicações do ano de 2026. Foram utilizadas como critérios de busca as palavras-chave “machine learning AND neural network AND flood forecasting”, com o objetivo de identificar estudos que integrassem explicitamente essas três dimensões. A partir dessa busca, selecionaram-se os primeiros 100 artigos elencados pela plataforma, sendo observado que os demais listados possuíam menor aderência temática. Em seguida, foi realizada uma triagem baseada na leitura dos títulos, resumos e conclusões, resultando na exclusão de artigos que não abordavam simultaneamente os três termos definidos como objeto de estudo. Ao final desse processo, 78 artigos foram considerados elegíveis e compuseram o corpo analisado neste estudo.

Resultados e Discussões

A análise das arquiteturas de redes neurais identificadas nos 78 artigos evidencia uma predominância expressiva de modelos baseados em LSTM (37,1%), o que pode ser diretamente associado às características intrínsecas desse tipo de rede. De acordo com Sharma *et al*. (2025) e Chu *et al.* (2024), a LSTM se destaca por sua capacidade de mitigar o problema do gradiente dissipado, permitindo que o modelo aprenda dependências temporais de longo prazo. No contexto da previsão de cheias, essa propriedade é essencial, uma vez que a vazão em um determinado instante t é frequentemente resultado acumulado de eventos de precipitação ocorridos em múltiplos instantes anteriores (t−n), dinâmica que modelos tradicionais têm dificuldade em representar com precisão. Em seguida, de acordo com Fathi *et al*. (2025), observa-se uma presença relevante de redes CNN (20,2%), indicando uma tendência complementar no campo: a incorporação de informações espaciais no processo de previsão. Esse movimento está associado a uma mudança no paradigma de entrada de dados, identificada na amostra analisada. Diversos estudos recentes abandonam a dependência exclusiva de dados provenientes de estações fluviométricas locais, frequentemente

escassas, especialmente em regiões em desenvolvimento, e passam a utilizar produtos de sensoriamento remoto e dados de satélite, como os provenientes do GPM (Global Precipitation Measurement). Nesse contexto, as CNN desempenham um papel fundamental ao processar mapas espaciais e extrair padrões relacionados à nebulosidade, precipitação e umidade do solo (Gilbert; Shi, 2026) e (Malik *et al.*, 2026). Essa integração entre dados de satélite e arquiteturas convolucionais permite a construção de modelos em escala regional, superando limitações geográficas de sensores terrestres e ampliando a capacidade de monitoramento e resposta em sistemas de gestão de desastres (Wang *et al*., 2025). De forma geral, os resultados indicam não apenas a dominância de arquiteturas recorrentes, mas também uma evolução metodológica marcada pela integração entre dimensões temporais e espaciais na previsão de enchentes.

Além da predominância de LSTM e do papel crescente das CNN, outras arquiteturas também apresentam contribuições relevantes e ajudam a compreender a diversidade metodológica da área (Xu *et al*., 2026) e (Yuan *et al.*, 2025). As redes recorrentes tradicionais (RNN), que representam 9% da amostra, aparecem como uma base conceitual importante para a modelagem temporal. No entanto, sua menor frequência em relação às LSTM pode ser explicada por suas limitações conhecidas, especialmente a dificuldade em capturar dependências de longo prazo devido ao problema do gradiente dissipado, o que reduz sua eficácia em séries hidrológicas mais complexas (Maddah *et al*., 2025). Já os modelos MLP/ANN (7,9%) permanecem presentes principalmente como abordagens mais simples e de menor custo computacional, sendo aplicados em cenários com menor complexidade ou como modelos de referência. Contudo, por não incorporarem explicitamente dependências temporais ou espaciais, tendem a apresentar desempenho inferior em problemas dinâmicos como a previsão de cheias.

As redes GRU (7,9%), por sua vez, surgem como uma alternativa mais eficiente às LSTM, mantendo a capacidade de modelar dependências temporais de longo prazo, porém com uma arquitetura mais simplificada e menor número de parâmetros. Isso as torna particularmente atrativas em aplicações que exigem menor custo computacional ou em cenários com conjuntos de dados mais limitados. Segundo Humphries, Waqas e Ahmad (2026), as Graph Neural Networks (GNN) (6,7%) refletem um avanço importante na representação da estrutura espacial de bacias hidrográficas, permitindo modelar explicitamente as relações topológicas entre diferentes pontos de medição, como rios e afluentes. Essa abordagem é especialmente promissora, pois a dinâmica de enchentes é intrinsecamente conectada à rede de drenagem, algo que modelos tradicionais frequentemente abstraem de forma limitada.

Os operadores neurais (6,7%), como Fourier Neural Operators (FNO) e DeepONet, representam uma tendência emergente ao propor uma mudança de paradigma: em vez de aprender relações ponto a ponto, esses modelos aprendem operadores que mapeiam funções inteiras, aproximando diretamente soluções de equações diferenciais que governam processos físicos (Zhang *et al*., 2026) e Xu *et al*. (2024). No contexto hidrológico, isso permite uma aproximação mais próxima dos modelos baseados em física, porém com maior eficiência computacional, sendo especialmente promissores para simulações em larga escala. Por fim, as redes baseadas em Kolmogorov–Arnold Networks (KAN) (2,2%) aparecem ainda de forma incipiente, indicando um estágio inicial de adoção (Taghizadeh et al., 2026). Essas redes utilizam funções baseadas em *splines* para aproximar relações não lineares, oferecendo potencial para modelagem mais interpretável e eficiente, embora ainda necessitem de maior consolidação na literatura aplicada à previsão de cheias (Wang; Fu; Luo, 2026; Taghizadeh et al., 2026).

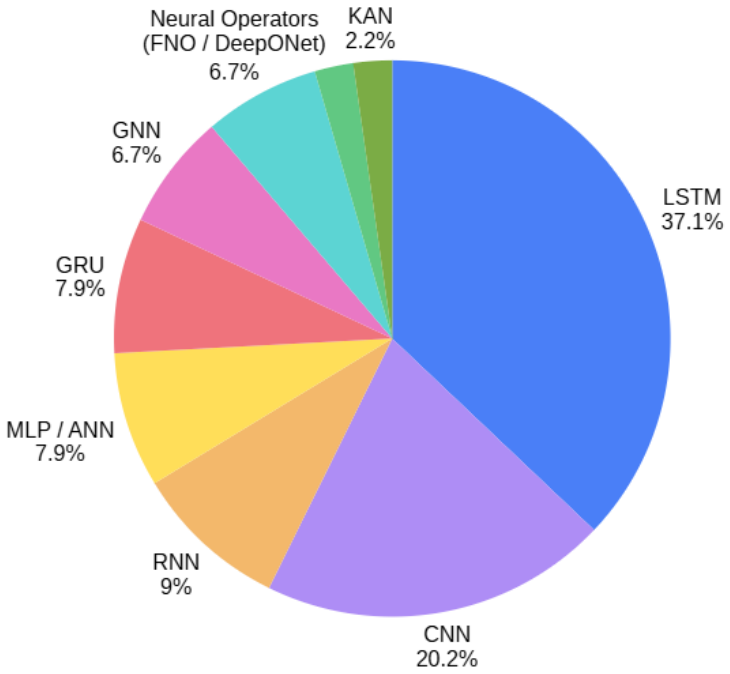


Figura 01: Distribuição das arquiteturas de redes neurais identificadas nos 78 artigos selecionados sobre previsão de enchentes (2026).
Fonte: Autor (2026)

Considerações

Os resultados deste estudo evidenciam avanços significativos no uso de redes neurais para a previsão de enchentes, com destaque para a predominância de arquiteturas recorrentes e a crescente integração de dados espaciais provenientes de sensoriamento remoto. No entanto, uma limitação importante observada refere-se à distribuição geográfica dos estudos analisados. Dos 100 artigos inicialmente selecionados, apenas 2 abordavam regiões do hemisfério sul, revelando uma forte concentração de pesquisas em países do hemisfério norte. Tal lacuna indica a necessidade de ampliar investigações em contextos sub-representados, especialmente em países em desenvolvimento, onde os impactos das enchentes tendem a ser mais severos e os sistemas de monitoramento mais limitados. Além disso, os achados reforçam a importância de futuras pesquisas que integrem diferentes fontes de dados, considerem variabilidades regionais e avancem na construção de modelos mais robustos, interpretáveis e adaptáveis a diferentes cenários hidrológicos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Programa de Iniciação à Pesquisa da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) por meio da concessão de bolsa ao primeiro autor.

Referências Bibliográficas

CHOWDHURY, Saif Tasnim *et al*. A systematic review of flood prediction (2018-2025): Flood categories, input features, and Machine Learning, Deep Learning and hybrid approaches. **Watershed Ecology and the Environment**, [s. l.], v. 8, p. 185-207, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.wsee.2026.03.002. Acesso em: 30 abr. 2026.

CHU, W. *et al*. SHAP-powered insights into spatiotemporal effects: Unlocking explainable Bayesian-neural-network urban flood forecasting. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [s. l.], v. 131, art. 103972, p. 1-14, jun. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103972. Acesso em: 30 abr. 2026.

DUANGKHWAN, Weeraphat *et al*. Enhancing flood forecasting with deep learning: A scalable alternative to traditional hydrodynamic models. **Environmental Modelling and Software**, [Oxford], v. 197, 106841, 2026. Disponível em: lstmhttps://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106841. Acesso em: 30 abr. 2026.

FATHI, Mohamed M. *et al*. Spatiotemporal flood depth and velocity dynamics using a convolutional neural network within a sequential Deep-Learning framework. **Environmental Modelling & Software**, [s. l.], v. 185, art. 106307, p. 1-11, mar. 2025

GILBERT, Katabarwa Murenzi; SHI, Qian. Interpretable ensemble machine learning for flood susceptibility mapping in Lagos Lagoon, Nigeria. **Journal of African Earth Sciences**, [s. l.], v. 240, art. 106130, p. 1-15, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2026.106130. Acesso em: 30 abr. 2026.

HUMPHRIES, Usa Wannasingha; WAQAS, Muhammad; AHMAD, Shakeel. Novel deep learning framework for rainfall forecasting integrating generative adversarial and spatiotemporal graph neural networks. **Results in Engineering**, [s. l.], v. 29, art. 108616, p. 1-18, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108616. Acesso em: 30 abr. 2026

KUMAR, Guru Dayal; PRADHAN, Kalandi Charan; TYAGI, Shekhar. Deep Learning Forecasting: An LSTM Neural Architecture based Approach to Rainfall and Flood Impact Predictions in Bihar. **Procedia Computer Science**, [Amsterdam], v. 235, p. 1455-1466, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.04.137. Disponível em: https://www.sciencedirect.com. Acesso em: 30 abr. 2026.

MADDAH, Shadi *et al*. Assessment of a family of recurrent neural network models for flood susceptibility Mapping: An explainable glass-box approach. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, [s. l.], v. 160, art. 111867, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.111867. Acesso em: 30 abr. 2026.

MADDODI, B. S. *et al*. Advances and challenges in Artificial Intelligence-driven flood and drought risk management: A comprehensive review. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, [s. l.], v. 164, p. 113354, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.113354. Disponível em: https://www.elsevier.com/locate/engappai. Acesso em: 30 abr. 2026

MALIK, Haider *et al*. A data-driven and expert flood knowledge model based on the development of the Huber loss function for flood forecasting. **Water Research**, [s. l.], v. 288, art. 124632, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.124632. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135425124632. Acesso em: 30 abr. 2026.

ONSAYA, Emmanuel A.; BULAO, Rolan Jon G.; RABAJANTE, Jomar F. Bagyong Kristine (TS Trami) in bicol, Philippines: Flood risk forecasting, disaster risk preparedness predictions and lived experiences through machine learning (ML), econometrics, and hermeneutic analysis. **Natural Hazards Research**, [s. l.], v. 5, p. 644-677, 2025. Disponível em:

https://doi.org/10.1016/j.nhres.2025.02.004. Acesso em: 30 abr. 2026.

REFADAH, Samyah Salem. Development in flood forecasting: a comprehensive review of complex and machine learning models. **Physics and Chemistry of the Earth**, [s. l.], v. 139, 103975, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.pce.2025.103975. Acesso em: 30 abr. 2026.

SHARMA, Vinod Kr. *et al*. Integration of recurrent neural network models and flood inundation extent libraries for flood forecasting. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [s. l.], v. 39, 101649, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101649. Acesso em: 30 abr. 2026.

SOUZA, Ícaro Andrade; SILVA, Vinícius de Amorim. Flood prediction in Brazil: A review of trends, gaps and methodological perspectives. **Journal of South American Earth Sciences**, [s. l.], v. 164, 105637, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105637. Disponível em: www.elsevier.com/locate/jsames. Acesso em: 30 abr. 2026.

TAGHIZADEH, Mehdi *et al*. FloodForecaster: A domain-adaptive geometry-informed neural operator framework for rapid flood forecasting. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 664, 134512, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134512. Acesso em: 30 abr. 2026.

WANG, Mo *et al*. A cross-city transferable convolutional neural network framework for assessing street-scale flood risks in urban networks. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 395, art. 127977, p. 1-12, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127977. Acesso em: 30 abr. 2026.

WANG, Tianlian; FU, Zhiyuan; LUO, Manya. Deep learning for decoding climate-urbanization synergies: flood susceptibility forecasting under SSP-RCP scenarios in Beijing, China. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 672, art. 135364, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2026.135364. Disponível em: https://www.elsevier.com/locate/jhydrol. Acesso em: 30 abr. 2026.

XU, Hanbing *et al*. Elevating predictive reliability: time-varying parameter bayesian deep learning techniques for flood probability forecasting. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 664, p. 1-15, nov. 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134597. Disponível em: https://www.elsevier.com/locate/jhydrol. Acesso em: 30 abr. 2026

XU, Qingsong *et al*. Large-scale flood modeling and forecasting with FloodCast. **Water Research**, [Oxford], v. 264, 122162, Oct. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122162. Acesso em: 30 abr. 2026.

YUAN, Ximin et al. A novel hybrid SCS-LSTM model for intelligent flood forecasting in data-scarce small mountainous catchments. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, [s. l.], v. 61, 102611, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102611. Acesso em: 30 abr. 2026.

ZHANG, Jiru *et al*. API-DONet: A knowledge-guided deep neural operator network for flood forecasting. **Information Processing and Management**, [s. l.], v. 63, 104693, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ipm.2026.104693. Acesso em: 30 abr. 2026.

PADRÕES ESPACIAIS DE MOVIMENTOS DE MASSA EM VERANÓPOLIS (RS): ANÁLISE POR DENSIDADE KERNEL

1 Daiana Rodrigues, 2 Ana Paula da Cruz Santos, 3 Daniela Müller de Quevedo, 4 Roberta Plangg Riegel, 5 Andressa Bassani , 6 Júlio César Ramos, 7 Victória Böes Bauermann

1 Universidade Feevale, daiadaianardg@gmail.com; 2 Universidade Feevale, anapaulazick@hotmail.com; 3 Universidade Feevale, danielamq@feevale.br; 4 Universidade Feevale, robertariegel@feevale.br; 5 Universidade Feevale, andressabassani98@gmail.com, 6 Universidade Feevale, jcesarramos090@gmail.com; 7 Universidade Feevale, vicbauermann@gmail.com

Palavras-chave: Movimentos de massa; Densidade Kernel; Veranópolis

Introdução

Movimentos de massa são processos geomorfológicos frequentes em relevos dissecados, onde declividades acentuadas, solos rasos e substrato rochoso fraturado reduzem a estabilidade das encostas. Embora integrem a dinâmica natural das vertentes, sua magnitude e frequência aumentam expressivamente quando associados a eventos pluviométricos extremos, com potencial de causar perdas materiais e humanas consideráveis (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

A deflagração desses processos resulta da interação entre fatores condicionantes do meio físico — geologia, geomorfologia e pedologia — que definem a suscetibilidade das encostas (GUIDICINI; NIEBLE, 1984). Em terrenos com rochas fraturadas, solos pouco desenvolvidos e declividades elevadas, a estabilidade dos materiais superficiais é naturalmente comprometida, favorecendo escorregamentos rasos e outros processos gravitacionais.

No Rio Grande do Sul, o evento chuvoso de abril e maio de 2024 desencadeou um cenário de instabilidade generalizada, com ocorrências distribuídas em múltiplas regiões do estado. Na Serra Gaúcha, a resposta geomorfológica foi intensa, reflexo direto das condições naturais do terreno (CEMADEN, 2024).

Veranópolis destacou-se nesse contexto pelo expressivo número de ocorrências registradas. Inserido no domínio do Planalto Basáltico da Bacia do Paraná, o município é dominado por rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, com elevado grau de fraturamento que facilita a circulação hídrica e reduz a coesão dos materiais (SCHERER et al., 2000). Predominam Neossolos Regolíticos, solos rasos com contato próximo ao saprolito, o que acelera a saturação e favorece a formação de superfícies de ruptura (EMBRAPA, 2018). O relevo, marcado por vertentes íngremes e forte dissecação, potencializa a ação da gravidade sobre esses materiais.

Diante desse quadro, a análise da distribuição espacial das ocorrências é essencial para identificar padrões territoriais e áreas de concentração. A Estimativa de Densidade Kernel é uma das técnicas de estatística espacial mais utilizadas para esse fim, por transformar dados pontuais em superfícies contínuas de intensidade e evidenciar núcleos de maior densidade de eventos (SILVERMAN, 1986; BAILEY; GATRELL, 1995).

O presente trabalho tem como objetivo analisar a distribuição espacial dos movimentos de massa deflagrados pelo evento de 2024 em Veranópolis (RS), com ênfase na identificação de hotspots por meio da Estimativa de Densidade Kernel.

Material e Métodos

A base de dados utilizada consiste em polígonos de movimentos de massa mapeados pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) a partir do evento extremo ocorrido em maio de 2024 no município de Veranópolis (RS). Para viabilizar a aplicação de técnicas de estatística espacial pontual, os polígonos foram convertidos em centróides geométricos, procedimento que preserva a localização representativa de cada ocorrência sem introduzir viés sistemático na distribuição espacial (LONGLEY et al., 2013).

Os dados foram processados em ambiente SIG, com projeção cartográfica em SIRGAS 2000 / UTM Zona 22S. A análise de densidade espacial foi conduzida no software ArcGIS 10.5, por meio da ferramenta Kernel Density. O estimador de densidade Kernel é um método não paramétrico que, a partir de eventos pontuais, gera uma superfície contínua representando a intensidade espacial das ocorrências — quanto mais eventos em uma área, maior o valor de densidade atribuído a ela (SILVERMAN, 1986; LONGLEY et al., 2013). A função utilizada foi a quartic, na qual a influência de cada ponto diminui progressivamente com a distância, resultando em uma superfície suavizada (BAILEY; GATRELL, 1995). Sua aplicação em estudos de distribuição espacial de processos geomorfológicos tem sido amplamente registrada na literatura recente (ARAÚJO et al., 2023; POURGHASEMI et al., 2016).

O raio de busca (bandwidth) foi definido automaticamente pelo algoritmo do ArcGIS 10.5, com base na dispersão espacial dos dados. A superfície gerada foi classificada em cinco intervalos, permitindo identificar as áreas de maior concentração de ocorrências (hotspots).

Ressalta-se que a Estimativa de Densidade Kernel é uma técnica exploratória: representa a distribuição observada dos eventos e não permite inferências sobre suscetibilidade futura (BAILEY; GATRELL, 1995; CÂMARA et al., 2004).

Resultados e Discussão

A superfície de densidade Kernel gerada revelou distribuição espacial marcadamente agrupada dos movimentos de massa no território de Veranópolis, refutando a hipótese de aleatoriedade espacial das ocorrências. Esse padrão clustered é consistente com o observado em outros estudos sobre movimentos de massa desencadeados por eventos extremos no sul do

Brasil, nos quais a distribuição das ocorrências tende a concentrar-se em setores com condicionantes físicos mais favoráveis à instabilidade (VIEIRA; GRAMANI, 2015; AVELAR et al., 2013).

O principal hotspot foi identificado na porção centro-oeste do município, onde os valores de densidade atingiram os maiores valores registrados. Núcleos secundários foram cartografados na região norte, enquanto a porção centro-sul apresentou distribuição mais difusa, com densidade intermediária. Essa heterogeneidade espacial indica que, mesmo sob um evento pluviométrico de abrangência regional, a resposta geomorfológica foi condicionada por fatores locais.

A relação entre os hotspots e as áreas de maior dissecação do relevo sugere forte controle geomorfológico sobre a distribuição das ocorrências. Vertentes mais íngremes aumentam a componente gravitacional sobre os materiais superficiais e reduzem o tempo de concentração do escoamento subsuperficial, dois mecanismos que atuam sinergicamente na deflagração de escorregamentos rasos (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994). Esse comportamento é esperado em terrenos sobre a Formação Serra Geral, onde o fraturamento do substrato basáltico cria planos preferenciais de circulação hídrica e potenciais superfícies de ruptura (SCHERER et al., 2000).

A distribuição dos hotspots também aponta para uma convergência de fatores condicionantes nas áreas de maior densidade: declividade elevada, Neossolos Regolíticos rasos e descontinuidades estruturais no substrato. Essa combinação reduz a resistência ao cisalhamento dos materiais e eleva a suscetibilidade à mobilização, especialmente sob chuvas intensas e prolongadas que promovem rápida saturação do perfil de solo (WOLLE; HACHICH, 1989; HUNGR et al., 2014). A rapidez com que esses solos atingem a saturação, dado o reduzido espessamento do horizonte A sobre o saprolito, é um dos principais mecanismos deflagradores dos escorregamentos rasos na Serra Gaúcha (ROBAINA et al., 2010).

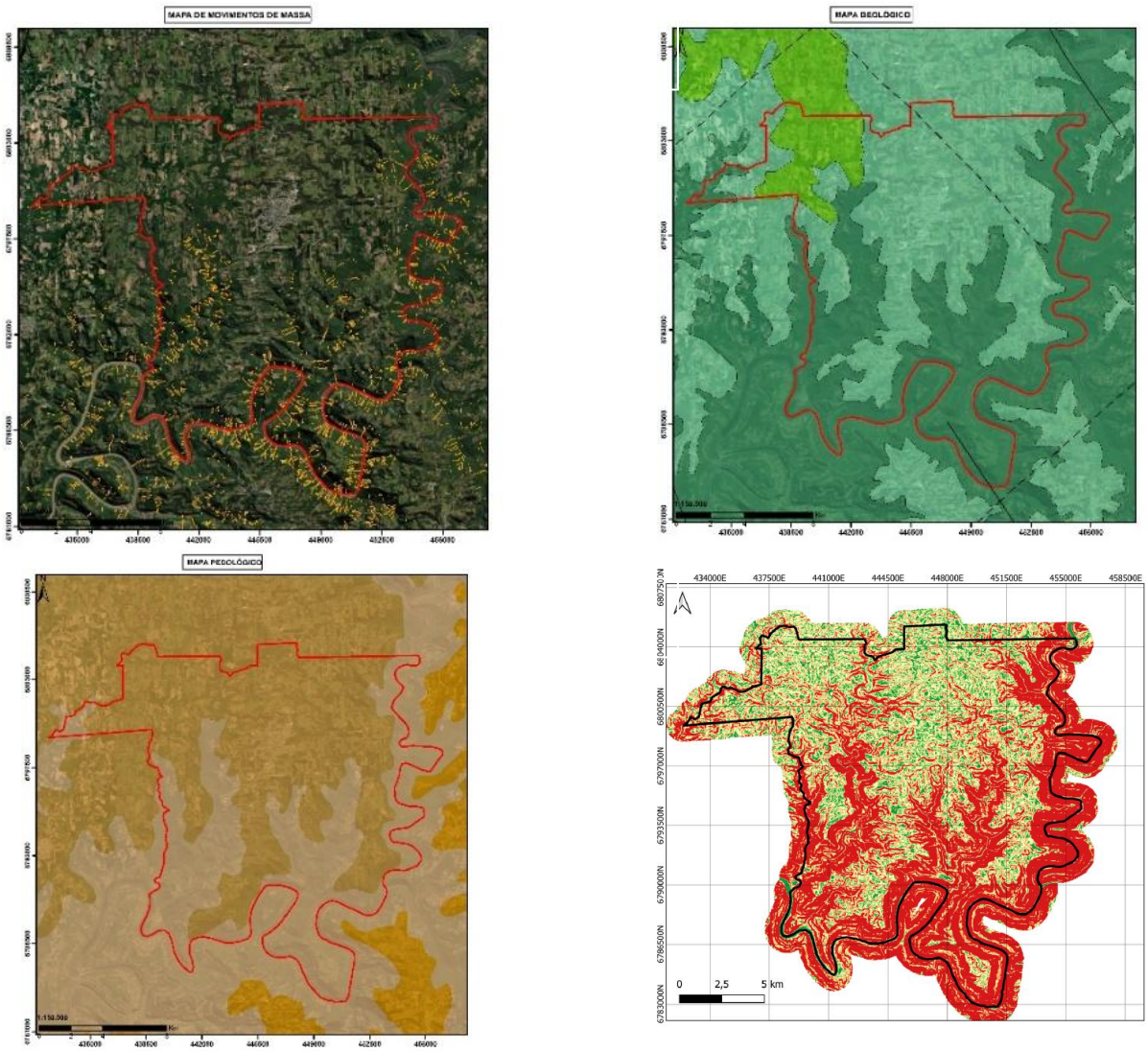


Figura 01: Figura 01 – Mapas temáticos do município de Veranópolis (RS) utilizados na análise espacial dos movimentos de massa. (A) Distribuição das ocorrências de movimentos de massa mapeadas após o evento pluviométrico de maio de 2024; (B) Mapa geológico da área de estudo, com destaque para as unidades da Formação Serra Geral; (C) Mapa pedológico, evidenciando o predomínio de Neossolos Regolíticos; (D) Mapa de declividade, representando a variação do relevo e os setores com maiores gradientes topográficos.
Fonte: elaborado pelos autores (2024).

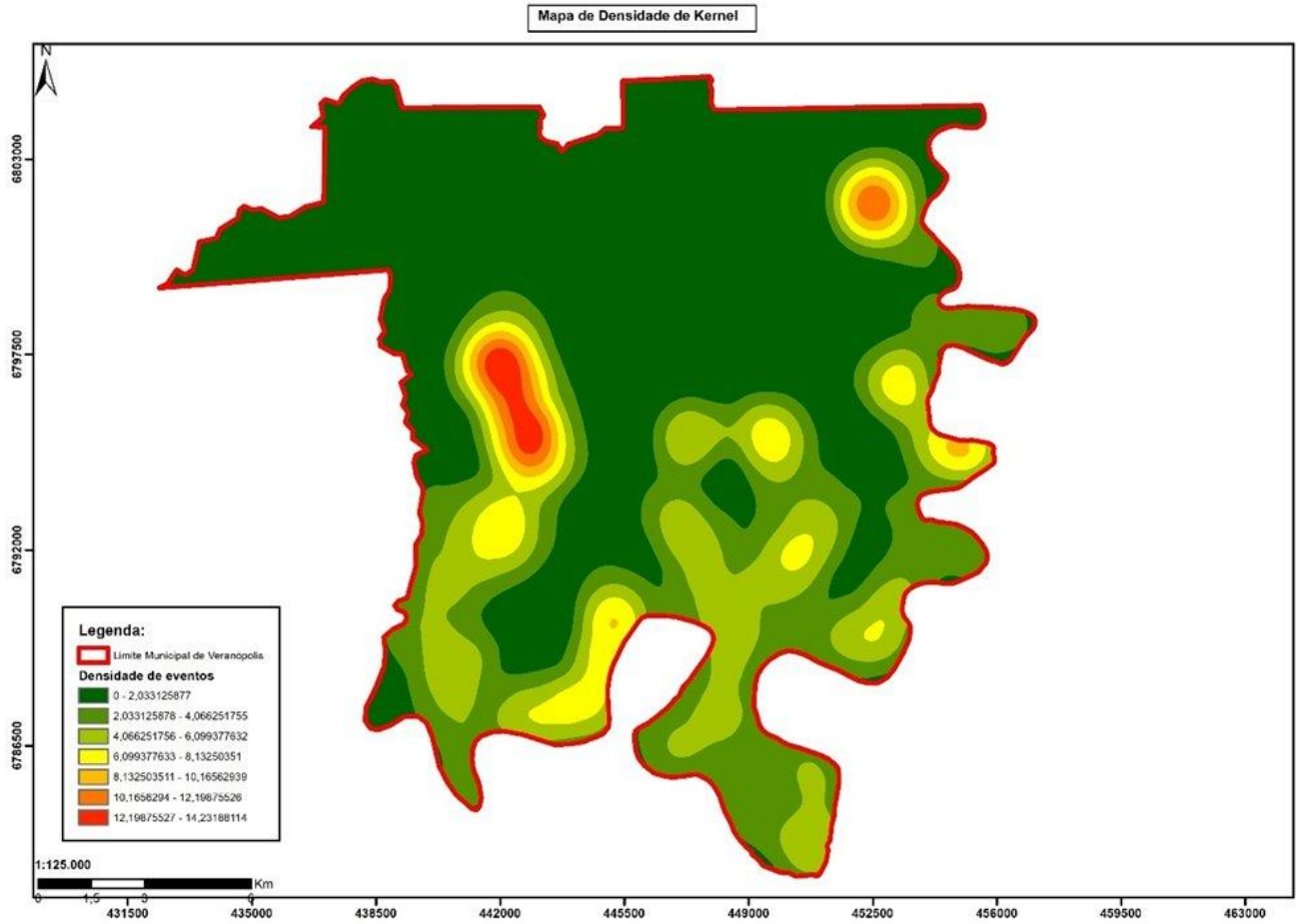


Figura 02: Mapa de Densidade de Kernel dos movimentos de massa deflagrados pelo evento pluviométrico de maio de 2024 em Veranópolis (RS). A superfície contínua evidencia a intensidade espacial das ocorrências, com gradiente cromático variando de verde-escuro (baixa densidade) a vermelho (alta densidade), identificando o principal hotspot na porção centro-oeste e núcleos secundários na região norte do município.
Fonte: elaborado pelos autores (2024).

Do ponto de vista metodológico, a Estimativa de Densidade Kernel demonstrou eficiência para a análise exploratória da distribuição espacial dos eventos, transformando dados pontuais em uma superfície contínua que permite identificar padrões territoriais de forma visualmente intuitiva e analiticamente consistente. Resultados semelhantes foram obtidos por Pradhan e Lee (2010) e por Pourghasemi et al. (2016) em contextos de mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massa, reforçando a aplicabilidade da técnica em estudos geomorfológicos.

É necessário, contudo, reconhecer as limitações inerentes à abordagem. A definição automática do bandwidth pode suavizar excessivamente a superfície em áreas com baixa densidade de eventos, podendo mascarar núcleos secundários de menor expressão (DIGGLE, 2003). Além disso, a base de dados reflete o mapeamento pós-evento, sujeita a limitações de acesso e visibilidade em campo, o que pode introduzir sub-registro em determinados setores do município.

Considerações Finais

Os resultados obtidos confirmam que os movimentos de massa deflagrados pelo evento de maio de 2024 em Veranópolis (RS) apresentam distribuição espacial estruturada, com formação de hotspots bem definidos na porção centro-oeste e núcleos secundários na região norte do município. Esse padrão afasta a hipótese de aleatoriedade e evidencia que a organização territorial das ocorrências é condicionada por fatores do meio físico, especialmente pela configuração geomorfológica local.

A convergência entre as áreas de maior densidade de eventos e os setores de relevo mais dissecado reforça o papel central da declividade e das descontinuidades estruturais do substrato basáltico na instabilidade das encostas. A associação com Neossolos Regolíticos rasos, de rápida saturação, indica que a resposta hidrológica do solo ao evento pluviométrico foi determinante para a deflagração dos processos. Esses resultados são coerentes com a literatura sobre movimentos de massa na Serra Gaúcha e no sul do Brasil (ROBAINA et al., 2010; VIEIRA; GRAMANI, 2015).

A Estimativa de Densidade Kernel mostrou-se uma técnica adequada para a análise exploratória da distribuição espacial das ocorrências, oferecendo uma representação contínua e de fácil interpretação dos padrões territoriais. Sua aplicação em estudos pós-evento contribui para o reconhecimento de áreas críticas e pode subsidiar ações de monitoramento e planejamento territorial em municípios com características físicas similares às de Veranópolis.

Ressalta-se, contudo, que os resultados expressam a distribuição observada dos eventos mapeados e não constituem um modelo de suscetibilidade. Como desdobramentos futuros, recomenda-se a integração da análise de densidade com dados morfométricos e geológicos para identificação dos fatores condicionantes de maior peso explicativo, bem como a comparação com eventos anteriores para avaliar a recorrência espacial dos processos em Veranópolis.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Feevale e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

ARAÚJO, J. P. de C. et al. Implementação de uma topografia pré-ruptura na predição estatística bivariada de escorregamentos. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, n. 3, 2023.

AVELAR, A. S. et al. Mechanisms of the catastrophic landslides of 2011 in the mountainous range of Rio de Janeiro. *Landslides*, v. 10, n. 5, p. 641–648, 2013.

BAILEY, T. C.; GATRELL, A. C. *Interactive spatial data analysis*. Harlow: Longman, 1995.

CÂMARA, G. et al. *Análise espacial de dados geográficos*. Brasília: EMBRAPA, 2004.

CEMADEN. Nota técnica nº 412/2024. Cachoeira Paulista: CEMADEN, 2024.

DIGGLE, P. J. *Statistical analysis of spatial point patterns*. 2. ed. London: Arnold, 2003.

EMBRAPA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. *The landslide handbook: a guide to understanding landslides*. Reston: United States Geological Survey, 2008.

HUNGR, O. et al. The Varnes classification of landslide types: an update. *Landslides*, v. 11, n. 2, p. 167–194, 2014.

LONGLEY, P. A. et al. *Geographic information science and systems*. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2013.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, v. 30, n. 4, p. 1153–1171, 1994.

POURGHASEMI, H. R. et al. Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS. *Natural Hazards*, v. 84, p. 217–244, 2016.

PRADHAN, B.; LEE, S. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate statistics. *Geomorphology*, v. 141–142, p. 1–13, 2010.

ROBAINA, L. E. S. et al. Compartimentação geomorfológica como base para análise de movimentos de massa no Rio Grande do Sul. *Geociências*, v. 29, n. 3, p. 439–450, 2010.

SCHERER, C. M. S. et al. Bacia do Paraná. In: HOLZ, M.; DE ROS, L. F. (org.). *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: CIGO/UFRGS, 2000.

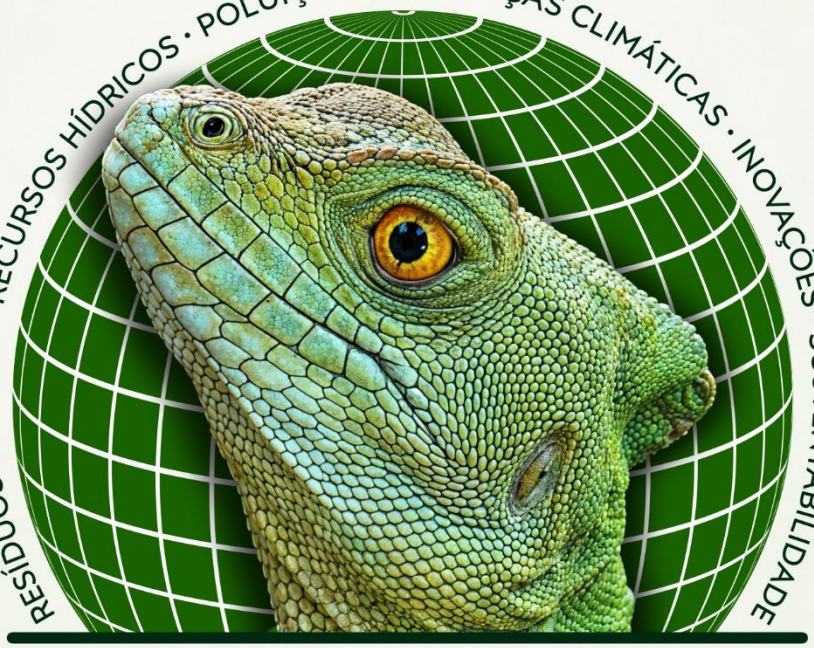
SILVERMAN, B. W. *Density estimation for statistics and data analysis*. London: Chapman and Hall, 1986.

VIEIRA, B. C.; GRAMANI, M. F. Serra do Mar: the most “tormented” relief in Brazil. In: VIEIRA, B. C. et al. (org.). *Landscapes and landforms of Brazil*. Dordrecht: Springer, 2015.

WOLLE, C. M.; HACHICH, W. Rain-induced landslides in southeastern Brazil. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Rio de Janeiro, 1989.

ÁREA TEMÁTICA 5

DESCARBONIZAÇÃO



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM INSTITUIÇÃO DE ENSINO TÉCNICO: ANÁLISE DAS EMISSÕES OPERACIONAIS EM DIFERENTES CENÁRIOS ENERGÉTICOS

Larissa da Cruz Calixto, Vanessa Montoro Taborianski, Juliana Gardenalli de Freitas

Universidade Federal de São Paulo, e-mail: larissa.calixto@unifesp; Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza e Centro Universitário Armando Alvarez Penteado, e-mail: vanessa.taborianski@cps.sp.gov.br; Universidade Federal de São Paulo, e-mail: jgfreitas@unifesp.br

Palavras-chave: Energia Fotovoltaica; Emissões de Gases de Efeito Estufa; Geração Distribuída.

Introdução

As mudanças climáticas representam um dos principais desafios ambientais contemporâneos, sendo amplamente associadas ao aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) decorrentes das atividades humanas. O setor energético possui papel central nesse contexto, uma vez que a geração de eletricidade baseada em combustíveis fósseis contribui significativamente para as emissões globais de dióxido de carbono (IPCC, 2022). Nesse cenário, a expansão de fontes renováveis de energia tem sido considerada estratégia fundamental para a descarbonização dos sistemas energéticos.

A contabilização das emissões de GEE geralmente é realizada a partir da classificação em escopos de emissão, conforme metodologia estabelecida pelo *GHG Protocol*. O escopo 1 corresponde às emissões diretas provenientes de fontes que pertencem ou são controladas pela organização, como a combustão de combustíveis fósseis em processos industriais ou geração de energia. O escopo 2 refere-se às emissões indiretas associadas à eletricidade adquirida e consumida por uma organização. Já o escopo 3 engloba outras emissões indiretas ao longo da cadeia de valor, incluindo produção de equipamentos, transporte e descarte de materiais (GHG Protocol, 2015).

No contexto brasileiro, o Balanço Energético Nacional (BEN) apresenta indicadores de intensidade de emissões associados à geração de eletricidade. Esses valores refletem predominantemente emissões relacionadas ao escopo 1, uma vez que consideram essencialmente as emissões diretas provenientes da geração elétrica, especialmente associadas à operação de usinas termelétricas que utilizam combustíveis fósseis. De acordo com o BEN 2025, o fator médio de emissão da eletricidade brasileira foi estimado em aproximadamente 0,599 $kgCO_{2e}$ /kWh (EPE, 2025). Embora a matriz elétrica brasileira apresente elevada participação de fontes renováveis, sua intensidade carbônica pode variar ao longo do tempo em função das condições operacionais do sistema elétrico. Um dos principais fatores responsáveis por essa variação é o despacho térmico, mecanismo utilizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para acionar usinas termelétricas quando a geração hidrelétrica ou renovável é insuficiente para atender à demanda energética. Em períodos de escassez hídrica ou de elevada demanda elétrica, o aumento do despacho de usinas térmicas resulta em maior intensidade de emissões no sistema elétrico (ANEEL, 2023).

Nesse contexto, a microgeração fotovoltaica distribuída tem se consolidado como alternativa relevante para reduzir emissões associadas ao consumo de eletricidade. O Brasil possui elevado potencial solar devido à alta incidência de radiação solar em grande parte do território nacional, favorecendo a expansão da geração fotovoltaica em edificações residenciais, comerciais e institucionais (Pereira et al., 2017).

Instituições de ensino representam unidades consumidoras relevantes de energia elétrica, especialmente devido ao funcionamento contínuo de iluminação, equipamentos laboratoriais, sistemas de informática e climatização. Estudos recentes indicam que a integração de sistemas fotovoltaicos em edificações educacionais pode reduzir significativamente o consumo de eletricidade proveniente da rede e contribuir para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (Alfaoyzan et al., 2023; Silva et al., 2022).

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo comparar as emissões operacionais associadas ao consumo de eletricidade de uma instituição de ensino técnico em diferentes cenários de suprimento energético, considerando a matriz elétrica nacional e a implementação de microgeração fotovoltaica *on-site*.

Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido considerando uma instituição pública de ensino técnico (IET) localizada no litoral do estado de São Paulo. A instituição possui uma área de projeção de aproximada de 1.525 m², configurando-se como equipamento educacional de porte médio no contexto urbano. A instituição atende aproximadamente 1.449 alunos, distribuídos entre os diferentes cursos ofertados, e conta com quadro funcional composto por cerca de 128 colaboradores, incluindo docentes, equipe administrativa, coordenação pedagógica, serviços gerais e apoio técnico. Essa composição populacional confere à edificação fluxo diário significativo de usuários. O funcionamento da unidade ocorre predominantemente em período escolar, com carga operacional média de 16 horas diárias, de segunda a sexta-feira, considerando que a IET oferece cursos nos períodos matutinos, vespertinos e matutinos. Além de toda a infraestrutura de apoio, influenciando as demandas energéticas e operacionais ao longo do ano letivo. Durante o período diurno, o consumo energético está associado principalmente ao funcionamento de salas de aula, laboratórios de informática, equipamentos laboratoriais e sistemas de iluminação. No período noturno, embora a geração fotovoltaica seja inexistente, a instituição permanece em operação, mantendo consumo relevante de eletricidade para aulas e atividades administrativas.

O procedimento metodológico adotado neste estudo pode ser sintetizado em cinco etapas. Inicialmente foi realizada a

caracterização da edificação e a coleta de dados de consumo energético anual da instituição. Em seguida, foram definidos quatro cenários energéticos para análise comparativa das emissões operacionais associadas ao consumo de eletricidade. Posteriormente, realizou-se o dimensionamento preliminar do sistema fotovoltaico com base na área disponível de telhado e na produção específica média de sistemas solares no sudeste brasileiro. Baseado nisso, foi feita a estimativa das emissões em cada um dos cenários e a comparação entre eles para análise e discussão dos resultados.

Os cenários de suprimento energético considerados foram: cenário (i) matriz elétrica nacional: toda a eletricidade consumida pela instituição é fornecida pela rede elétrica brasileira; cenário (ii) fotovoltaico 50% com armazenamento: sistema fotovoltaico dimensionado para suprir 50% da demanda anual, associado a um sistema de armazenamento em baterias, permitindo utilização da energia gerada durante o dia para suprimento parcial do consumo noturno; cenário (iii) fotovoltaico 100% com armazenamento: sistema fotovoltaico dimensionado para suprir 100% da demanda anual, com armazenamento energético para atendimento da carga noturna; cenário (iv) fotovoltaico 50% + rede elétrica 50%: sistema fotovoltaico suprindo 50% da demanda, enquanto os 50% restantes são fornecidos pela rede elétrica nacional, sem utilização de armazenamento.

As emissões operacionais associadas ao consumo de eletricidade da instituição foram estimadas a partir da multiplicação do consumo energético anual pelo fator médio de emissão da matriz elétrica brasileira. O consumo anual da edificação foi obtido por meio de registros institucionais de faturamento energético, totalizando 253.268 kWh por ano. Para a conversão desse consumo em emissões de gases de efeito estufa (GEE), foi adotado o fator médio de emissão da eletricidade brasileira divulgado pelo Balanço Energético Nacional (BEN), equivalente a 0,599 $kgCO_{2e}$/kWh (EPE, 2025), que representa predominantemente emissões diretas associadas à geração elétrica (escopo 1). No cenário (i) matriz elétrica nacional, considerou-se que 100% da eletricidade consumida pela instituição é proveniente da rede elétrica, sendo as emissões calculadas pela multiplicação direta do consumo anual pelo fator de emissão da matriz. No cenário (ii) geração fotovoltaica on-site suprindo 50% da demanda com armazenamento, assumiu-se que metade da energia consumida pela instituição é gerada por um sistema fotovoltaico instalado no local, enquanto a energia excedente produzida durante o dia é armazenada em baterias para utilização no período noturno. Como a geração fotovoltaica não envolve combustão de combustíveis fósseis durante sua operação, as emissões operacionais associadas à parcela de energia gerada localmente foram consideradas nulas. No cenário (iii) geração fotovoltaica on-site suprindo 100% da demanda com armazenamento, assumiu-se que toda a eletricidade consumida pela instituição é gerada por um sistema fotovoltaico dimensionado para suprir integralmente o consumo anual, com armazenamento energético para atendimento da carga noturna, resultando também em emissões operacionais nulas. Por fim, no cenário (iv) geração fotovoltaica suprindo 50% da demanda complementada pela rede elétrica, considerou-se que metade do consumo anual é atendida pela geração fotovoltaica e a outra metade pela rede elétrica nacional. Nesse caso, as emissões foram calculadas aplicando o fator de emissão da matriz elétrica apenas à parcela de energia proveniente da rede, permitindo estimar a redução potencial de emissões associada à implementação parcial da geração fotovoltaica.

O dimensionamento preliminar do sistema fotovoltaico foi realizado a partir do consumo anual de eletricidade da instituição e da produção específica média de sistemas solares na região sudeste do Brasil. Estudos sobre geração fotovoltaica no país indicam que a produção anual típica varia entre aproximadamente 1300 e 1600 kWh por kWp instalado, dependendo da irradiância solar local, orientação dos módulos e eficiência do sistema (Pereira et al., 2017; Urbanetz, 2019; Dutra et al., 2022). Neste estudo foi adotado valor médio de 1400 kWh/kWp por ano para estimativa da geração anual. A potência necessária da usina fotovoltaica foi estimada a partir da relação entre o consumo anual da edificação e a produção específica do sistema, conforme a expressão P=E/H, em que P corresponde à potência instalada (kWp), e representa o consumo anual de energia elétrica (kWh) e H corresponde à produção específica anual do sistema fotovoltaico (kWh/kWp).

Resultados e Discussão

A Figura 01 apresenta a geração anual de eletricidade estimada para os quatro cenários analisados. Baseado nessa geração anual de eletricidade, foi feito o dimensionamento preliminar de acordo com procedimento descrito anteriormente. Estimou-se que uma usina com potência aproximada de 181 kWp seria necessária para suprir integralmente o consumo anual da instituição. Para o cenário (ii e iv) de suprimento parcial de 50% da demanda, foi considerada potência aproximada de 90 kWp. Considerando módulos fotovoltaicos comerciais com potência nominal de 550 W, seriam necessários aproximadamente 329 módulos para o cenário de suprimento integral e cerca de 164 módulos para o cenário de suprimento parcial. A área ocupada pelos módulos foi estimada considerando aproximadamente 2,2 m² por módulo, resultando em área total de aproximadamente 720 m² de telhado para o cenário de suprimento integral. Esses valores são compatíveis com estudos recentes de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos em edificações institucionais no Brasil, que indicam elevado potencial de aproveitamento de áreas de cobertura para geração distribuída (Urbanetz, 2019; Dutra et al., 2022).

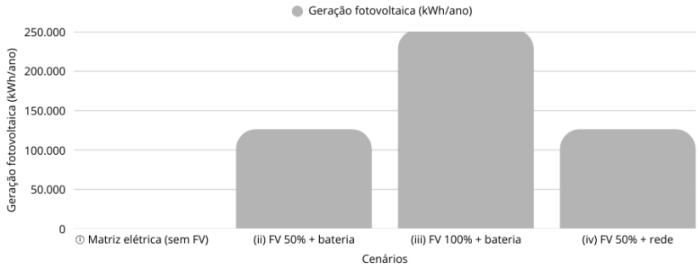


Figura 01: Geração anual de eletricidade por cenário. Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

A aplicação do fator médio de emissão da matriz elétrica brasileira ao consumo anual da instituição resulta em emissões operacionais aproximadas de 151,7 toneladas de CO_{2e} por ano (cenário i). Esse valor corresponde às emissões indiretas associadas ao consumo de eletricidade da escola do escopo 1 estabelecido pelo BEN. No cenário (iv) de geração fotovoltaica *on-site* suprindo 50% da demanda energética, as emissões operacionais seriam reduzidas para aproximadamente 75,8 toneladas de CO_{2e} por ano. Já no cenário (iii) de geração fotovoltaica capaz de suprir 100% da demanda energética anual, as emissões operacionais associadas ao consumo de eletricidade tornam-se praticamente nulas durante a fase de uso do sistema. A Figura 02 apresenta a comparação das emissões operacionais de CO_{2e} associadas aos diferentes cenários energéticos analisados.

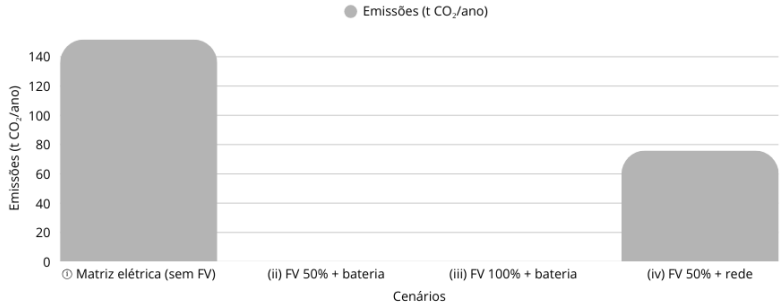


Figura 02: Emissões de CO_{2e} associadas ao consumo de eletricidade nos cenários. Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

Os resultados indicam que a implementação de sistemas fotovoltaicos em instituições educacionais pode representar estratégia eficaz de mitigação das emissões operacionais associadas ao consumo de energia. No contexto da avaliação ambiental de edificações, a fase de uso corresponde ao período operacional do edifício, no qual ocorrem os consumos de energia, água e demais recursos necessários para o funcionamento das atividades desenvolvidas no local. No caso da energia elétrica, essa etapa inclui as emissões associadas ao consumo energético durante a operação do edifício, frequentemente classificadas como emissões indiretas relacionadas à eletricidade adquirida. Em metodologias de avaliação ambiental de edificações, como aquelas baseadas em normas internacionais de sustentabilidade do ambiente construído, essa etapa é frequentemente associada ao módulo operacional de consumo de energia. O presente estudo concentra-se especificamente nas emissões operacionais associadas ao consumo de eletricidade, buscando comparar diferentes cenários de suprimento energético para uma instituição de ensino técnico.

Dessa forma, o objetivo da análise não é realizar uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) completa dos sistemas energéticos envolvidos, nem estimar emissões associadas às cadeias de produção de equipamentos ou materiais. Em particular, não foram consideradas emissões associadas ao escopo 3, que incluem impactos relacionados à fabricação de módulos fotovoltaicos, baterias, transporte de equipamentos ou processos de descarte ao final da vida útil. A delimitação do estudo à fase operacional permite avaliar diretamente o impacto das escolhas de suprimento energético sobre as emissões associadas ao consumo de eletricidade da instituição.

Essa abordagem também garante coerência metodológica com os dados utilizados para comparação, uma vez que o fator médio de emissão da eletricidade divulgado pelo Balanço Energético Nacional (BEN) reflete predominantemente as emissões diretas da geração elétrica, associadas ao escopo 1 do sistema energético nacional. Como o BEN não incorpora de forma explícita as emissões ao longo do ciclo de vida das infraestruturas energéticas, a comparação entre os cenários analisados deve utilizar a mesma fronteira de análise para evitar inconsistências metodológicas. Dessa forma, ao restringir a análise às emissões operacionais associadas ao consumo de eletricidade, busca-se garantir uma comparação metodologicamente consistente entre o fornecimento pela matriz elétrica nacional e a geração fotovoltaica local.

Os resultados obtidos neste estudo são consistentes com pesquisas realizadas em instituições educacionais brasileiras que avaliaram o potencial da geração fotovoltaica para redução do consumo de eletricidade proveniente da rede elétrica. Estudos conduzidos em universidades públicas no Brasil indicam que a instalação de sistemas fotovoltaicos em edifícios acadêmicos pode reduzir significativamente a demanda energética da rede elétrica e as emissões associadas ao consumo de eletricidade. Em análise realizada em campus universitário brasileiro, verificou-se que sistemas fotovoltaicos instalados em telhados de edifícios acadêmicos poderiam suprir entre 30% e 70% da demanda energética anual, dependendo da área disponível para instalação e das características arquitetônicas das edificações (Oliveira et al., 2020).

De forma semelhante, pesquisas realizadas em escolas públicas brasileiras indicam elevado potencial de geração solar em edificações educacionais, uma vez que essas estruturas frequentemente apresentam grandes áreas de cobertura adequadas para instalação de módulos fotovoltaicos (Pereira et al., 2018). Os resultados do presente estudo indicam que a implementação de um sistema fotovoltaico capaz de suprir 50% da demanda energética anual da instituição analisada poderia reduzir aproximadamente 75,8 toneladas de CO_{2e} por ano, enquanto um sistema dimensionado para suprimento integral da demanda poderia evitar cerca de 151,7 toneladas de CO_{2e} anuais associadas ao consumo de eletricidade da rede. Valores dessa magnitude são comparáveis aos observados em estudos conduzidos em universidades brasileiras, nos quais a implementação de sistemas fotovoltaicos em edifícios institucionais apresentou potencial significativo de mitigação das emissões operacionais do setor educacional (Urbanetz, 2019; Oliveira et al., 2020). Esses resultados reforçam o papel das instituições de ensino como espaços estratégicos para implementação de tecnologias de geração distribuída e para promoção da transição energética no setor público. A adoção de sistemas fotovoltaicos em instituições educacionais pode representar estratégia relevante de descarbonização no setor público, especialmente quando integrada a políticas nacionais de expansão da geração distribuída e de transição energética.

Considerações Finais

Os resultados indicam que a microgeração fotovoltaica possui elevado potencial de redução das emissões operacionais associadas ao consumo de eletricidade em instituições de ensino técnico. No cenário (i) fornecimento integral pela matriz elétrica brasileira, o consumo anual da instituição analisada resulta em emissões aproximadas de 151,7 toneladas de CO_{2e} por ano. É importante destacar que, embora os cenários (ii e iii) que incluem armazenamento energético tenham sido considerados sem emissões operacionais diretas, sistemas de baterias apresentam impactos ambientais associados principalmente às fases de produção, transporte e descarte dos equipamentos. A fabricação de baterias, especialmente aquelas baseadas em tecnologias de íons de lítio, envolve processos industriais intensivos em energia e mineração de minerais críticos, o que resulta em emissões de gases de efeito estufa incorporadas aos equipamentos.

Entretanto, esses impactos são normalmente contabilizados em análises de ciclo de vida completas, que incluem todas as etapas do sistema energético, desde a extração de matérias-primas até o fim da vida útil dos componentes. Como o presente estudo se concentra exclusivamente na fase operacional do consumo de eletricidade, tais emissões não foram incluídas na estimativa das emissões dos cenários analisados. Dessa forma, embora sistemas de armazenamento possam apresentar emissões incorporadas adicionais quando avaliados sob uma perspectiva de ciclo de vida completo, essas emissões não são atribuídas à fase de uso da eletricidade, que constitui o foco da presente análise.

A implementação de sistemas fotovoltaicos pode reduzir significativamente esse valor de 151,7 toneladas de CO_{2e}/ano, especialmente em cenários de maior participação da geração solar no suprimento energético da instituição. Entretanto, a viabilidade técnica e econômica de sistemas capazes de suprir integralmente a demanda energética depende de fatores como área disponível de telhado, custos de instalação e necessidade de armazenamento energético. Cenários intermediários, como sistemas capazes de suprir aproximadamente 50% da demanda energética, podem representar soluções mais viáveis para instituições públicas, mantendo benefícios ambientais relevantes e contribuindo para a transição energética no setor educacional.

Dessa forma, os resultados apresentados devem ser interpretados como reduções potenciais de emissões operacionais, sendo reconhecido que avaliações ambientais completas dos sistemas energéticos exigiriam a incorporação de análises de ciclo de vida abrangendo todas as etapas do sistema.

Agradecimentos

As autoras agradecem à instituição de ensino analisada pela disponibilização dos dados utilizados neste estudo.

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências Bibliográficas

ALFAOYZAN F.A, ALMASRI R.A. Utilizing solar photovoltaic systems in educational facilities to achieve a zero bill campus: The Sulaiman Al-Rajhi University case. *Energy Exploration & Exploitation*, n. 41, p. 1415-1438, 2023.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de energia elétrica do Brasil. Brasília: ANEEL, 2023.

DUTRA, R. M.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Solar photovoltaic power generation in Brazil: current status and future prospects. *Renewable Energy*, 2022.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço energético nacional 2025. Rio de Janeiro: EPE, 2025.

GHG PROTOCOL. Corporate accounting and reporting standard. Washington, DC: World Resources Institute, 2015.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 2022: mitigation of climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

OLIVEIRA, O. A. V. et al. Avaliação do potencial de geração fotovoltaica em edificações universitárias brasileiras. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, São Paulo, n. 55, p. 1–15, 2020.

PEREIRA, E. B. et al. Atlas brasileiro de energia solar. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

PEREIRA, J. S. et al. Assessment of the potential implementation of solar energy generation in public schools in Brazil. *Energy Procedia*, v. 153, p. 111–116, 2018.

SILVA, L. et al. Solar photovoltaic potential in educational buildings. *Energy Reports*, v. 8, p. 1234–1245, 2022.

URBANETZ, J. Performance analysis of photovoltaic systems in Brazil. *Renewable Energy*, v. 133, p. 119–127, 2019.

DESCARBONIZAÇÃO NA INDÚSTRIA DE CIMENTO E UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE

1 Artenizia Lopes Camargo, 2 Dr. Ricardo Carrasco Carpio
1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Minas Gerais Campus Bambuí, e-mail: arteniziacmrg@gmail.com;
2 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Minas Gerais Campus Bambuí, e-mail: ricardo.carpio@ifmg.edu.br

Palavras-chave: Indústria de cimento; Hidrogênio Verde; Descarbonização.

Introdução

A indústria do cimento desempenha papel fundamental no desenvolvimento econômico global, sendo responsável por significativa parcela das emissões de gases de efeito estufa, especialmente em decorrência do processo de produção de clínquer. Esse processo envolve a calcinação do carbonato de cálcio ($CaCO_3$), com consequente liberação de dióxido de carbono (CO_2), além do uso intensivo de combustíveis fósseis para geração de energia térmica em fornos rotativos. Estima-se que o setor contribua com aproximadamente 3% a 10% das emissões globais de CO_2, o que o torna um dos principais focos de iniciativas voltadas à descarbonização industrial (Arujo, 2020; Ighalo; Adeniyi, 2020). Nesse contexto, estratégias como o coprocessamento de resíduos e a substituição de combustíveis fósseis por alternativas de menor impacto ambiental vêm sendo amplamente discutidas.

Entre essas alternativas, o hidrogênio verde destaca-se como um vetor energético promissor, por apresentar potencial de combustão com baixa ou nula emissão direta de carbono, dependendo da forma como é produzido. Quando obtido por eletrólise da água utilizando fontes renováveis de energia, o hidrogênio pode contribuir de forma significativa para a redução das emissões associadas à combustão industrial. No entanto, sua aplicação em fornos de clínquer envolve desafios técnicos relevantes, como a estabilidade da chama, a distribuição térmica e a necessidade de controle preciso do fornecimento de oxigênio (Campos; Leão; Amorim, 2021; Nhuchhen; Sente-se; Layzell, 2022).

Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo analisar a descarbonização na indústria do cimento por meio da utilização do hidrogênio verde, com ênfase na avaliação do comportamento da combustão em forno de clínquer. A proposta busca contribuir para a compreensão dos impactos térmicos e ambientais da substituição parcial de combustíveis fósseis por hidrogênio, fornecendo subsídios técnicos para a adoção dessa tecnologia no setor.

Material e métodos

O estudo apresenta abordagem quali-quantitativa, combinando revisão de literatura com modelagem analítica do processo de combustão em forno de clínquer. A etapa qualitativa consistiu na análise de referências científicas e técnicas relacionadas à produção de cimento, processos de descarbonização e uso de hidrogênio como combustível. Já a etapa quantitativa envolveu a simulação computacional do comportamento da combustão, com base em cálculos termodinâmicos implementados em linguagem Python, em ambiente de desenvolvimento Jupyter Notebook.

Foram realizadas seis simulações considerando diferentes percentuais de substituição do combustível convencional por hidrogênio verde: 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%. Os dados utilizados foram fornecidos por uma empresa do setor cimenteiro, incluindo a composição química dos combustíveis e as proporções empregadas no processo industrial. A partir dessas informações, foram conduzidos cálculos de balanceamento estequiométrico, determinação do excesso de ar e estimativa das emissões de CO_2, bem como da temperatura adiabática da chama.

A determinação da temperatura adiabática foi realizada com base nas entalpias de formação das substâncias envolvidas, considerando condições de contorno representativas do processo real. A temperatura de entrada dos reagentes foi fixada em 570K, e foram utilizadas tabelas termodinâmicas consolidadas para obtenção das propriedades necessárias aos cálculos (Çengel; Boles, 2013). Adicionalmente, foram consideradas limitações inerentes ao processo, como perdas de calor e presença de diluentes, a fim de garantir maior aderência dos resultados às condições operacionais do forno.

Resultados e discussão

Os resultados obtidos evidenciam que o aumento da fração de hidrogênio no combustível resulta em redução progressiva das emissões de CO_2 e dos moles de carbono, confirmando o potencial do hidrogênio verde como alternativa para a descarbonização do setor. Esse comportamento está diretamente relacionado à ausência de carbono na composição do hidrogênio, o que elimina a formação direta de CO_2 durante sua combustão. Além disso, a substituição gradual permite observar que mesmo pequenas proporções de hidrogênio já são capazes de promover reduções mensuráveis nas emissões, indicando viabilidade de aplicação progressiva no contexto industrial.

Na Figura 01, apresenta-se a variação das emissões específicas de CO_2 em função da porcentagem de hidrogênio, evidenciando uma tendência decrescente ao longo das simulações. Observa-se que, mesmo em substituições parciais, já há impacto significativo na redução das emissões, o que reforça a viabilidade da adoção gradual dessa tecnologia. Esse comportamento sugere que estratégias de transição energética podem ser implementadas de forma incremental, sem necessidade de substituição total imediata dos combustíveis convencionais, favorecendo maior adaptabilidade operacional.

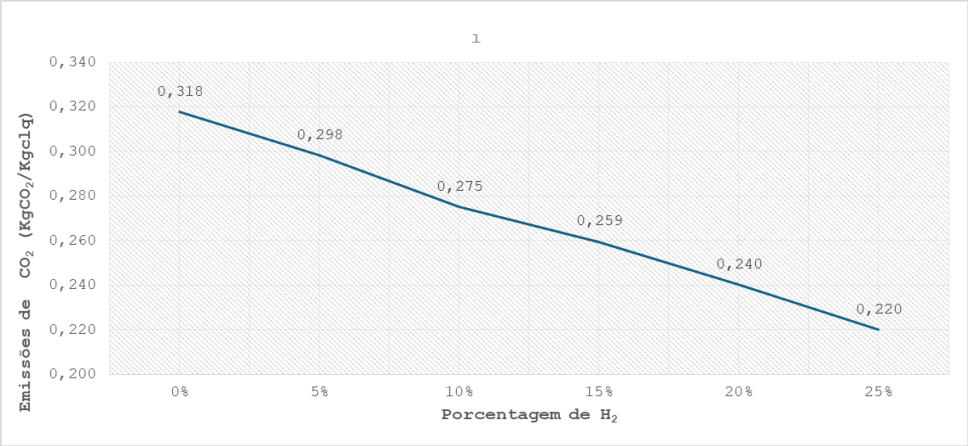


Figura 01: Emissões de CO_2 ($kgCO_2$/kgclq) em função da porcentagem de H_2.

Na Figura 02, ilustra-se a variação dos moles de carbono no sistema, demonstrando comportamento semelhante ao das emissões de CO_2. A redução contínua desse parâmetro indica menor disponibilidade de carbono para oxidação, consolidando a relação direta entre composição do combustível e impacto ambiental.

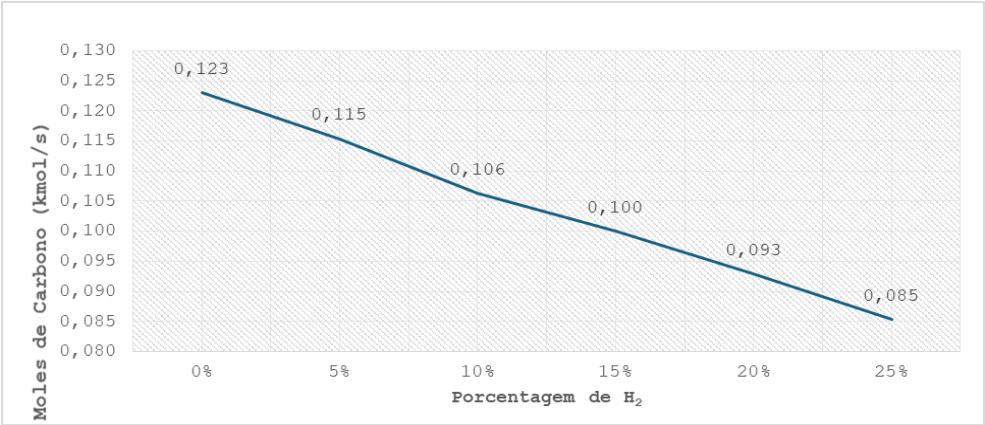


Figura 02: Moles de carbono (kmol/s) em função da porcentagem de H_2.

No que se refere à temperatura da chama, os resultados indicam aumento progressivo até o percentual de 15% de hidrogênio, seguido de oscilações nos níveis de 20% e 25%, conforme apresentado na Figura 03. Esse comportamento pode ser explicado pela elevada densidade energética do hidrogênio, aliada a fatores como disponibilidade de oxigênio, presença de diluentes e limitações operacionais do forno. A literatura aponta que, embora o hidrogênio possua alto potencial térmico, condições reais de combustão tendem a reduzir os valores teóricos de temperatura devido a perdas de calor e efeitos de equilíbrio químico (Fennell; Davis; Mohammed, 2021).

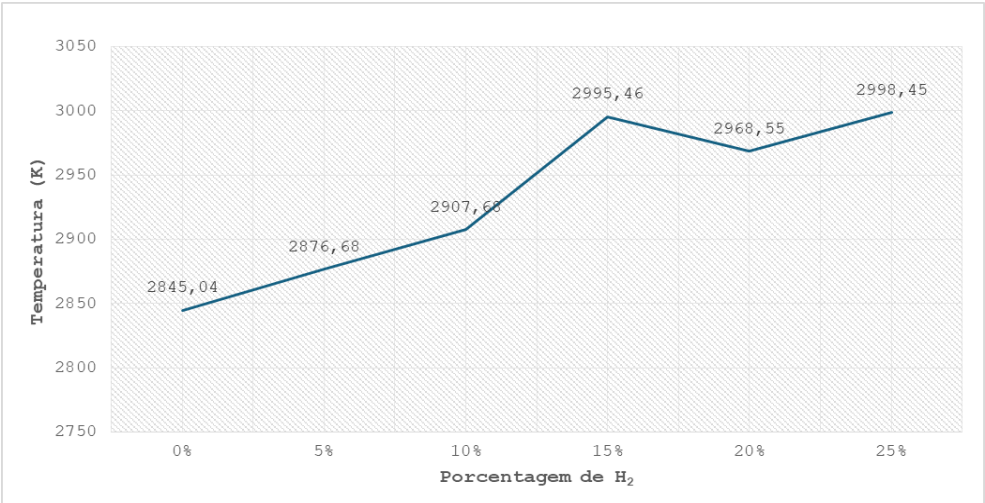


Figura 03: Temperatura da chama (K) em função da porcentagem de H_2.

Além disso, observa-se que o aumento da participação do hidrogênio exige maior controle do fornecimento de oxigênio, uma vez que a combustão desse gás demanda condições específicas para ocorrer de forma eficiente. A insuficiência de oxigênio pode limitar a liberação de energia e comprometer o desempenho térmico do sistema, reduzindo a eficiência da reação e afetando a estabilidade da chama. Nesse sentido, torna-se fundamental o ajuste adequado da relação combustível-comburente, bem como o monitoramento contínuo das condições operacionais do forno. Esse aspecto evidencia a necessidade de ajustes operacionais mais refinados e da integração com tecnologias complementares, como sistemas de recuperação de calor residual, que contribuem para a melhoria do aproveitamento energético e para a estabilização do processo térmico.

Outro ponto relevante refere-se às implicações práticas do uso do hidrogênio em fornos industriais. Embora contribua significativamente para a redução das emissões de CO_2, o aumento da temperatura da chama pode favorecer a formação de óxidos de nitrogênio (NOx), especialmente em ambientes com presença de nitrogênio proveniente do ar de combustão. Além disso, temperaturas mais elevadas podem impactar a durabilidade de materiais refratários, acelerando processos de desgaste e exigindo manutenção mais frequente. Alterações na distribuição térmica também podem influenciar a qualidade do clínquer produzido, tornando necessário um controle mais rigoroso da operação. Dessa forma, sua adoção deve ser analisada de maneira sistêmica, considerando não apenas os benefícios ambientais, mas também os impactos técnicos, econômicos e operacionais associados à sua implementação.

Como contribuição aplicada, foi desenvolvido um Produto Técnico Tecnológico na forma de memorial de cálculo, estruturado como guia metodológico para replicação das simulações. Esse material organiza de maneira clara e sistematizada os procedimentos adotados ao longo do estudo, permitindo sua aplicação em diferentes contextos industriais e facilitando a compreensão das etapas de cálculo. Além de servir como ferramenta de apoio à tomada de decisão, o memorial contribui para a disseminação do conhecimento técnico e para a padronização de análises semelhantes, possibilitando sua utilização em estudos futuros e em processos de otimização operacional no setor cimenteiro.

Considerações finais

Os resultados demonstram que a utilização do hidrogênio verde como combustível em fornos de clínquer apresenta potencial significativo para a redução das emissões de CO_2, ao mesmo tempo em que mantém condições adequadas de temperatura para o processo produtivo. A substituição parcial de combustíveis fósseis mostrou-se capaz de promover ganhos ambientais relevantes, especialmente em percentuais entre 5% e 15%, nos quais se observa equilíbrio entre eficiência térmica e estabilidade da combustão.

Entretanto, a adoção dessa tecnologia requer atenção a fatores como fornecimento de oxigênio, controle de temperatura e adaptação da infraestrutura existente. As oscilações observadas em percentuais mais elevados indicam que a substituição não pode ser realizada de forma indiscriminada, sendo necessário planejamento técnico e operacional.

O estudo contribui para o avanço do conhecimento na área ao integrar análise teórica e aplicação prática, oferecendo subsídios para a implementação de soluções de baixo carbono na indústria do cimento. Adicionalmente, abre perspectivas para pesquisas futuras, incluindo validação experimental, otimização de parâmetros operacionais e avaliação econômica da utilização do hidrogênio verde em escala industrial.

Referências Bibliográficas

ARUJO, G. J. F. O coprocessamento na indústria de cimento: definição, oportunidades e vantagem competitiva. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades,** v. 8, n. 57, p. 52-61, 2020. Disponível em: https://www.academia.edu/download/62707296/O_coprocessamento_na_industria_de_cimento_definicao__oportunidades_e_vantagem_competitiva20200401-47892-ks7tms.pdf. Acesso em: 26 mar. 2024.

CAMPOS, M.; LEÃO, C.; AMORIM, L. O hidrogênio como fonte de energia: uma visão regulatória. **Ensaio Energético,** v. 9, 2021. Disponível em: https://www.gesel.ie.ufrj.br/app/ webroot/files/publications/08_campos_09.03.2021.pdf. Acesso em; 28 ago. 2024.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica.** Tradução: Paulo Maurício Costa Gomes. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

FENNELL, P. S.; DAVIS, S. J.; MOHAMMED, A. Descarbonizando a produção de cimento. **Joule,** v. 4, p. 1301-1311, jul. 2021.

IGHALO, J.; ADENIYI, A. G. A perspective on environmental sustainability in the cement industry. **Waste Disposal & Sustainable Energy,** v. 2, p. 161-164, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s42768-020-00043-y. Acesso em: 28 jun. 2024.

NHUCHHEN, D. R.; SENTE-SE, C. P; LAYZELL, D. B. Decarbonization of cement production in a hydrogen economy. **Applied Energy,** v. 317, 2022, 119180.

UTILIZAÇÃO DA MATRIZ SWOT COMO PARTE DO PLANEJAMENTO CLIMÁTICO DO SETOR DE AGRICULTURA, FLORESTA E OUTROS USOS DA TERRA (AFOLU) DO PARANÁ

1 Matheus Bueno Patrício, 2 Amanda Pontes Maia Pires Alcantara, 3 Débora Lia Perazzoli, 4 Laura Eller Oliveira, 5 Humberto Sadao Hirae, 6 Helder Rafael Nocko

1 EnvEx Engenharia e Consultoria e Universidade de Santiago de Compostela, e-mail:eng.matheusbueno@gmail.com; 2 EnvEx Engenharia e Consultoria e Universidade Federal do Ceará: amanda.alcantara@envexengenharia.com.br, 3 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: debora.perazzoli@envexengenharia.com.br; 4 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: laura.oliveira@envexengenharia.com.br*; 5 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail:* humberto.hirae@envexengenharia.com.br*; 6 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: helder@envexengenharia.com.br*

Palavras-chave: Mitigação e Adaptação climática; Planejamento setorial.

Introdução

A transição para uma economia de baixo carbono, com foco na redução das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) antropogênicas deixou de ser apenas uma tendência e se tornou uma necessidade urgente em todo o mundo. Nesse cenário, o Estado do Paraná, localizado no sul do Brasil, tem assumido um papel importante com sua trajetória climática ao formalizar o seu compromisso com a neutralização das emissões de GEE até o ano de 2050 pelo Decreto Estadual n.º 8.937, de 4 de outubro de 2021, o qual estipula a adesão do estado às campanhas globais *Race to Zero* e *Race to Resilience* (Paraná, 2021). A trajetória climática paranaense estabelece metas intermediárias de redução para os horizontes de 2030 e 2040 (Paraná, 2021), alinhadas com os preceitos do Acordo de Paris (ONU, 2015) e com a Política Estadual de Mudanças Climáticas (Paraná, 2012).

Neste contexto, o monitoramento e o planejamento de medidas de descarbonização tornam-se imperativos, especialmente para os setores de maior impacto. O Segundo Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado do Paraná (2INVPR), que abrange o período de 2005 a 2019, diagnosticou as emissões divididas em quatro setores principais. O setor de Agricultura, Floresta e Outros Usos da Terra (AFOLU) destacou-se como a principal fonte emissora em 2019, representando 54% das emissões totais do estado, o que equivale a cerca de 38.811 Gg CO_2eq (Paraná, 2023a). Uma análise detalhada deste montante revela que a pecuária é responsável por 45% das emissões do setor de AFOLU, seguida pela agricultura com 33% e pelas Mudanças de Uso da Terra (MUT) com 22%. Os bovinos de corte e leite emitiram 15,1 Mt CO_2e em 2019, contudo registraram uma redução de 17% entre 2005 e 2019. Em contrapartida, as emissões provenientes da suinocultura e da avicultura sofreram aumentos expressivos de 136% e 124%, respectivamente, no mesmo período. Apesar de o setor AFOLU no seu todo ter apresentado uma redução global de 7% nas emissões entre 2005 e 2019, a intensificação de tecnologias de baixa emissão é vital (Paraná, 2023a).

Nesse cenário, o cumprimento da meta de neutralidade requer necessidade de atuação estratégica, baseada na realidade do Estado e voltado a superar fraquezas e ameaças à descarbonização, além de aproveitar forças e oportunidades para o combate às mudanças climáticas, conciliando com o desenvolvimento sustentável da agropecuária, devido à importância deste setor para o cenário de emissões do Estado do Paraná. Dessa forma, o presente estudo tem por objetivo apresentar os resultados da utilização da metodologia de análise SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*) como ferramenta inicial para o planejamento de estratégias de mitigação de emissões de GEE e adaptação climática do Estado do Paraná.

Material e Métodos

Considerou-se o perfil de emissões do Estado do Paraná apresentado no 2INVPR para realizar um processo de *benchmarking* com o objetivo de identificar boas práticas de descarbonização no setor AFOLU a nível internacional. Essa identificação visou compreender as forças (Fo), fraquezas (Fa), oportunidades (Op) e ameaças (Am) relacionadas à implementação de estratégias de descarbonização no Estado do Paraná. Nesse levantamento, considerou-se a existência de medidas de descarbonização previstas em planos, programas e ações estaduais, além da avaliação do perfil de emissões do Estado apresentado no 2INVPR (Paraná, 2023a; 2023b; 2025).

Para a avaliação das barreiras e limitações associadas à implementação das medidas, utilizou-se a ferramenta de planejamento estratégico denominada análise SWOT. Essa metodologia foi aplicada para avaliar a interação entre fatores internos e externos que influenciam o potencial de mitigação no Estado, subsidiando a proposição de ações estratégicas com base nos resultados do *benchmarking* previamente realizado. Adotou-se a metodologia apresentada por Dutra (2014), que propõe uma classificação baseada na magnitude e na importância dos fatores. Assim, as forças e oportunidades foram categorizadas em uma escala de 1 a 3, na qual 1 corresponde à baixa magnitude, 2 à média magnitude e 3 à alta magnitude. Em relação às fraquezas e ameaças, estas foram classificadas em uma escala de -1 a -3, na qual -1 corresponde à baixa magnitude, -2 à média magnitude e -3 à alta magnitude. Quanto à importância, os valores foram atribuídos em uma escala de 1 a 3, conforme a prioridade que cada variável apresentava para o conjunto de medidas de descarbonização do setor de referência. A classificação total do fator foi obtida a partir do produto entre a magnitude e a sua importância (Dutra, 2014), podendo variar de -9 a 9. Por fim, com base nesses resultados, construiu-se a matriz de análise SWOT, que apresenta o produto entre forças, fraquezas, oportunidades e

ameaças. Além disso, conforme a metodologia, apresenta-se as somas dos quadrantes, que auxilia a definir o posicionamento do planejamento estratégico.

Resultados e Discussão

A Tabela 01 apresenta os resultados da análise SWOT, bem como as respectivas forças, fraquezas, oportunidades e ameaças identificadas para a implementação de medidas de descarbonização no Estado do Paraná. As forças com maior pontuação referem-se à atuação do Governo Estadual nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e à existência de planos, programas e ações relacionados à descarbonização do setor. Contudo, observa-se deficiência no financiamento, evidenciada pela dependência de fontes externas de recursos, que extrapolam a atuação do Poder Executivo estadual. Em relação às oportunidades, destacam-se o Sistema Brasileiro de Comercialização de Emissões e a possibilidade de expansão de uma infraestrutura capaz de atender às demandas das tecnologias de baixo carbono, configurando-se como oportunidades para a economia do Estado e como uma forma de contribuir para a viabilidade das ações destinadas a mitigar a ameaça mais relevante identificada na análise, relacionada aos impactos das mudanças climáticas e eventos extremos sobre o próprio setor agropecuário.

Descarbonização do Setor AFOLU	Classificação	Op1: Disponibilidade de mercado e crescente demanda por produtos agrícolas com baixo impacto ambiental	Op2: Possibilidade de remuneração para serviços ecossistêmicos	Op3: Interesse internacional por ações de restauração da vegetação nativa da Mata Atlântica	Op4: Financiamento climático global disponível	Op5: Interesse do setor privado em descarbonização	Op6: Expansão da cadeia de insumos e disponibilidade de tecnologias relacionadas ao setor de AFOLU	Op7: Regulamentação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE)	Am1: Mudanças climáticas e o aumento da frequência de eventos climáticos extremos	Am2: Desmatamento ilegal	Am3: Pressão de grandes mercados por produções intensivas e rápidas	Am4: Alteração e descontinuidade de políticas públicas	Am5: Degradação do solo devido à intensificação agrícola sem manejo sustentável	Am6: Conflitos fundiários	Am7: Disseminação de pragas e doenças em cultivos e florestas impulsionada pelas mudanças climáticas	Am8: Indisponibilidade de sementes para restauração
Classificação		3	3	6	6	6	9	9	-9	-6	-6	-4	-4	-4	-4	-3
Fo1: Legislação pertinente publicada	2	6	6	12	12	12	18	18	-18	-12	-12	-8	-8	-8	-8	-6
Fo2: Experiência prévia com práticas de manejo de baixo carbono	3	9	9	18	18	18	27	27	-27	-18	-18	-12	-12	-12	-12	-9
Fo3: Existência de propriedades rurais com tecnologias de baixo carbono implementadas	6	18	18	36	36	36	54	54	-54	-36	-36	-24	-24	-24	-24	-18
Fo4: Interesse político na disseminação das práticas agropecuárias de baixo carbono	6	18	18	36	36	36	54	54	-54	-36	-36	-24	-24	-24	-24	-18
Fo5: Estruturação do sistema de créditos de biodiversidade	6	18	18	36	36	36	54	54	-54	-36	-36	-24	-24	-24	-24	-18
Fo6: Plano Estadual para adaptação à mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária (Plano ABC+)	9	27	27	54	54	54	81	81	-81	-54	-54	-36	-36	-36	-36	-27
Fo7: Programas, projetos e iniciativas federais e estaduais existentes	9	27	27	54	54	54	81	81	-81	-54	-54	-36	-36	-36	-36	-27
Fo8: Contribuição com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS 2, 13 e 15)	9	27	27	54	54	54	81	81	-81	-54	-54	-36	-36	-36	-36	-27
Fa1: Dependência de financiamento externo para implementação de medidas	-9	-27	-27	-54	-54	-54	-81	-81	81	54	54	36	36	36	36	27
Fa2: Resistência cultural à implementação de medidas de baixo carbono e custos iniciais	-6	-18	-18	-36	-36	-36	-54	-54	54	36	36	24	24	24	24	18
Fa3: Falta de capacitação técnica e gestão profissional de propriedades rurais	-4	-12	-12	-24	-24	-24	-36	-36	36	24	24	16	16	16	16	12
Fa4: Infraestrutura inexistente ou limitada para monitoramento e reporte dos indicadores e Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs)	-4	-12	-12	-24	-24	-24	-36	-36	36	24	24	16	16	16	16	12

Escala de cor	1 a 20	21 a 40	41 a 60	> 60

Soma: Força x Oportunidade	2100
Soma: Fraqueza x Oportunidade	-966
Soma: Força x Ameaça	-2000
Soma: Fraqueza x Ameaça	920

Tabela 01:Análise SWOT para estratégia "Mitigar a emissão de Carbono decorrentes de atividades agropecuárias". Legenda: forças (Fo), fraquezas (Fa), oportunidades (Op) e ameaças (Am). Fonte: Elaboração própria.

Conforme apresentado por Dutra (2014), quando a soma do quadrante que relaciona forças e oportunidades é a maior, a organização (nesse caso, o Estado), possui vantagens competitivas e pode atuar com agressividade em seu planejamento. Nesse contexto, o setor AFOLU pode compor o planejamento estadual com ações de curto e médio prazo, contemplando medidas e metas mais arrojadas para a descarbonização da economia paranaense. O planejamento das ações pode, portanto, partir do cenário atual de emissões, com foco na potencialização das iniciativas já desenvolvidas pelo Estado. Nesse sentido, faz-se importante

reforçar a destinação de orçamento e buscar sanar as fraquezas identificadas, considerando a possibilidade de atuação direta da administração pública nessas questões.

Em relação à interação entre forças e ameaças, entende-se que as forças existentes podem contribuir para mitigar as ameaças futuras, desde que estas sejam devidamente incorporadas ao planejamento estadual, à destinação de recursos e ao delineamento de políticas públicas, principalmente aquelas que produzam reflexos de longo prazo. Dessa forma, torna-se relevante a implementação de uma lente climática sobre projetos de lei, programas e orçamento público que interajam com o setor AFOLU (Brasil, 2025).

No que tange às oportunidades, relacionadas a influências externas que poderão cooperar com a implementação de medidas e ações voltadas à descarbonização, entende-se que o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE) e o avanço de tecnologias, especialmente aquelas aplicadas ao monitoramento por meio da inteligência artificial, poderão contribuir para a implementação dessas ações ao longo do tempo. Para que esse processo ocorra, o planejamento de políticas públicas deverá considerar a superação de fraquezas e ameaças, como a resistência cultural, a descontinuidade de programas, a deficiência de fontes de financiamento, a disponibilidade hídrica e o aumento da vulnerabilidade climática (Tabela 01). Nesse sentido, a utilização de metodologias de planejamento estratégico baseadas em problemas previamente identificados, classificados como fraquezas ou ameaças, pode auxiliar na construção de programas, projetos e ações públicas direcionados à alocação de recursos para saná-las, buscando a mitigação de emissões e o aumento da resiliência dos sistemas agropecuários (Cassiolato; Gueresi, 2010).

Dessa forma, a análise SWOT demonstra a complexidade e a ampla gama de ações necessárias à mitigação e à adaptação climática, considerando tanto os aspectos positivos quanto as dificuldades existentes. A análise indica que deverão ser trabalhados aspectos complementares para garantir o sucesso das medidas de descarbonização previstas na estratégia estadual. Entre essas ações, destacam-se iniciativas de educação voltadas à sensibilização e à disseminação da cultura da descarbonização, que podem contemplar a apresentação de resultados e experiências de sucesso entre produtores rurais, bem como campanhas de comunicação e valorização dos produtores que adotarem medidas de descarbonização em suas propriedades.

No que se refere às barreiras econômicas, como os altos custos de transição e a dependência financeira externa — fator diretamente relacionado à "Dependência de financiamento externo para implementação de medidas" —, estas representam barreiras severas para a adoção de tecnologias de baixa emissão, especialmente por pequenos produtores, que podem ser superadas por meio de linhas de crédito específicas e direcionadas aos mais vulneráveis. No Paraná, existe o Fundo de Investimento em Direitos Creditórios nas Cadeias Produtivas do Agro (FIDC Agro Paraná), além disso, há possibilidade de remuneração de proprietários rurais por meio do Pagamento por Serviços Ambientais relacionados à captura e armazenamento de carbono (Brasil, 2021). Estas ações são ainda mais centrais, pois podem auxiliar no monitoramento do sucesso das medidas de descarbonização. No setor econômico, outras ações fundamentais são as que se relacionam com a educação, como a realização de capacitações voltadas à melhoria da gestão financeira da propriedade, além de assistência para diversificação da produção em propriedades mais vulneráveis.

Na dimensão institucional e regulatória, a análise SWOT indica que a "alteração e descontinuidade de políticas públicas" reforça a necessidade de instrumentos regulatórios específicos capazes de garantir um cenário mais estável, especialmente no que se refere aos aspectos financeiros e assistenciais. Nesse sentido, tais elementos evidenciam a importância da gestão pública como indutora do processo de descarbonização. Assim, para além das ações descritas em planos, torna-se imperativa a construção de um ambiente mais propício a essa finalidade, por meio da destinação de orçamento público direcionado à descarbonização, com a devida previsão no Plano Plurianual, na Lei Orçamentária Anual e na Lei de Diretrizes Orçamentárias. Além disso, destaca-se a necessidade de capacitação de gestores, técnicos e agentes financeiros que atuam em instituições públicas e privadas, de modo a ampliar a compreensão sobre as medidas de descarbonização e auxiliar na sua incorporação ao cotidiano administrativo.

No que tange aos aspectos técnicos, a existência de um ecossistema de inovação e extensão contribui para a superação dos desafios identificados. Portanto, o fortalecimento das instituições e organizações envolvidas, tais como órgãos de extensão e assistência rural, secretarias estaduais e municipais, federações e cooperativas, pode auxiliar na superação de outras problemáticas listadas, como a falta de mão de obra qualificada e a necessidade de infraestrutura local. Empresas públicas e privadas que atuam no Paraná poderão desenvolver e implementar medidas inovadoras, desde que disponham de incentivos adequados, contribuindo para sanar desafios em cadeias estratégicas para a descarbonização, como o uso de biofertilizantes, a produção de biometano e a eficiência no uso de insumos, especialmente no uso da água.

Dessa forma, a análise SWOT apresenta um panorama geral voltado à identificação de ações que vão além da implementação direta das medidas de descarbonização, agregando viabilidade e buscando garantir o sucesso e a continuidade dessas medidas, aspecto que se torna ainda mais relevante quando considerados os cenários climáticos e produtivos futuros.

Considerações Finais

A análise SWOT evidenciou que o setor AFOLU do Paraná apresenta condições favoráveis para a implementação de medidas de descarbonização, especialmente em função das forças institucionais e das oportunidades associadas ao avanço tecnológico e aos instrumentos de mercado. Entretanto, a superação de fragilidades relacionadas ao financiamento, à continuidade das políticas públicas e à vulnerabilidade climática será fundamental para garantir a efetividade e a permanência das ações propostas. Dessa forma, destaca-se a importância do fortalecimento da governança pública e do planejamento estratégico para a consolidação de uma trajetória de baixo carbono no Estado.

No cenário paranaense, planejar a descarbonização vai muito além de apenas cumprir exigências ambientais: trata-se de uma questão estratégica para manter a força e a estabilidade da economia. Tendo em vista que o agronegócio possui grande representatividade na economia do Estado, reduzir as emissões significa proteger a produção dos impactos climáticos e, ao mesmo tempo, garantir que os produtos do Paraná alcancem maior relevância em mercados globais que valorizam e exigem uma baixa pegada de carbono.

Referências Bibliográficas

BRASIL. *Cidades e Adaptação Climática – Cartilha para Estados e Municípios. Ministério das Cidades*: Brasília, DF, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/desenvolvimento-urbano-e-metropolitano/cidade-protagonista-da-acao-climatica/arquivos/CartilhaCidadeseAdaptacaoClimatica_Vfinal.pdf. Acesso em 07 de abril de 2026.

BRASIL. *Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021*. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 14 jan. 2021. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14119.htm>. Acesso em: 7 abr. 2026.

CASSIOLATO, M.; GUERESI, S. *Como elaborar modelo lógico: roteiro para formular programas e organizar avaliações*. Instituto de Pesquisa Econômica aplicada, Brasília, 2010.

DUTRA, D. V. *A análise SWOT no Brand DNA Process: um estudo da ferramenta para aplicação em trabalhos em branding*. 2014. Dissertação (Mestrado em Design e Expressão Gráfica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Acordo de Paris*. Paris: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-08/Acordo-de-Paris.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2026.

PARANÁ. *Decreto nº 8.937, de 4 de outubro de 2021.* Dispõe sobre a adesão do Estado do Paraná às campanhas "Race to Zero" e "Race to Resilience", no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Diário Oficial do Estado do Paraná, Curitiba, PR, n. 11031, 4 out. 2021.

PARANÁ. *Lei nº 17.133, de 25 de abril de 2012.* Institui a Política Estadual sobre Mudança do Clima. Diário Oficial do Estado do Paraná, Curitiba, PR, 25 abr. 2012.

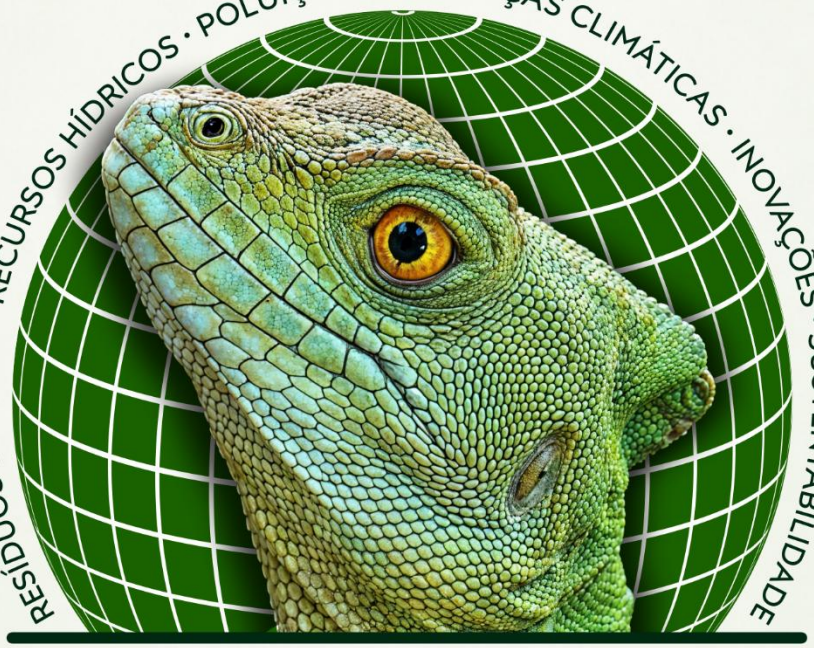
PARANÁ. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável (SEDEST). *Inventário de emissões de gases de efeito estufa do Paraná: relatório técnico (2005–2019).* Curitiba: SEDEST, 2023a.

PARANÁ. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. *Plano estadual para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária*. Curitiba: Secretaria de Agricultura e Abastecimento, 2023b.

PARANÁ. Secretaria de Estado do Planejamento. *Plano de descarbonização da economia paranaense: relatório técnico consolidado.* Curitiba: Governo do Estado do Paraná, 2025. Disponível em: <https://www.planejamento.pr.gov.br/Pagina/Plano-de-Descarbonizacao-da-Economia-Paranaense>. Acesso em: 27 mar. 2026.

ÁREA TEMÁTICA 6

ECONOMIA CIRCULAR E BIOECONOMIA



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

UMA COMPARAÇÃO DE EMISSÕES DE CO2 ENTRE A FABRICAÇÃO E A MANUTENÇÃO DE TRANSFORMADORES ELÉTRICOS

1 Samyres Damasceno Margotti, 2 Gabriela Lavinia Moura Da Silva, 3 Lucas Da Silva Sales, 4 José Roberto Soares, 5Ludmila Patrícia Lucchesi Henriques do Carmo

1Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: samyresmargotti@hotmail.com; 2Data Engenharia LTDA, e-mail: gabriela.silva@data.com.br; 3Data Engenharia LTDA, e-mail: lucas.sales@data.com.br; 4Data Engenharia LTDA, e-mail: jose.soares@data.com.br, 5Data Engenharia LTDA, e-mail: ludmila.lucchesi@data.com.br

Palavras-chave: Transformadores; Reforma; Inventário de Emissões; Análise do Ciclo de Vida

Introdução

A junção da crescente demanda por energia aos esforços pela modernização da rede elétrica e pela integração de fontes de energia renováveis no sistema elétrico têm contribuído para o aumento da demanda global de transformadores elétricos. Em 2022, o mercado global de transformadores foi avaliado em US$22,83 bilhões, com uma projeção de crescimento a uma taxa composta de crescimento anual de 7,1% entre 2023 a 2030 (Grand View Research, 2026). Concomitantemente, o ciclo de vida completo de transformadores contribui com aproximadamente 4% das emissões de CO2-eq de todo sistema de energia elétrica. Considerando uma abordagem *cradle-to-gate* (do berço ao portão), o consumo de energia elétrica, a compra de matérias-primas e o transporte dos bens e serviços são as principais fontes de emissões de gases do efeito estufa no processo de produção de transformadores (Foster & Bedrosyan, 2014; Cai et al., 2022). Esses dados contribuem para destacar a relevância de estudos de ciclo de vida desses equipamentos, em especial estudos que se comprometem com a redução de emissões geradas e que valorizam a circularidade de tais equipamentos. Atividades circulares são aquelas que, ao mesmo tempo, conseguem gerar valor e reduzir o desperdício e a poluição. Manutenções, reparos, reformas e remanufaturas são exemplos de atividades circulares que podem ser adotadas por empresas do setor industrial em prol da redução de emissões de gases do efeito estufa (Ellen MacArthur Foundation, 2025). Dentre os pilares que sustentam o conceito de *net-zero* (estado em que há um equilíbrio entre os gases do efeito estufa que entram na atmosfera e os gases que são removidos desta) há uma questão fundamental, a redução da demanda de materiais, tão estratégica quanto o desenvolvimento de soluções para a redução de emissões na distribuição e oferta de produtos e serviços (Net Zero, 2026)

A Data Engenharia Ltda. tem como uma de suas atividades principais realizar serviços diversos de manutenção de transformadores elétricos, incluindo a reforma total. Através das reformas, a empresa consegue reaproveitar até 73% das partes e peças de um transformador. Durante a pandemia, a empresa inaugurou sua própria linha de produção de transformadores novos, aproveitando-se de sua expertise e cadeia de suprimentos já consolidada. Com o domínio técnico dos dois processos, reforma e fabricação, e comprometendo-se com a sustentabilidade e à busca pela redução de emissões de gases do efeito estufa (GEE), a empresa lançou, em 2023, o projeto Reforme-se, com o propósito de comparar os impactos ambientais da reforma e fabricação de transformadores, especialmente em relação às emissões de CO2 geradas em ambos os processos. Para isso, nos primeiros anos de projeto, o Setor de Meio Ambiente adaptou as metodologias de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e Protocolo GHG para calcular a redução das emissões de Ordens de Serviço (OS) de reforma em comparação às de fabricação a partir do peso de óleo e aço reaproveitado, componentes de maior relevância em transformadores. Em 2025, a empresa começou um estudo mais aprofundado, em parceria com a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), para utilizar as abordagens da ACV e Protocolo GHG de forma mais completa, considerando não somente o óleo e aço não produzido, mas todos os processos, compras e transportes realizados. Este resumo tem como objetivo apresentar os primeiros resultados obtidos no estudo em parceria com a UFMG, comparando as emissões de uma OS de fabricação a uma OS de reforma. Considerando uma unidade funcional de 1MVA, observou-se que, enquanto a fabricação de um novo equipamento emite 25,36 toneladas de CO2-eq, uma OS de reforma emite 12,23 toneladas de CO2-eq, representando uma significativa redução de 51,8% das emissões geradas.

Material e Métodos

Esse estudo contempla as diretrizes da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e da Ferramenta Brasileira Protocolo GHG para comparar as emissões geradas por uma OS de reforma e uma OS de fabricação, ambas processadas entre os anos de 2024 e 2025. A ACV consiste em uma avaliação de potenciais impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida de um produto, processo ou serviço, através da quantificação de fluxos de entrada e saída de materiais e energia de um processo. É uma abordagem que pode ser utilizada e adaptada para objetivos específicos, como o cálculo de emissões de GEE. As etapas que podem ser consideradas na ACV de um produto são: 1) aquisição de matérias-primas; 2) fabricação; 3) utilização do produto; 4) reutilização e manutenção do produto; e 4) reciclagem e gestão dos resíduos. Estabeleceu-se, nesse estudo, uma fronteira *cradle-to-gate* (do berço ao portão), uma avaliação que leva em conta desde a extração da matéria prima e/ou a produção dos bens e serviços comprados (berço) até o momento em que o produto sai do portão da fábrica (Santos, 2011). Considerando que a DATA fabrica e reforma transformadores de diferentes capacidades, optou-se por utilizar uma unidade funcional de 1MVA, de modo a permitir a comparação entre dois transformadores de capacidades diferentes, um de 15 MVA (fabricação) e outro de

80 MVA (reforma). Os equipamentos escolhidos para a análise levaram em consideração as recomendações do gerente de Planejamento e Controle da Produção do Setor Transformadores, que identificou as OS de maior relevância para o estudo no período analisado.

Quanto à Ferramenta Brasileira Protocolo GHG, trata-se de uma planilha Excel desenvolvida pelo Programa Brasileiro GHG Protocol, que adapta o método GHG Protocol ao contexto brasileiro e proporciona instrumentos e padrões de qualidade internacional para a contabilização de emissões e publicação de inventários (FGV, 2009). O Protocolo GHG propõe como primeiro passo a identificação de fontes de emissão da organização ou processo inventariado, considerando uma classificação entre escopo 1, escopo 2 e escopo 3. Esta primeira fase foi aqui apoiada pela fase de identificação de entradas e saídas da metodologia ACV. O escopo 1 reúne fontes de emissão que são de propriedade ou controladas pela empresa inventariada, no caso da Data, por exemplo, alguns veículos de transporte de carga usados internamente, como empilhadeiras, são alugados de terceiros mas controlados pela Data, configurando uma fonte de emissão do escopo 1. O escopo 2 identifica fontes de compra de energia para uso em processos e serviços. Na Data, a empresa compra energia renovável da Companhia Elétrica de Minas Gerais (CEMIG). Quanto ao escopo 3, ainda um passo opcional na inventariação, mas muito importante pois costuma ser o de maior relevância na quantidade de emissões, considera-se as emissões indiretas das atividades, tanto as anteriores (fornecedores) quanto às posteriores (consumidores à empresa). As emissões indiretas incluem a produção terceirizada, o transporte de bens comprados, o tratamento de efluentes e resíduos e o transporte e distribuição do próprio produto. Com as fontes de emissão identificadas, o próximo passo consiste em realizar os cálculos das emissões por meio da aplicação de fatores de emissão, que por sua vez são taxas calculadas para a atividade de fonte de emissões. Esses fatores podem ser obtidos no IPCC, na própria Ferramenta Brasileira do Protocolo GHG ou, quando não disponíveis nas opções anteriores, em outras bases internacionais, como a Climatiq.

A primeira fase do presente estudo foi o mapeamento de processos, na qual, assim como nas fases seguintes, contou-se com o apoio e participação de trabalhadores e especialistas das áreas de reforma e fabricação de transformadores da Data. Nesse momento, a equipe do projeto desenhou fluxogramas com as etapas dos dois processos, a partir dos quais se identificou que a maior diferença entre eles é a existência da etapa de peritagem na reforma, processo este em que se faz o diagnóstico do produto a ser reformado. Com os processos de reforma e fabricação mapeados, deu-se início à fase de identificação de todas as entradas e saídas, a partir das quais tornou-se possível apontar os possíveis impactos ambientais da reforma e da fabricação e, principalmente, as fontes de emissões de gases do efeito estufa. Em seguida, teve início a fase de coleta de dados das duas OS selecionadas, uma etapa fundamental para garantir a qualidade dos resultados finais. Destaca-se que, ao longo da fase de coleta de dados, a equipe de projeto deparou-se com dados específicos das OS selecionadas, como a compra de bens e serviços, e dados do Setor Transformadores que não seriam passíveis, inicialmente, de serem atribuídos de modo individual às OS, como o uso de computadores pelos setores administrativos ou a compra de bens e serviços de uso comum. Por esse motivo, os dados foram divididos em ‘dados específicos’ e ‘dados agregados’, de modo que os ‘dados agregados’ tivessem suas emissões calculadas separadamente e, posteriormente, fossem atribuídos proporcionalmente à cada OS considerando a quantidade total de OS de reforma e fabricação processadas no período inventariado.

Os dados agregados obtidos incluem categorias dos 3 escopos do Protocolo GHG. Do escopo 1, tem-se dados de combustão estacionária, referente ao uso de gerador de energia, combustão móvel, considerando a quantidade de combustível comprada para transporte de cargas, e emissões fugitivas, considerando o uso de ar-condicionado e extintores de incêndio nos setores de produção. No escopo 2, considera-se o consumo de energia elétrica dos equipamentos de uso comum do setor, como aspiradores de pó para limpeza ou o uso de computadores pelas áreas administrativas. Finalmente, do escopo 3, considera-se a compra de bens e serviços utilizados em diferentes OS, o transporte e distribuição desses mesmos bens e serviços, as viagens de negócio realizadas e as emissões casa-trabalho, tendo em conta o deslocamento realizado pelos trabalhadores do setor em três meios de transporte distintos, van, ônibus e veículo particular (escopo 3). Destacamos que algumas categorias de emissões identificadas no Protocolo GHG não aparecem aqui pois não se aplicam à realidade da empresa. Além disso, as emissões referentes ao tratamento de resíduos (escopo 3) ainda não foram consideradas porque a empresa faz o controle de resíduos dos transformadores em conjunto ao controle dos resíduos da seção de motores, outro equipamento reformado pela empresa, e portanto necessita de um estudo aprofundado para identificar a melhor forma de atribuição dessas emissões.

Os dados específicos obtidos englobam as categorias de combustão estacionária (escopo 1), consumo de energia elétrica (escopo 2), compra de bens e serviços (escopo 3) e transporte e distribuição *upstream* (escopo 3). Na combustão estacionária, considera-se a quantidade de acetileno utilizada na soldagem oxiacetilênica. Quanto ao consumo de energia elétrica, considera-se a potência real dos equipamentos elétricos usados nos diversos processos de reforma e fabricação, bem como o tempo de operação por OS de cada um. Para o cálculo das emissões de bens e serviços, considerou-se a lista de todas as compras realizadas para as OS estudadas e, para cada produto, identificou-se o peso médio da unidade e um material dominante, ou seja, o material de maior proporção em sua composição. Identificado o material dominante, foi possível pesquisar os fatores de emissão relacionados. O IPCC recomenda a utilização de dados médios quando não é possível obtê-los com exatidão e, nesse caso, como não havíamos acesso nem ao processo de fabricação dos itens comprados e nem aos dados exatos de sua composição, optou-se por utilizar um fator de emissão para a produção do item de maior relevância na composição dos bens comprados. Finalmente, para calcular as emissões de transporte e distribuição *upstream* dos bens e serviços comprados, considerou-se o fator de emissão de um caminhão médio (que carrega de 7 a 17 toneladas), o peso relativo da carga (porcentagem da carga transportada em relação à capacidade do caminhão) e a distância percorrida, considerando a distância entre o fornecedor de cada item em relação à Data.

Após a coleta de dados, deu-se início à fase de contabilização de emissões geradas pelas OS selecionadas. Para isso, a equipe de projeto desenvolveu uma ferramenta de cálculo própria, em Excel, inspirada na Ferramenta Brasileira do Protocolo

GHG. Optou-se por não utilizar a ferramenta já existente pois esta foi desenvolvida para a construção de inventários de organizações completas e, por isso, possui muitas informações e dados que não seriam usados na ACV dos transformadores selecionados. Apesar disso, a planilha do projeto Reforme-se, que ainda está em desenvolvimento, segue a mesma lógica da Ferramenta Brasileira do Protocolo GHG, combinando dados de atividade obtidos a fatores de emissão equivalentes. Com esses dados, realiza-se o cálculo: *dados de atividade x fator de emissão = emissões de GEE*. Salientamos que, devido à existência de dados específicos e dados comuns, foram desenvolvidas duas planilhas para cálculo das emissões. A planilha de dados agregados reúne dados de atividade do setor transformador de todo ano de 2025 e, a partir do resultado de emissões de CO2-eq totais, realiza-se o cálculo proporcional de emissões totais por *quantidade total de OS processadas no período*. O resultado dessa relação é posteriormente somado às emissões específicas de cada OS inventariada.

Resultados e Discussão

A primeira fase da contabilização das emissões de CO2 geradas consistiu no cálculo de emissões de toda fábrica de transformadores no ano de 2025, considerando os dados agregados que se aplicam tanto aos casos de reforma quanto aos casos de fabricação. Nesse âmbito, considera-se também a quantidade total de OS processadas no mesmo período, 20 de reforma e 20 de fabricação. Os resultados apontam que, em 2025, o setor de Transformadores emitiu um total de 7.372,33t de CO2-eq, considerando emissões de combustão estacionária, combustão móvel, consumo de energia elétrica, produção de bens e serviços, transporte e distribuição (*upstream*), viagens a negócio e emissões casa-trabalho. Observa-se que as emissões relacionadas à produção de bens e serviços configuram a parte mais relevante das emissões (89,1%). Considerando o total de 40 OS trabalhadas nesse período, indica-se uma proporção de 184,3 t de COeq- agregado por OS.

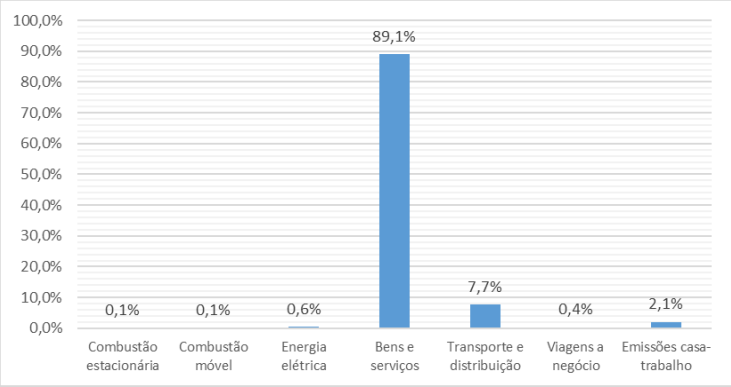


Gráfico 01: Proporção das emissões geradas pelo setor Transformadores em 2025.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A OS de fabricação selecionada para o estudo começou a ser fabricada em 26 de novembro de 2024 e foi concluída em 10 de outubro de 2025. Trata-se de uma OS de 15MVA e de corrente alternada. Essa OS gerou um total de 196,15 t de CO2-eq, considerando apenas os dados específicos, e um total de emissões de 380,46 t de CO2-eq (somando 196,15 t de CO2-eq a 184,31 t de CO-eq agregado). Quanto a OS de reforma estudada, trata-se de um transformador de 30 MVA, também de corrente alternada, e que foi processado no período entre 14 de novembro de 2024 e 4 de maio de 2025 Considerando apenas os dados específicos, essa OS de reforma gerou 182,68 t de CO2-eq, enquanto que, considerando o conjunto dados específicos mais dados agregados, ela gerou 366,9 t de CO2-eq (Figura 01). Observa-se que a OS de reforma possui o dobro de potência da OS fabricada e, ainda assim, sua reforma gerou menos emissões do que a OS de fabricação comparada. Em uma mesma unidade funcional, de 1MVA, a OS de fabricação gerou 25,36 t de emissões de CO2-eq/MVA, enquanto a de reforma gerou 12,23 emissões de CO2eq/MVA, o que representa uma redução de aproximadamente 51,8% das emissões.

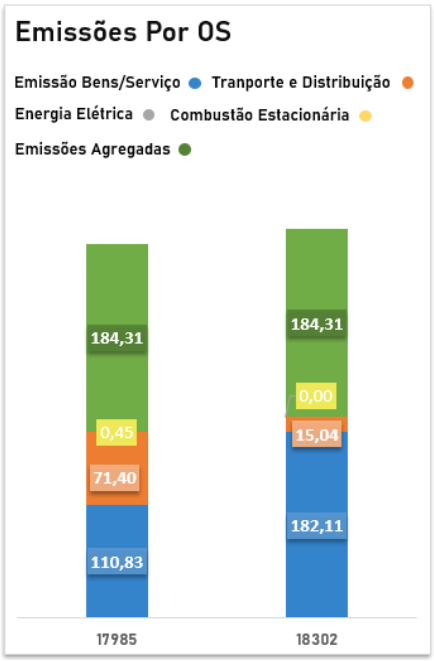


Figura 01: Comparação das emissões de CO2 geradas pelas OS de reforma e fabricação.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Considerações Finais

Este resumo apresenta uma comparação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) geradas pela fabricação e reforma de transformadores elétricos, utilizando-se de uma combinação das abordagens ACV e Protocolo GHG. Os dados do ciclo de vida de dois transformadores com diferentes níveis de tensão e capacidades, 15 MVA (fabricado) e 30 MVA (reformado), são utilizados para calcular as emissões de GEE. Através dessa comparação, vemos que a reforma possibilita uma redução significativa da quantidade de emissões em relação à fabricação (51,9%). Os resultados obtidos mostram que os serviços de reforma de transformadores realizados pela Data Engenharia Ltda. reduzem significativamente a quantidade de GEE emitido na atmosfera em comparação à fabricação de novos equipamentos, ainda assim, trata-se de um estudo que necessita de continuidade, especialmente em relação à quantidade reduzida de OS comparadas e às diferenças significativas de características dimensionais das OS estudadas.

Referências Bibliográficas

CAI, S.; YING, S.; WANG, X.; WEI, Z.; NIU, Y.; ZHANG, Q.; GONG, Y. Calculation and analysis of life cycle carbon emissions of distribution transformers. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND APPLICATIONS (ICHVE), 2022, Chongqing, China. Anais [...]. Chongqing: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2022. p. 1–5.

Ellen MacArthur Foundation. Improving climate emissions accounting to accelerate the circular economy transition. [S.l.]: Ellen MacArthur Foundation, 2025.

FGV. Centro de Estudos em Sustentabilidade da EAESP; WRI. Contabilização, quantificação e publicação de inventários corporativos de emissões de gases de efeito estufa: especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol. 2. ed. São Paulo: FGV, 2009

FOSTER, Vivien; BEDROSYAN, Daron. Understanding CO2 emissions from the global energy sector. Washington, DC: World Bank, 2014. (Live Wire Knowledge Note Series, n. 2014/5).

Grand View Research. Power transformer market size, share & trends analysis. Disponível em: https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/power-transformer-market-size/global. Acesso em: 24 mar. 2026.

Net Zero Climate. What is net zero? Disponível em: https://netzeroclimate.org/what-is-net-zero-2/. Acesso em: 24 mar. 2026.

SANTOS, Maria Teresa Rodrigues. Avaliação do Ciclo de Vida de um transformador tipo Core produzido na Efacec Energia, Máquinas e Equipamentos Eléctricos, S.A. Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente – Ramo de Gestão. Porto, Julho de 2011.

REÚSO SEGURO DE EFLUENTES SANITÁRIOS: AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA INTEGRADA APÓS TRATAMENTO AVANÇADO

1 Lucas Gustavo da Costa, 2 Gabrielly Machado dos Santos, 3 Maria Gabriela Franco de Lima, 4 Jeamylle Nilin, 5 Adão de Siqueira Ferreira, 6 Sidney Fernandes Sales Jr., 7 Enrico Saggioro, 8 Alam Gustavo Trovó

1 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: lucasgustavodacosta@ufu.br; 2 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: gabrielly.santos@ufu.br; 3 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: mgf.lima@ufu.br; 4 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: nilin@ufu.br; 5 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: adaoferreira@ufu.br; 6 Instituto Oswaldo Cruz, e-mail: sidneysalesjunior@gmail.com; 7 Instituto Oswaldo Cruz, e-mail: enrico.saggioro@fiocruz.br; 8 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: alamtrovo@ufu.br

Palavras-chave: agricultura; economia circular; segurança hídrica

Introdução

A agricultura irrigada evidencia um desafio central para a sustentabilidade, concentrando a maior parcela da demanda hídrica (ANA, 2023). Em um cenário de crescente pressão por alimentos, esse quadro configura um importante gargalo para a segurança hídrica. Além disso, a disponibilidade d'água está diretamente associada à soberania nacional, à competitividade industrial e à consolidação de modelos ecoeconômicos de produção. Logo, garantir água em quantidade e qualidade adequadas é condição essencial para o desenvolvimento sustentável e para a estabilidade de setores estratégicos.

Nesse contexto, o reuso de efluentes sanitários tratados é uma alternativa inteligente. Ao substituir fontes convencionais, reduz-se a captação de água doce e a pressão sobre mananciais, ao mesmo tempo em que se aproveitam nutrientes presentes nesses efluentes, diminuindo a dependência de fertilizantes. Entretanto, para viabilizar o reuso de forma segura (especialmente na agricultura) é fundamental o aprimoramento no tratamento dos efluentes. Nesse sentido, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) destacam-se como tecnologias complementares capazes de remover contaminantes de preocupação emergentes (CPEs) e microrganismos resistentes em tratamentos convencionais. Assim, a integração entre tratamento avançado e reuso planejado representa um caminho promissor para transformar um passivo ambiental em um recurso estratégico, alinhando inovação tecnológica à gestão sustentável da água.

Os POAs geram espécies radicalares capazes de degradar CPEs, porém, a eficiências dependem do tipo de radical gerado, dos oxidantes empregados e das características físico-químicas dos contaminantes e matriz (Marsson *et al*., 2022). No início da pandemia de COVID-19, colchicina (COL) e nitazoxanida (NTZ) foram usadas no tratamento e prevenção da doença, enquanto o sulfametoxazol (SMX), pelo uso intensivo, é frequentemente encontrado em ambientes aquáticos. Esses compostos apresentam estruturas moleculares distintas (COL tem alto impedimento estérico, NTZ possui regiões polares e o SMX, áreas de elevada densidade eletrônica), características que os tornam representativos para simular a diversidade de CPEs.

Assim, este trabalho investigou o uso isolado e combinado de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), persulfato ($S_2O_8^{2-}$) e hipoclorito (OCl^-) sob radiação UVC, como precursores de radicais altamente oxidantes para a degradação simultânea de COL, NTZ e SMX em efluente sanitário terciário, aplicando ferramentas de otimização multivariada. Ao fim do processo de degradação, foram realizados estudos sobre a toxicidade aguda do efluente utilizando diferentes endpoints e os organismos modelo *Azospirillum brasilense* (bactéria), *Saccharomyces cerevisiae* (levedura), *Lactuca sativa* (alface), *Allium cepa* (cebola) e *Eisenia andrei* (minhoca).

Material e Métodos

Um planejamento de misturas (PM; software STATISTICA®, versão 8.0) foi usado para investigar a influência simultânea das concentrações de H_2O_2, $S_2O_8^{2-}$ e OCl^- (de 0 a 400 µM) na degradação média de 325 nM dos compostos-alvo (COL: 130 µg/L; NTZ: 100 µg/L; SMX: 82 µg/L) em 10 min de irradiação UVC. Em seguida, com base nos resultados do PM, o método de Planejamento Composto Central Rotacioanl (do inglês, RCCD) de dois fatores (STATISTICA®) foi aplicado para otimizar as concentrações de uma mistura binária entre H_2O_2 e OCl^-, novamente usando a degradação média como fator de resposta.

Os experimentos foram realizados em escala laboratorial em um reator batelada de vidro âmbar (P = 4,3 cm, D = 15,5 cm) sob agitação. 500 mL do efluente em pH natural (6,4 ± 0,2) e enriquecido com os compostos-alvo foi exposto à irradiação de duas lâmpadas de vapor de mercúrio UVC (8 W, 254 nm, 4,9 W/m^2), separadas por 3,5 cm, a 1 cm acima do reator. O efluente usado nos experimentos foi coletado após as etapas de peneiras de barras e desarenadores, manta de lodo anaeróbio de fluxo ascendente e coagulação-floculação. A degradação dos compostos foi monitorada por cromatografia líquida de alta eficiência, com detector de arranjo de diodos.

Os bioensaios foram conduzidos utilizando soluções dos compostos-alvo (325 nmol/L cada, isolados e em mistura – MIXaq), efluente de estação de tratamento de esgoto puro (WWTP), WWTP enriquecido com os compostos antes (MIX_{WWTP}) e após tratamento avançado em tempos correspondentes a 80 % (Diretiva COM(2022)541) e 94 % (limite de quantificação) de degradação. Todos os ensaios tiveram como controle negativo - CN (água destilada/deionizada).

O estresse oxidativo foi avaliado em *Eisenia andrei* expostas por 72 h (n = 15 indivíduos por tratamento), sendo posteriormente determinados os níveis de peroxidação lipídica e carbonilação de proteínas. A fitotoxicidade foi investigada com

sementes de *Lactuca sativa* (n = 30 por tratamento, em triplicata), considerando-se a porcentagem de germinação e o crescimento radicular, expressos por meio do índice de crescimento (do inglês, GI). A citotoxicidade e genotoxicidade foram avaliadas em *Allium cepa* (20 sementes por placa), com análise de 5000 células por amostra, incluindo determinação do índice mitótico (do inglês, MI) e da frequência de aberrações cromossômicas e nucleares. A inibição do crescimento microbiano foi avaliada utilizando *Azospirillum brasilense* e *Saccharomyces cerevisiae*, com densidade celular inicial padronizada e monitoramento a 600 nm.

Os dados foram analisados por métodos estatísticos não paramétricos (Kruskal–Wallis, seguido de teste de Dunn), adotando-se nível de significância de 95 % ($p \leq 0,05$). Essa abordagem integrada permitiu correlacionar diferentes endpoints toxicológicos aos níveis de tratamento aplicados, contribuindo para a avaliação da eficiência e segurança do reuso dos efluentes tratados.

Resultados e Discussão

Aplicando a modelagem especial cúbica em um PM simplex-centroide, a maior degradação dos compostos-alvo foi obtida pela combinação de H_2O_2 (200-320 µM) e OCl^- (200-300 µM). A concentração de $S_2O_8^{2-}$ foi ignorada, pois não teve efeito significativo na resposta. Uma vez determinada a interação entre os oxidantes e a faixa de concentração que gera a melhor degradação, foi aplicado um RCCD para otimizar as condições experimentais. A eficiência máxima foi observada ao utilizar 240 µM de H_2O_2 (8,16 mg/L) e 240 µM de OCl^- (12,3 mg/L). Nessas condições, os compostos-modelo atingiram o limite médio de quantificação (LQ ≤ 92 %) após 30 min de irradiação UVC. Em comparação, 67 ± 5 % e 79 ± 2 % de degradação foram obtidos, respectivamente, com OCl^- e H_2O_2, quando utilizados na forma isolada. Os experimentos controle (fotólise e oxidação no escuro) resultaram em 21 ± 3 % e 55 ± 3 %, respectivamente, confirmando a ação sinérgica dos radicais hidroxila e cloro formados na combinação H_2O_2 + OCl^-.

O estresse oxidativo em minhocas foi avaliado pelos parâmetros de peroxidação lipídica (do inglês, LPO) através da concentração de malondialdeído (MDA; em µmol/g de proteína) e pela peroxidação lipídica (do inglês, PTC; em µmol/g de proteína). A COL não promoveu alterações significativas nos níveis de MDA em relação ao CN, sugerindo baixo potencial de indução de estresse oxidativo nessas concentrações. Já a NTZ e SMX induziram um aumento de 37 % e 23 %, respectivamente, nos níveis de MDA em comparação ao CN, indicando o maior potencial dessas substâncias em provocar danos lipídicos nas membranas celulares. O MIXaq elevou os níveis de MDA em 38 % quando comparado com o NC, apontando para um possível sinergismo da toxicidade dos microcontaminantes-modelo.

O WWTP apresentou um MDA ligeiramente superior ao do NC, possivelmente pela presença de diversos compostos capazes de gerar radicais livres ou desequilibrar o sistema antioxidante das minhocas. Porém, ocorre uma redução de 21 % na concentração de MDA quando esse efluente é enriquecido com os compostos-modelo (MIX_{WWTP}). Um possível efeito antagônico entre COL, NTZ, SMX e o efluente pode ter ocorrido, mas são necessários estudos mais aprofundados para determinar o que levou à redução de LPO. A aplicação do processo H_2O_2/OCl^-/UVC durante 15 min, não provocou mudanças significativas na concentração de MDA em relação ao NC, sugerindo que, nesse tempo de tratamento, os produtos formados não exacerbaram o estresse oxidativo nas minhocas. No entanto, um aumento de 38 % na LPO foi observado após 30 min de tratamento, indicando a formação de subprodutos com LPO mais acentuada que os compostos-modelo iniciais.

Seguindo os resultados da LPO, a análise dos níveis de PTC aponta para uma maior capacidade da NTZ em produzir estresse oxidativo, com um valor 24 % maior que o NC. Esse resultado reforça o potencial da NTZ em afetar tanto os lipídios quanto as proteínas celulares. O WWTP obteve um nível de PTC ligeiramente mais elevado que o NC, similar ao que foi observado para a LPO, indicando que os componentes do efluente podem contribuir para o estresse oxidativo geral nas minhocas. O MIX_{WWTP} apresentou níveis de PTC ligeiramente inferiores ao efluente puro, seguindo a mesma tendência observada para a LPO e sugerindo, novamente, a ocorrência de interações complexas entre a matriz do efluente e os microcontaminantes. Após a aplicação do processo, em nenhum dos tempos analisados foi obtido diferença significativa na PTC em relação ao NC, contrastando com o aumento da LPO observado após 30 min de irradiação. Isso sugere que, embora o processo H_2O_2/OCl^-/UVC prolongado possa levar à formação de subprodutos que causam peroxidação lipídica, esses mesmos subprodutos podem não ser tão eficazes em induzir a carbonilação de proteínas nas minhocas.

A citotoxicidade, avaliada através do IM, pode fornecer informações importantes sobre o potencial que uma substância possui em afetar a divisão celular. Um IM reduzido sugere que a substância pode interferir no ciclo celular, impactando o crescimento e função das células. O CN exibiu um índice relativamente alto (IM = 40 ± 15 %), como esperado, indicando uma taxa normal de divisão celular na ausência de substâncias com potencial tóxico. As soluções aquosas isoladas dos compostos alvo (COL, NTZ e SMX) apresentaram uma variabilidade significativa no IM, com o SMX (IM = 19 ± 17 %) sendo o mais agressivo. Esse perfil sugere que, mesmo na baixa concentração testada (325 nM), o anti-inflamatório pertencente à classe das sulfonamidas pode exercer efeitos citotóxicos nas células de cebola, interferindo nos mecanismos de divisão celular. A solução da mistura dos fármacos (MIXaq, IM = 33 ± 26 %) também mostrou uma citotoxicidade intermediária, sugerindo que a interação entre os diferentes compostos pode modular o efeito tóxico observado para o SMX isoladamente.

O efluente WWTP puro apresentou, considerando a faixa de erro, um índice ligeiramente menor que o controle negativo (IM = 28 ± 11 %), indicando a presença de substâncias no efluente que podem exercer efeito citotóxico, não sendo a princípio, apto para reuso na irrigação. Já o MIX_{WWTP} (IM = 45 ± 15 %) obteve resultado superior que o NC, sugerindo que houve entre os microcontaminantes adicionados e os compostos naturais da matriz, interações capazes de minimizar a citotoxicidade do efluente puro e do SMX isolado. O tratamento do MIX_{WWTP} com o processo H_2O_2/OCl^-/UVC em 15 min de irradiação (80% de degradação; IM = 37 ± 4 %) elevou o índice mitótico quando comparado com o WWTP puro, sugerindo que nesse período, o processo oxidativo não gerou subprodutos com maior toxicidade do que os presentes no efluente bruto. Entretanto, após 30 min de tratamento, foi

observada uma diminuição considerável do IM (26 ± 8 %). Esse resultado sugere que a aplicação do processo H_2O_2/OCl^-/UVC por um período mais prolongado pode levar à formação de produtos de transformação com maior potencial citotóxico para as células de *Allium cepa*. Esse resultado se alinha com a observação feita anteriormente sobre o aumento do estresse oxidativo em *Eisenia andrei* após 30 min de irradiação UVC, reforçando a possibilidade de geração de subprodutos com toxicidade elevada.

A fitotoxicidade foi avaliada pelo IG em sementes de *Lactuca sativa*, onde um IG inferior a 80 % é considerado indicativo de dano ao crescimento do organismo vegetal. As soluções aquosas dos compostos-modelo e sua mistura apresentaram efeito tóxico para a alface, com IGs abaixo de 80 %, isso sugere que esses compostos, mesmo na concentração de 325 nM, podem possuir potencial impacto ambiental caso atinjam ecossistemas terrestres. O WWTP demonstrou uma acentuada fitotoxicidade, com um IG = 47 ± 1 %. O MIX_{WWTP} também apresentou alta inibição (IG = 56 ± 2 %), sugerindo que a adição dos microcontaminantes não modificou o efeito inibitório já presente no efluente puro. Após a aplicação do processo oxidativo em ambos os tempos, não é observado inibição de crescimento, indicando que não foram gerados subprodutos com capacidade de interferir nos processos de germinação e crescimento das radículas de *Lactuca sativa*.

O crescimento microbiano pode ser monitorado através da densidade ótica (DO), que fornece uma estimativa da biomassa celular em suspensão. A possível inibição do crescimento de *Azospirillum brasilense* e *Saccharomyces cerevisiae* foi analisada como um parâmetro complementar de biocompatibilidade do efluente WWTP após tratamento com H_2O_2/OCl^-/UVC para irrigação de lavouras. *A. brasilense* é uma bactéria promotora do crescimento vegetal amplamente utilizada em culturas de soja, enquanto *S. cerevisiae* é uma levedura muito utilizada em processos de fermentação e que possui características nómades, sendo capaz de habitar e persistir em solos (estado dormente), frutos, casca de árvores, flores e outros.

Após 24 h de incubação, não foram observados efeitos inibidores no crescimento de *S. cerevisiae* em contacto com o efluente WWTP puro ou com o MIX_{WWTP} após 15 ou 30 min de tratamento. Isto indica que a degradação dos microcontaminantes orgânicos não gerou produtos capazes de interferir no desenvolvimento da levedura. A solução isolada de NTZ diminuiu abruptamente a OD, indicando que este composto tem o potencial de interferir no ciclo celular de vários organismos, mesmo em baixas concentrações.

Devido ao metabolismo microaerófilo característico da espécie, *A. brasilense* cresce mais lentamente, por isso, a sua DO foi avaliada após 48 h de incubação. A elevada DO obtida pelas amostras bacterianas em contato com o WWTP puro e MIX_{WWTP} sugere que a presença de compostos orgânicos na matriz acelera a fase de *lag* do crescimento. Provavelmente, o efluente fornece substâncias que servem de alimento para *A. brasilense*. Assim, se ocorrerem efeitos tóxicos, estes são mascarados pela ampla disponibilidade de nitrogênio, enxofre, fósforo, cálcio, potássio e outros componentes da matéria orgânica na matriz. O menor crescimento das bactérias em contato com os efluentes após 15 e 30 minutos do processo H_2O_2/OCl^-/UVC pode ser atribuído à redução da matéria orgânica disponível. Isto resulta num meio pobre em nutrientes, o que retarda a fase *log*. Assim, não se deve necessariamente a um maior efeito tóxico. Os resultados anteriores indicam que o tratamento proposto melhora a compatibilidade do efluente com vários organismos. Outro fator que corrobora esta hipótese é o desempenho da amostra NC, que também apresentou um baixo crescimento.

Considerações Finais

O tratamento H_2O_2/OCl^-/UVC apresentou alta eficácia na mitigação da toxicidade de um efluente sanitário real enriquecido com compostos farmacêuticos de diferentes classes. A redução consistente nos efeitos genotóxicos, fitotóxicos e de estresse oxidativo, combinadas com a ausência de citotoxicidade e de inibição do crescimento microbiano, sugerem que os produtos de transformação resultantes têm um impacto ecotoxicológico reduzido. A integração da avaliação de múltiplos parâmetros em vários níveis de organização biológica proporciona uma análise mais robusta e ambientalmente relevante do desempenho do processo, que vai além de critérios exclusivamente químicos. Assim, este estudo contribui para o avanço da utilização de processos oxidativos avançados híbridos, reforçando a segurança dos tratamentos desenvolvidos para reduzir os riscos ecotoxicológicos e possibilitar a reutilização agrícola dos efluentes tratados. No entanto, é recomendado avaliações com grupos maiores de organismos-teste, a identificação dos produtos de transformação formados e a avaliação da eficácia do tratamento em escalas maiores e em diferentes matrizes ambientais.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a FAPEMIG, CNPq, CAPES e RELAM-UFU pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: informe anual 2023. Brasília, DF: ANA, 2023. 112 p. Disponível em: https://www.google.com/search?q=https://www.gov.br/ana/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/conjuntura/conjuntura-2023. Acesso em: 22 mar. 2026.

European Union. **Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council Concerning Urban Wastewater Treatment (recast) COM/2022/541**. Brussels, 2022.

MARSON, E.O.; PANIAGUA, C.E.S.; GOMES JR., O.; GONÇALVES, B.R.; SILVA, V.M.; RICARDO, I.A.; STARLING, M.C.V.; AMORIM, C.C.; TROVÓ, A.G. A review toward contaminants of emerging concern in Brazil: Occurrence, impact and their degradation by advanced oxidation process in aquatic matrices. **Sci. Total Environ.**, v. 836, 2022. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155605.

APROVEITAMENTO DE SUBPRODUTOS DE FRUTAS PARA DESENVOLVIMENTO DE SNACKS E REDUÇÃO DO DESPERDÍCIO ALIMENTAR

1 Luisa Mara Silva Amaral, 2 Aline Mauriam Da Silva Vieira, 3 Diego Henriques Aguiar de Melo, 4 Maria Helena Nasser Brumano, 5 Sandra Aparecida Lima de Moura

1 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: luisa.amaral@aluno.ufop.edu.br; 2 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: aline.mauriam@aluno.ufop.edu.br; 3 Universidade Federal de Ouro Preto e-mail: diego.henriques@aluno.ufop.edu.br; 4 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: marina.brumano@ufop.edu.br; 5 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: sandramoura@ufop.edu.br

Palavras-chave: Rejeito de alimentos; Sustentabilidade; Desidratação.

Introdução

A elevada taxa de perda e desperdício nas cadeias agroalimentares tradicionais representa um gargalo crítico para a sustentabilidade global, exigindo uma transição urgente de modelos lineares de descarte para estratégias de economia circular. Estima-se que uma parcela considerável dos alimentos produzidos no mundo seja perdida ou desperdiçada, o que compromete a segurança alimentar e o uso sustentável dos recursos naturais (FAO, 2022; UNEP, 2024).

No Brasil, esse cenário é particularmente crítico no setor de frutas, onde as perdas podem atingir entre 40% e 50% da produção. Essas perdas estão associadas a limitações logísticas, armazenamento inadequado e à exigência de padrões estéticos que levam ao descarte de produtos ainda próprios para consumo. Como consequência, além dos prejuízos econômicos para os produtores, observa-se o agravamento de impactos ambientais e o enfraquecimento da eficiência da cadeia produtiva.

Nesse contexto, torna-se fundamental a adoção de estratégias que promovam não apenas a redução do desperdício, mas também a revalorização desses materiais dentro do sistema produtivo. Sob essa perspectiva, o aproveitamento de frutas descartadas por meio de tecnologias de processamento, como a desidratação, insere-se nos princípios da economia circular, ao reintegrar resíduos ao ciclo produtivo, transformando-os em produtos de maior valor agregado (TONTUL; TOPUZ, 2017).

Além disso, essa abordagem contribui diretamente para a resiliência econômica de pequenos produtores, especialmente no âmbito da agricultura familiar. Ao possibilitar a transformação de perdas em novas oportunidades de comercialização, a desidratação amplia as fontes de renda, reduz a dependência de mercados instáveis e fortalece a sustentabilidade econômica desses sistemas produtivos (EMATER-MG, 2025).

Dessa forma, mais do que uma alternativa tecnológica, o aproveitamento de frutas excedentes para a produção de snacks desidratados representa uma estratégia integrada de sustentabilidade, economia circular e fortalecimento da agricultura familiar.

Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade do aproveitamento de frutas excedentes ou rejeitadas para consumo in natura na produção de snacks desidratados, considerando aspectos tecnológicos, nutricionais e econômicos, com foco na redução do desperdício alimentar e na promoção de sistemas produtivos mais sustentáveis e resilientes.

Material e Métodos

A pesquisa foi desenvolvida na comunidade de Santa Rita, localizada no município de Ouro Preto (MG), caracterizada pela predominância da agricultura familiar. Inicialmente, realizou-se um levantamento do perfil produtivo local por meio de visitas técnicas e entrevistas com agricultores, com o objetivo de identificar as principais culturas e o volume de perdas pós-colheita.

Foram selecionadas frutas com elevado potencial de descarte, sendo: laranja-pera (*Citrus sinensis*), limão-taiti (*Citrus latifolia*), mexerica (*Citrus reticulata*) e goiaba vermelha (*Psidium guajava*), considerando sua disponibilidade e frequência de perdas observadas na região.

As amostras foram submetidas à seleção manual, com descarte de unidades em estado avançado de deterioração. Em seguida, realizou-se a higienização em solução de hipoclorito de sódio a 200 ppm por 15 minutos, seguida de enxágue em água potável.

O preparo das frutas foi realizado de acordo com suas características: a laranja-pêra e a mexerica foram descascadas e separadas em gomos; o limão-taiti foi fatiado em rodelas finas com casca; e a goiaba vermelha foi cortada em fatias uniformes. Esse procedimento visou padronizar a área superficial e favorecer a transferência de massa durante a secagem.

A goiaba vermelha (*Psidium guajava*) foi submetida a pré-tratamento por desidratação osmótica, sendo imersa em solução de sacarose a 65 °Brix por 24 horas, conforme descrito por Queiroz et al. (2007) e Silva-Júnior (2009).

Posteriormente, todas as amostras foram dispostas em bandejas e submetidas à secagem em estufa com circulação de ar forçado, sob temperatura controlada entre 60 e 65 °C. O processo foi conduzido até a obtenção de teor de umidade adequado, sendo o tempo de secagem registrado para cada fruta.

As análises físico-químicas foram realizadas nas amostras desidratadas para determinação da composição centesimal, incluindo teor de umidade, cinzas, proteínas (método de Kjeldahl) e carboidratos por diferença, conforme metodologias do

Instituto Adolfo Lutz (TACO, 2011; TBCA, 2019).

A eficiência produtiva foi avaliada por meio do cálculo do rendimento, determinado pela relação entre a massa final do produto desidratado e a massa inicial da matéria-prima. Por fim, foi realizada análise econômica considerando custos de produção, rendimento e preços de comercialização dos snacks desidratados, visando avaliar a viabilidade do processo no contexto da agricultura familiar.

Resultados e Discussão

O processo de desidratação promoveu redução significativa do teor de umidade das amostras, com valores finais entre aproximadamente 17% e 28%, contribuindo para maior estabilidade e conservação dos produtos.

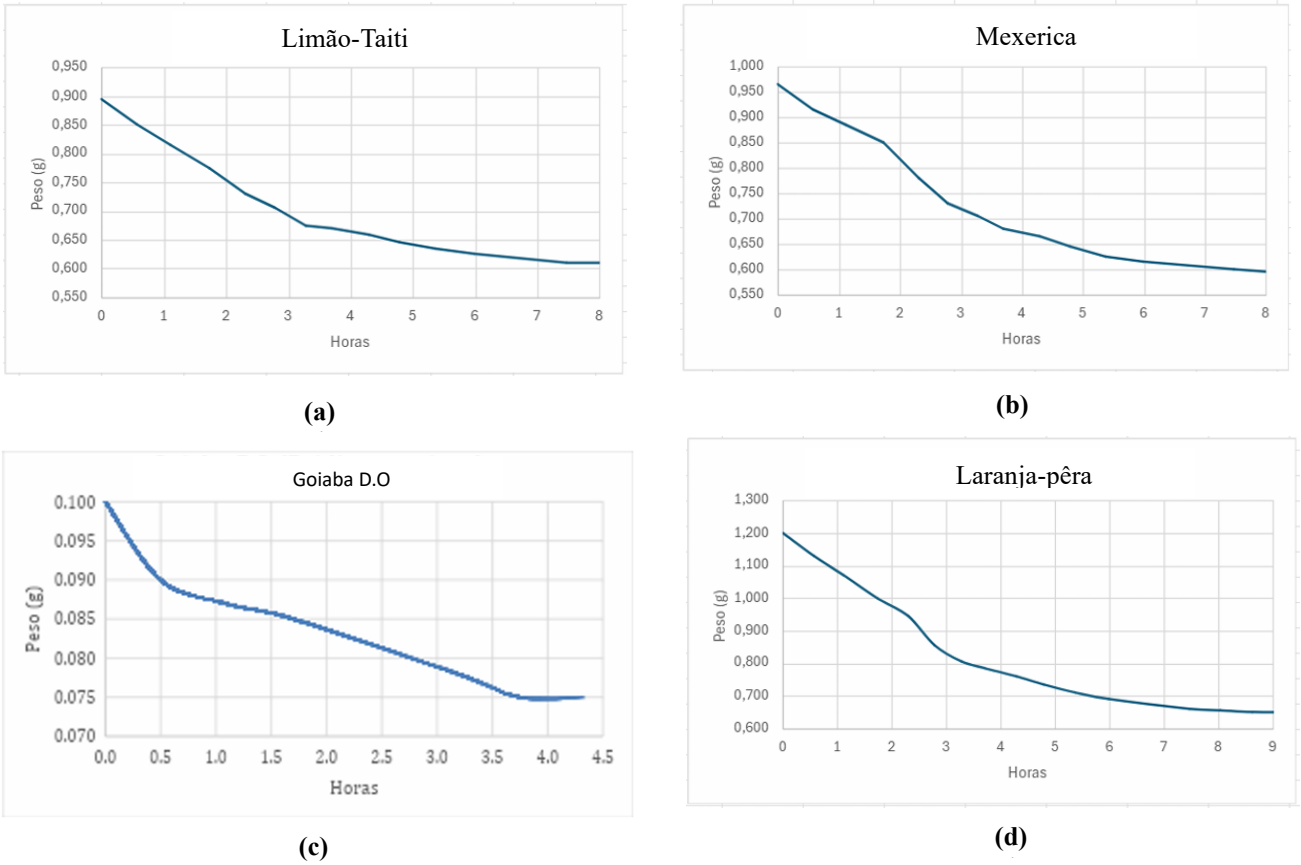


Figura 01: Curvas de secagem das amostras de frutas: Gráfico (a) limão-taiti (*Citrus latifolia*); Gráfico (b) mexerica (*Citrus reticulata Blanco*); (c) goiaba vermelha DO (*Psidium guajava*); (d) laranja pêra (*Citrus sinensis L. Osbeck*).

A goiaba apresentou menor tempo de secagem, cerca de 4 horas, enquanto as demais frutas, laranja (*Citrus sinensis*), mexerica (*Citrus reticulata*) e limão (*Citrus latifolia*), apresentaram tempos entre 8 e 9 horas. Esse comportamento reforça o efeito do pré-tratamento osmótico na redução do tempo de processo, tornando a secagem mais eficiente. Nas demais frutas, a ausência desse tratamento resultou em maior resistência à transferência de massa, prolongando o tempo necessário para atingir o equilíbrio de umidade. Estudos anteriores também relatam essa influência do pré-tratamento na cinética de secagem (QUEIROZ et al., 2007; SILVA-JÚNIOR, 2009).

Frutas	Umidade (%)	Cinzas (%)	Carboidratos (%)	Proteínas (%)
Laranja-pêra	17,72	3,33	79,17	0,0800
Limão-Taiti	28,50	2,95	68,54	0,0056
Mexerica	24,39	2,44	73,17	0,0028
Goiaba	21,75	0,25	77,97	0,0255

Tabela 01: Composição centesimal (%) das frutas desidratadas.

Os teores de carboidratos variaram entre 68,54% e 79,17%, resultado esperado devido à concentração dos sólidos após a remoção de água. Os teores de cinzas indicaram a presença de minerais, enquanto os baixos teores de proteínas são característicos de frutas, conforme descrito na literatura (SANTOS; FERREIRA; ALMEIDA, 2018).

Além dos aspectos físico-químicos, a desidratação promoveu redução significativa do peso e volume das amostras, o que representa uma vantagem importante para o armazenamento e transporte dos produtos, reduzindo custos logísticos.

Do ponto de vista econômico, embora o processo resulte em baixo rendimento em massa devido à perda de água, observa-se significativa agregação de valor ao produto final. Os snacks desidratados apresentam potencial de comercialização a preços mais elevados em comparação ao produto in natura, o que favorece a geração de renda, especialmente no contexto da agricultura familiar (EMATER-MG, 2025).

Dessa forma, os resultados obtidos demonstram que a desidratação, associada a técnicas como o pré-tratamento osmótico, é uma estratégia eficiente tanto do ponto de vista tecnológico quanto econômico, contribuindo para a redução do desperdício e para o aproveitamento sustentável de alimentos.

Frutas	Preço in natura (R$/kg)	Rendimento (%)	Custo para produzir (R$/100g)	Preço de mercado do snack desidratado (R$/100g)	Lucro bruto potencial (R$/100g)
Laranja-pêra	8,0	17,3	6,2	10,90 a 25,40	6,2 a 20,7
Limão-taiti	4,8	21,0	2,3	10,90 a 25,40	8,6 a 21,8
Mexerica	6,0	14,0	4,3	10,90 a 25,40	6,7 a 19,4
Goiaba	10,0	21,7	4,5	10,90 a 25,40	6,4 a 21,0

Tabela 02: Cálculos de rendimento associado aos custos de produção.

Observa-se que o limão-taiti (*Citrus latifolia*) apresentou o menor custo de produção (R$ 2,30/100 g) e uma das maiores margens de lucro (até R$ 21,80/100 g), destacando-se como a alternativa mais economicamente vantajosa. A goiaba (*Psidium guajava*), apesar de apresentar maior custo, também demonstrou alta rentabilidade devido ao seu elevado rendimento (21,7%).

Por outro lado, a mexerica (*Citrus reticulata*) apresentou o menor rendimento (14,0%), o que impacta negativamente sua eficiência produtiva, embora ainda mantenha potencial de lucro. A laranja (*Citrus sinensis*) apresentou desempenho intermediário, com equilíbrio entre custo, rendimento e retorno econômico.

De modo geral, os resultados indicam que, mesmo com baixo rendimento, o processo de desidratação agrega valor significativo ao produto final, tornando viável o aproveitamento de frutas descartadas. Assim, a utilização de rejeitos agrícolas para produção de snacks desidratados configura-se como uma alternativa sustentável e economicamente atrativa, especialmente para a agricultura familiar (EMATER-MG, 2025).

Considerações Finais

Os resultados obtidos demonstram que a desidratação de frutas excedentes é uma alternativa eficiente para a redução do desperdício alimentar, promovendo maior aproveitamento de recursos e agregação de valor aos produtos. Do ponto de vista tecnológico, o processo mostrou-se eficaz na redução do teor de umidade e na obtenção de produtos estáveis, com destaque para a aplicação da desidratação osmótica, que contribuiu para a melhoria da eficiência do processo e da qualidade final.

Sob o aspecto econômico, a produção de snacks desidratados apresentou viabilidade, evidenciando que frutas de menor valor comercial ou destinadas ao descarte podem gerar produtos com maior valor agregado e potencial de comercialização.
Dessa forma, a utilização de rejeitos agrícolas associada à desidratação configura-se como uma estratégia sustentável e promissora, especialmente no contexto da agricultura familiar, contribuindo para a geração de renda e para a redução de perdas ao longo da cadeia produtiva.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Ouro Preto, CNPq, aos orientadores, Grupo de Pesquisa APICRIM e à comunidade de Santa Rita pelo apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

EMATER-MG. *Minas Gerais possui 32,6 mil agroindústrias familiares*. 2025. Disponível em: https://www.emater.mg.gov.br. Acesso em: 16 jan. 2025.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *Minimizar a perda de alimentos é mais fácil do que você pensa*. 2022. Disponível em: https://www.fao.org. Acesso em: 30 jan. 2025.

QUEIROZ, V. A. V. et al. Desidratação por imersão-impregnação e secagem por convecção de goiaba. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 42, n. 10, p. 1479-1486, 2007.

SANTOS, R. C.; FERREIRA, L. S.; ALMEIDA, P. R. Desidratação de banana: efeitos na composição nutricional e qualidade do produto final. *Brazilian Journal of Food Research*, v. 9, n. 3, p. 55-63, 2018.

SCHERER, G. C. R. D. S. et al. Secagem e avaliação de laranja (*Citrus sinensis*) em estufa e micro-ondas. *Revista Brasileira de Agrotecnologia*, v. 11, n. 2, p. 443–448, 2021.

SILVA, A. et al. Avaliação da secagem das fatias e frações do limão Tahiti (*Citrus latifolia*). Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2014.

SILVA-JÚNIOR, A. A. *Otimização da desidratação osmótica da goiaba (Psidium guajava L.)*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

TACO – Tabela Brasileira de Composição de Alimentos. 2. ed. Campinas: NEPA-UNICAMP, 2011. Disponível em: http://www.nepa.unicamp.br/taco/. Acesso em: 25 mar. 2025.

TBCA – Tabela Brasileira de Composição de Alimentos. Universidade de São Paulo (USP), Food Research Center (FoRC), versão 7.0, São Paulo, 2019.

TONTUL, I.; TOPUZ, A. Effects of different drying methods on the physicochemical properties of pomegranate leather. *LWT - Food Science and Technology*, v. 80, p. 294-303, 2017.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. *Food Waste Index Report 2024: Tracking Progress to Halve Global Food Waste*. 2024. Disponível em: https://wedocs.unep.org/20.500.11822/45230.

DESPERDÍCIO ALIMENTAR NA FORMAÇÃO GASTRONÔMICA: UMA REVISÃO DA LITERATURA SOB A PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR

1Amanda do Carmo Navarro de Araujo
1 SENAC-RN, e-mail: amandan@rn.senac.br

Palavras-chave: desperdício alimentar; economia circular; gastronomia

Introdução

O desperdício de alimentos representa um dos desafios mais urgentes da agenda ambiental contemporânea. De acordo com a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2013), cerca de um terço dos alimentos produzidos no mundo são perdidos ou desperdiçados anualmente, consumindo recursos naturais como água, solo e energia sem gerar benefício nutricional. O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente estimou que aproximadamente 931 milhões de toneladas de alimentos foram desperdiçadas apenas na etapa de consumo em 2019 (PNUMA, 2021), reforçando a gravidade do problema.

Dentre os setores que contribuem para o desperdício, o de alimentação fora do lar merece atenção especial. Restaurantes, hotéis e serviços de catering são amplamente estudados na literatura. Contudo, um ambiente igualmente relevante e ainda pouco investigado são as cozinhas-escola e laboratórios de gastronomia, onde futuros profissionais são formados. Esses espaços envolvem manipulação intensiva de insumos, sendo que o foco pedagógico tende a priorizar o domínio técnico em detrimento da gestão sustentável dos recursos (McARTHUR-FLOYD et al., 2024). A Economia Circular, fundamentada na eliminação de resíduos, na manutenção de produtos e materiais em uso e na regeneração de sistemas naturais (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013), surge como abordagem sustentável capaz de promover o não desperdício de alimentos, onde o excedente é redistribuído e os coprodutos não comestíveis transformam-se em insumos para elaboração de novos produtos (CABRAL et al., 2024).

Observa-se, a partir da prática docente em cursos de gastronomia, que a economia circular deve fazer parte das competências dos alunos e futuros profissionais da área de alimentos, por ser hoje uma forma de reduzir o impacto ambiental e os custos com insumos, utilizando integralmente os alimentos, inclusive aqueles que seriam descartados. Na prática pedagógica, percebe-se que a grande maioria das instituições de ensino não pratica um sistema de reuso de rejeitos e descartes que promova um ciclo sustentável e eficiente. Cascas e aparas de hortifruti podem ser utilizadas no preparo de caldos e sopas; vegetais excedentes podem virar compotas ou conservas para aumentar seu tempo de consumo; proteínas podem passar por processos como cura e maturação para evitar a decomposição. Práticas como essas, sendo incorporadas à formação com base teórica clara, melhorariam de forma expressiva o aproveitamento dos produtos e reduziriam significativamente o volume de descartes. Introduzir a importância de um ciclo fechado desde a formação desses futuros profissionais pode transformar as práticas do setor e colaborar para a redução dos impactos ambientais.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre o desperdício alimentar em ambientes de formação gastronômica, analisando suas causas, estratégias de mitigação e as possibilidades de integração dos princípios da Economia Circular ao ensino culinário. Ressalta-se ainda que esta temática está alinhada diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente o ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (- Ação contra a Mudança Global do Clima), conforme proposto pela Organização das Nações Unidas na Agenda 2030.

Material e Métodos

Trata-se de uma revisão narrativa com abordagem sistematizada, conduzida entre janeiro e março de 2026. A busca bibliográfica foi realizada nas bases SciELO e Google Scholar, utilizando descritores previamente definidos nos idiomas português e inglês: “desperdício alimentar”, “food waste”, “culinary education”, “gastronomy training”, “circular economy”, “economia circular”, “cozinha-escola” e “sustainable gastronomy”.

Foram adotados critérios de elegibilidade com base na relevância temática, atualidade (2016–2026) e aderência ao contexto de desperdício alimentar em ambientes de formação gastronômica ou à aplicação da Economia Circular no setor de alimentação. Foram excluídos estudos focados exclusivamente em desperdício doméstico, produção agrícola ou varejo sem relação com o ambiente formativo.

O processo de seleção incluiu triagem por título, leitura de resumos e análise integral dos textos, resultando em 15 trabalhos que compuseram o corpus de análise. Embora não se configure como uma revisão sistemática formal, buscou-se garantir rigor metodológico por meio da definição prévia de critérios de inclusão e exclusão, bem como pela análise crítica comparativa dos estudos selecionados. Cabe destacar, como limitação, que a busca se restringiu a duas bases de dados, o que pode não contemplar a totalidade da produção científica disponível sobre o tema.

Resultados e Discussão

A revisão revelou que o desperdício de alimentos em laboratórios de gastronomia e cozinhas-escola é um problema reconhecido por docentes e equipes das escolas, porém ainda escassamente documentado na literatura científica, especialmente no Brasil. McArthur-Floyd et al. (2024), em estudo realizado na Universidade Técnica de Takoradi (Gana), constataram taxas elevadas de desperdício autorrelatado pelos estudantes durante aulas práticas, identificando como fatores contribuintes a compra excessiva de insumos, a falta de planejamento, a ausência de treinamento padronizado e a baixa consciência ambiental por falta de debates mais aprofundados em torno do tema. No Brasil, estudo conduzido em cozinha-escola de cursos de Nutrição e Gastronomia de uma universidade pública da Bahia registrou desperdício total de 121,3 kg ao longo de três anos, tendo como principais causas produtos fora do prazo de validade, deterioração por armazenamento inadequado e planejamento deficiente. Esses achados corroboram os dados de Abreu, Spinelli e Pinto (2019), que identificam as etapas de pré-preparo e preparo como as mais críticas para a geração de resíduos em unidades de alimentação. Carvalho, Alves e Silva (2024) identificaram quatro metodologias internacionais de quantificação de perdas e desperdícios de alimentos, todas alinhadas ao conceito de Economia Circular, o que reforça a existência de ferramentas consolidadas para mensurar o problema.

Pesquisa com estudantes de gastronomia investigou a relação entre criatividade culinária e comportamento frente ao desperdício (FILIMONAU et al., 2023), demonstrando que candidatos a chefs com maiores níveis de criatividade apresentaram maior intenção de reaproveitar resíduos alimentares. Isso sugere que o desenvolvimento de habilidades criativas na formação pode atuar como catalisador para práticas mais sustentáveis. As barreiras mais frequentemente reportadas para a redução do desperdício em ambientes de ensino culinário incluem infraestrutura inadequada para separação de resíduos, pressão de tempo durante as aulas, ausência de protocolos padronizados de medição e resistência institucional a mudanças curriculares (GOH et al., 2022). Mesmo em instituições de ensino que dispõem de um sistema de coleta seletiva, ainda há grande dificuldade em separar os descartes nos recipientes corretos, em grande parte por falta de informação e de compreensão sobre a real relevância dessa prática para o meio ambiente. É frequente encontrar lixo orgânico misturado com produtos recicláveis e vice-versa. Destaca-se que o SENAC-RN é a única escola da rede na região que realiza a compostagem desses resíduos e, mesmo sendo essa prática amplamente divulgada, ainda há enorme dificuldade em efetivamente fazer uso de todos os descartes.

Quanto à aplicação da Economia Circular na gastronomia, Grèzes-Bürcher e Grèzes (2023) propuseram o design de um sistema culinário circular integrado a restaurantes e hotéis na Suíça, identificando como fatores necessários a distribuição centralizada, o transporte eficiente, a melhor gestão de resíduos alimentares e a sensibilização e educação dos profissionais envolvidos. Jesus e Pires (2018) destacam a importância da hierarquia de recuperação de alimentos, que prioriza primeiro a redução do desperdício, seguida da redistribuição de excedentes e, por fim, a compostagem dos resíduos inevitáveis. A abordagem do upcycling alimentar, que transforma resíduos em novos produtos de maior valor agregado (SPRATT et al., 2021), encontra aplicação direta na gastronomia. O mercado de alimentação valoriza cada vez mais a redução do desperdício, diminuindo custos e aumentando a eficiência das produções. Nesse sentido, é fundamental introduzir nas aulas práticas a importância do uso integral dos alimentos e estimular a criatividade para a reutilização de excedentes. Em contextos de ensino gastronômico, tem-se incentivado os alunos a serem criativos e produzirem preparações com os descartes: cascas de hortifruti são utilizadas para produção de farinhas que servem como aditivo nutricional aos preparos, aparas de legumes são aproveitadas para fortificar caldos agregando sabor e nutrientes, e excedentes são transformados em snacks desidratados para posterior comercialização (FERREIRA,2018).

A literatura aponta consenso crescente de que a formação profissional em gastronomia constitui espaço estratégico para a disseminação de práticas sustentáveis. Gössling e Hall (2021) argumentam que o chef sustentável deve dominar não apenas técnicas culinárias, mas também compreender os impactos ambientais de suas escolhas na cozinha. Montesdeoca-Calderón et al. (2024) enfatizam a importância da formação profissional voltada à gestão de resíduos como interesse público. No contexto brasileiro, Rocha (2016) observa que a formação em gastronomia possui predominantemente natureza técnica e tecnológica, com foco na profissionalização para o mercado de trabalho, relegando a compreensão científica a segundo plano.

O Quadro 01 sintetiza as principais causas do desperdício alimentar identificadas na literatura e as respectivas estratégias de mitigação baseadas nos princípios da Economia Circular.

Quadro 01: Síntese das causas do desperdício alimentar em cozinhas-escola e estratégias de mitigação baseadas na Economia Circular.

Categoria	Principais causas do desperdício	Estratégias baseadas na Economia Circular
Planejamento	Compra excessiva de insumos; falta de previsão de demanda; cardápios sem foco em rendimento	Planejamento de cardápios integrados; fichas técnicas com indicadores de rendimento
Operacional	Técnicas inadequadas de corte e descascamento; ausência de padronização nos processos	Aproveitamento integral dos alimentos; upcycling alimentar (farinhas, caldos, conservas)
Educacional	Baixa consciência ambiental; ausência do tema nos currículos; falta de debate com discentes	Inserção curricular da Economia Circular; formação de competências sustentáveis
Infraestrutura	Falta de separação adequada de resíduos; ausência de protocolos de mensuração	Compostagem institucional; coleta seletiva; protocolos de pesagem de resíduos

Fonte: Elaboração própria com base na revisão da literatura (2026).

Considerações Finais

A revisão da literatura evidenciou que o desperdício de matéria-prima em ambientes de formação gastronômica é um problema real e significativo, porém ainda carente de investigação sistemática, sobretudo no contexto brasileiro. As causas identificadas são predominantemente de natureza pedagógica e gerencial, como a falta de planejamento, a ausência de protocolos de medição e a priorização de habilidades técnicas em detrimento da consciência ambiental. Na experiência docente, observa-se que o tema do desperdício ainda não é amplamente discutido com os discentes, o que resulta em falta de instrução sobre o uso correto dos insumos e, principalmente, sobre os impactos gerados pelo mau uso das matérias-primas, limitando as atitudes dos alunos durante as práticas. Como destacam Jesus e Pires (2018), fechar o ciclo dos alimentos exige que a consciência sobre o desperdício comece na formação profissional. Trazer a economia circular para dentro das salas de aula melhoraria o entendimento e a prática tanto nas escolas quanto no futuro mercado de alimentos.

A Economia Circular apresenta-se como abordagem adequada para a transformação dos currículos de gastronomia, oferecendo princípios e práticas que podem ser integrados às aulas, tais como o aproveitamento integral de alimentos, a compostagem e o planejamento de cardápios com foco na redução de resíduos. De fato, o que se vê na prática é a ênfase nas técnicas de preparo e quase nenhuma discussão científica sobre sustentabilidade; o gargalo para a mudança de hábitos está exatamente nesse ponto. Essa lacuna pode ser preenchida pela incorporação de práticas de pesquisa e extensão voltadas à sustentabilidade nos currículos de gastronomia. Como desdobramento deste estudo, pretende-se realizar uma pesquisa de campo para mensurar o desperdício real durante as aulas práticas e, a partir dos dados coletados, elaborar propostas concretas de redução aplicáveis ao ambiente de ensino em gastronomia. Pretende-se ainda propor a criação de um componente curricular voltado à economia circular na gastronomia, para que os futuros profissionais desenvolvam práticas sustentáveis com embasamento científico e consciência sobre os impactos ambientais gerados pelo desperdício e o descarte inadequado de alimentos.

Agradecimentos

A autora agradece ao SENAC-RN pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ABREU, E. S.; SPINELLI, M. G. N.; PINTO, A. M. S. Gestão de unidades de alimentação e nutrição: um modo de fazer. 7. ed. São Paulo: Metha, 2019.

CABRAL, C.; COSTA, M. S.; VEIGA, L. B. E.; SOUZA, S. L. Q. Economia circular na produção de alimentos: transformando resíduos em recursos para a sustentabilidade global. Revista Técnica da Agroindústria, v. 1, n. 2, art. 097, 2024.

CARVALHO, D. S. M.; ALVES, A. F.; SILVA, C. L. Perdas e desperdícios de alimentos no contexto da economia circular: principais metodologias de quantificação. Gestão & Regionalidade, v. 40, e20248497, 2024.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Towards the circular economy: economic and business rationale for an accelerated transition. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2013.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food wastage footprint: impacts on natural resources. Rome: FAO, 2013.

FERREIRA, Sara Josefina Leal. Economia circular: reaproveitamento de frutos e hortícolas através do processo de desidratação numa cadeia de retalho alimentar. 2018.

FILIMONAU, V. et al. Chef creativity and food waste: the role of creative thinking skills of chefs in food waste reduction. International Journal of Hospitality Management, v. 109, p. 103396, 2023.

GOH, E. et al. Food waste management in higher education institutions: barriers and strategies. Sustainability, v. 14, n. 8, p. 4512, 2022.

GÖSSLING, S.; HALL, C. M. The sustainable chef: the environment in culinary arts, restaurants, and hospitality. London: Routledge, 2021.

GRÈZES-BÜRCHER, S.; GRÈZES, V. Designing a sustainable, circular culinary system. Circular Economy and Sustainability, v. 3, p. 1475–1494, 2023.

JESUS, C.; PIRES, I. Fechar o ciclo: a contribuição da economia circular para o combate ao desperdício alimentar. Revista Ecologias Humanas, v. 4, n. 4, p. 7–20, 2018.

McARTHUR-FLOYD, M. et al. Tackling food waste in culinary education: a roadmap for sustainable change. International Journal of Innovative Science and Research Technology, v. 9, n. 4, p. 1370–1381, 2024.

MONTESDEOCA-CALDERÓN, M. G. et al. Tackling food waste management: professional training in the public interest. International Journal of Gastronomy and Food Science, v. 35, p. 100863, 2024.

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Índice de desperdício de alimentos 2021. Nairóbi: PNUMA, 2021.

ROCHA, C. A formação em gastronomia no Brasil: reflexões sobre natureza técnica e tecnológica. Revista Hospitalidade, v. 13, n. 2, p. 180–196, 2016.

SPRATT, O. et al. Upcycled food: a definition and framework. Journal of Food Science, v. 86, n. 11, p. 4951–4958, 2021.

OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE QUITOSANA PROVENIENTE DE TENEBRIO MOLITOR

1 Aline Taís Streit, 2 Bruna Strieder Machado, 3 Jeferson Steffanello Piccin

1 Programa de Pós-graduação em ciência e tecnologia de Alimentos, Universidade de Passo Fundo, e-mail: streitaline@gmail.com; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Passo Fundo, e-mail: 173882@upf.br; 3 Instituto de Tecnologia Universidade de Passo Fundo, e-mail: jefersonpiccin@upf.br

Palavras-chave: quitina, desacetilação alcalina, inseto

Introdução

A conservação de alimentos, principalmente de frutas, representa um desafio significativo para as indústrias alimentícias, devido à sua perecibilidade. A vida útil desses alimentos é reduzida devido à perda de qualidade sensorial, nutricional e microbiológica durante o armazenamento e a comercialização (Ma et al., 2024). Entre as alternativas, os biofilmes e revestimentos comestíveis à base de biopolímeros têm se destacado por sua capacidade de formar barreiras protetoras, reduzir a perda de água, controlar a respiração e apresentar propriedades antimicrobianas. A quitosana, obtida da quitina, é uma ótima alternativa de biopolímero que apresenta atividade antimicrobiana, podendo ainda ser utilizada com outros compostos como a goma carragena.

A quitina é um biopolímero presente no exoesqueleto de crustáceos e insetos e na parede celular de fungos (Huang et al., 2025). Trata-se de um polissacarídeo composto por unidades de N-acetilglicosamina, que confere a este, certas propriedades importantes (Pedrazzani et al., 2025; Huang et al., 2025). A extração da quitina envolve etapas de desmineralização, desproteinização, descoloração e/ou desodorização, por meio do uso de químicos. Além dessa técnica estuda-se também a desacetilação através de métodos enzimáticos e/ou métodos combinados (Huang et al., 2025).

A quitosana é obtida por desacetilação da quitina e se caracteriza pela presença de grupos amina livres, que lhe conferem solubilidade em meios ácidos e propriedades funcionais únicas, como atividade antimicrobiana, capacidade de formação de filmes e biocompatibilidade (Pedrazzani et al., 2025). A desacetilação é conduzida com tratamento alcalino com controle de temperatura e concentração. Processos mais modernos têm sido estudados para aumentar a eficiência, com o uso de solventes verdes ou o uso de técnicas modernas, como micro-ondas e ultrassom (Huang et al., 2025; Das et al., 2025).

A principal fonte de quitina são os crustáceos, provenientes dos resíduos das indústrias produtoras (Das et al., 2025). No entanto, buscam-se fontes alternativas, como é o caso dos exoesqueletos de insetos, que representam uma oportunidade de agregar valores a resíduos e subprodutos, além de ser uma estratégia com princípio de economia circular e de bioeconomia (Huang et al., 2025). O Tenébrio molitor (TC), um inseto comumente utilizado na produção de rações animais e alimentos alternativos, surge como fonte promissora de quitina, especialmente quando aproveitado a partir de resíduos gerados pela indústria (Son et al., 2020). Tal abordagem não apenas contribui para a valorização de subprodutos, mas também se insere nos princípios da economia circular e da sustentabilidade, além de oferecer uma alternativa ao uso de fontes marinhas.

As aplicações da quitina e da quitosana são amplas, devido às suas propriedades, na biomedicina, nos tratamentos de águas, produção de biofilmes e agentes de defesa contra patógenos (Pedrazzani et al., 2025). No setor de alimentos, a quitosana pode ser utilizada como revestimento biodegradável para a conservação de frutas, como agente antimicrobiano natural e aditivo funcional com potencial probiótico (Huang et al., 2025). A quitosana, quando misturada com outras substâncias, como a goma carragena, possibilita a criação de biofilmes que possuem as mais diversas aplicações. O uso da quitosana na forma de biofilmes reforça a relação com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 12 – Consumo e Produção Responsável, o ODS 8 – Trabalho Decente e Crescimento Econômico e o ODS 3 – Saúde e Bem-Estar. Conectam-se a pesquisa pela promoção das práticas sustentáveis, por meio da utilização de quitina extraída de inseto dentro do conceito de economia circular e pela valorização de resíduos de origem biológica. Além disso, o desenvolvimento de biofilme com propriedades antimicrobianas contribui para a melhoria da qualidade e da segurança de alimentos, promovendo benefícios à saúde pública e impulsionando alternativas sustentáveis e economicamente viáveis para a indústria alimentícia. Dessa maneira, este trabalho tem por objetivo desenvolver um processo de produção de quitosana a partir de resíduos da produção de TC.

Materiais e métodos

Preparação das amostras

As amostras de inseto foram doadas pela empresa Insect Protein. Os insetos foram lavados em água corrente, secos em estufa a 105 °C por 24 h.

Extração da quitina

A desmineralização, desproteinização e a desacetilação foram realizadas de acordo com o método proposto por Marchezi; Guadagnin, (2021). A desmineralização do material ocorreu pela adição de solução aquosa de HCl 2,5% (v/v), mantida em agitação por aproximadamente 5 h e lavada com água corrente. Essa etapa tem por objetivo a remoção de sais orgânicos

presentes nos insetos. O material seguiu então para a etapa de desproteinização, com NaOH, 5% (m/v), mantido sob agitação por 5 h e posteriormente lavado em água corrente. Por fim, a desodorização foi realizada com solução de NaClO 0,36% (v/v), mantendo o material em agitação por 2 h, dando origem à quitina, que foi lavada e secada à temperatura de 50 °C por 4 h. O rendimento da quitina foi calculado de acordo com a equação 1.

$$\text{Quitina (\%)} = \frac{m_{Quitina}}{m_{material}} x100 \quad (1)$$

Sendo:
$M_{Quitina}$ é a massa de quitina obtida após o processo de desmineralização; desproteinização e $m_{material}$ é massa da amostra inicial;

Estudo de desacetilação da quitina de resíduos de TC

O processo de desacetilação alcalina obtido do tenebrio, para tanto, foi realizado um Planejamento Fatorial 2k, com k = 3, totalizando 8 experimentos. As variáveis de estudo foram tempo de processo (30 e 90 min), proporção quitosana:NaOH (1:15 e 1:30) e concentração de NaOH (4 e 8 mol/L). As variáveis de resposta são o rendimento e o grau de desacetilação. Os experimentos foram conduzidos em um sistema composto por balão de fundo chato contendo o material a ser desacetilado, acoplado a um condensador e aquecido em chapa térmica. Após o processo, o material sólido foi coletado, lavado com água destilada até pH neutro e seco em estufa. O rendimento da quitosana foi calculado a partir da equação 2.
.

$$\text{Quitosana (\%)} = \frac{m_{Quitosana}}{Quitina} x100 \quad (1)$$

Sendo:
quitina é a massa de quitina obtida anteriormente; $m_{Quitosana}$ é a massa de quitosana obtida após a desacetilação.

Determinação do Grau de desacetilação por titulação

O grau de desacetilação (GD) da quitosana foi obtido por titulação potenciométrica, de acordo com Jiang; Chen; Zhong, (2003) e Tan et al., (1998). 0,2 g de quitosana (base seca) foram dissolvidos em 25 mL de solução de ácido clorídrico 0,1 N, avolumar a solução até 100 mL com água destilada. Titulou-se a solução de quitosana com NaOH 0,1 N, adicionada, sob agitação contínua e baixa, até o valor de pH da solução ser 2,0, considerando então o início da titulação. O titulante foi adicionado em intervalos conhecidos de 0,5 mL e com tempo de 25 segundos. A titulação termina quando o valor de pH 6,0. O valor do f(x) (função de neutralização) do volume correspondente ao NaOH adicionado foi calculado utilizando a equação 3, e o GD foi calculado de acordo com as equações 4 e 5.

$$f(x) = \left(\frac{V_0 + V}{N_B}\right) x\left([H^+] - [OH^-]\right) \quad (3)$$

$$DD(\%) = Ø / \left[(W - 161Ø)/204 + Ø\right] x100 \quad (4)$$

$$Ø = \left(N_A V_A - N_B V_e\right)/1000 \quad (5)$$

Sendo:
V_0 = volume da solução inicial de quitosana (L); V = volume do NaOH adicionado (L); N_B = concentração de NaOH (N); [H+] = concentração de íons de hidrogênio; $[OH^-]$ = concentração de ânions na solução; N_A = concentração de HCl (N); V_A = volume de HCl (mL); N_B = concentração de NaOH (N); Ve = volume do NaOH no ponto de extremidade (mL); W = massa da amostra (g); 161 corresponde à massa molar da unidade de D-glucosamina em $mg.mol^{-1}$.

Resultados

A produção de quitina através das etapas de desmineralização, desproteinização e desodorização obteve rendimento de 39,3%. Ao produzirmos e caracterizarmos a quitosana, observamos uma correlação inversamente proporcional entre o rendimento e o grau de desacetilação (GD), como apresentado na Tabela 1.

Amostra	Tempo (min)	Proporção (quitina:NaOH)	Concentração (mol/L)	Rendimento (%)	GD (%)
1	30	01:15	4	40,21	15,22±3,22
2	90	01:15	4	40,49	18,44±2,6
3	30	01:30	4	38,65	23,70±3,32
4	90	01:30	4	32,51	22,19±4,58
5	30	01:15	8	29,26	22,78±0,75
6	90	01:15	8	33,35	30,91±3,77
7	30	01:30	8	30,35	24,11±0,59
8	90	01:30	8	30,49	30,58±2,27

Tabela 1: Resultados do rendimento e GD das amostras

Observa-se que as amostras 1 e 2 apresentaram os maiores rendimentos (40,21% e 40,49%), porém apresentaram os menores valores de GD (15,22% e 18,44%). Esse comportamento pode ser justificado pela baixa concentração do NaOH (4 mol/L), que preserva a massa do polímero ao não remover efetivamente os grupos acetila. Em comparação, os maiores valores de GD foram encontrados na maior concentração de NaOH (8mol/L), esse aumento de concentração facilitou a penetração do reagente na matriz cristalina da quitina, promovendo a hidrólise dos grupos acetamida.

Apesar da influência estatística dos fatores (tempo, concentração e proporção), os valores de GD obtidos permanece abaixo do recomendado na literatura, que indica valores superiores a 75% para a caracterização adequada (Garcia et al., 2020; Cadaval, 2012). O baixo índice de desacetilação pode ser atribuído a três fatores críticos, sendo eles cinética da reação, baixo tempo de reação, temperatura e origem da amostra.

Conclusão

Conclui-se, com base nos resultados, que o processo de extração e desacetilação da quitina de inseto é de extrema importância para o setor alimentício. No entanto, o GD revelou que as condições testadas (tempo, concentração e proporção) resultaram em uma quitina parcialmente desacetilada com valores de GD oscilando entre 15 e 31%, situando-se abaixo do esperado. Observou-se que a concentração de NaOH foi importante para elevação do GD das amostras, embora tenha causado uma redução no rendimento total, evidenciando o compromisso entre a pureza química e a recuperação de biomassa. O presente trabalho serve como uma base diagnóstica fundamental para futuras etapas de pesquisa que serão conduzidas com o objetivo de otimizar o processo reacional.

Referencias

DAS, Poonam *et al.* Characterization of extracellular chitin deacetylase from Aneurinibacillus aneurinilyticus isolated from marine crustacean shell. **Current Research in Microbial Sciences**, v. 8, 1 Jan. 2025.

HUANG, Yuanyuan *et al.* Extraction and characterization of chitin and chitosan from molts and Eupolyphaga sinensis Walker: Influence of chemical and ultrasound-assisted enzymatic processing. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 309, 1 maio 2025.

MA, Mengjie *et al.* **Edible Coating for Fresh-Cut Fruit and Vegetable Preservation: Biomaterials, Functional Ingredients, and Joint Non-Thermal Technology**. **Foods Multidisciplinary** Digital Publishing Institute (MDPI), 1 dez. 2024.

PEDRAZZANI, Clara *et al.* Evaluating physical pre-treatment methods for improving insect chitin hydrolysis using Streptomyces griseus chitinase. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 10, 1 jun. 2025.

SON, Yang Ju *et al.* Could defatted mealworm (TC molitor) and mealworm Oil be used as food ingredients? **Foods**, v. 9, n. 1, 2020.

GARCIA, Isadora Atrib et al. Avaliação de métodos titulométricos para determinação do grau de desacetilação em quitosana. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 1, p. 4066–4084, 2020

CADAVAL JUNIOR, Tito Roberto Sant'Anna. *Adsorção de cromo (VI) utilizando quitosana com diferentes graus de desacetilação*. 2012. Dissertação (Mestrado em Química Tecnológica e Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2012.

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA CASCA E DA CINZA DA CASCA DE ARROZ NA REMOÇÃO DE CORANTE CATIÔNICO EM UMA COLUNA DE ADSORÇÃO DE LEITO FIXO

1 Cássio Renan Krüger, 2 Gabriela Schwantes Pagliarin, 3 Matheus Felipe Pedrotti, 4 Nicéia Chies Da Fré

1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) – Campus Feliz, e-mail: cassiork@gmail.com; 2 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) – Campus Feliz, e-mail: gabriela.pagliarin@aluno.feliz.ifrs.edu.br; 3 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) – Campus Feliz, e-mail: matheus.pedrotti@feliz.ifrs.edu.br; 4 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) – Campus Feliz, e-mail: niceia.fre@feliz.ifrs.edu.br

Palavras-chave: adsorção; leito fixo; casca de arroz.

Introdução

Um dos grandes desafios ambientais do mundo moderno é o descarte de poluentes sem tratamento adequado em corpos hídricos, sendo esse obstáculo intimamente ligado ao crescimento industrial. Os elementos tóxicos presentes nos efluentes descartados pelas indústrias podem causar sérios danos à vida humana e aos demais organismos vivos, gerando diversos problemas econômicos e de saúde pública (Memlak, 2019).

A indústria têxtil é responsável por uma parcela considerável na geração de efluentes, principalmente aqueles contendo corantes que, além dos problemas relacionados a contaminações ambientais, podem ser de difícil tratamento pelos sistemas convencionais. O processo de adsorção tem sido frequentemente utilizado na remoção desse tipo de poluente. É uma técnica que apresenta algumas vantagens como, tratamento de grandes volumes, facilidade de operação, eficiência na remoção da cor e possibilidade de recuperação do adsorvente e do corante (Ribas, 2016). As colunas de adsorção são o método mais aplicado em escala industrial (Geankoplis; Hersel; Lepek, 2018) e são muito empregadas na simulação e *design* dos processos pois, ao contrário das técnicas em batelada, são capazes de tratar maiores volumes, fornecem dados mais precisos relacionados ao regime contínuo de operação e estão mais próximos aos sistemas de larga escala encontrados em plantas industriais (Nascimento et al., 2020).

Além dos materiais adsorventes tradicionais, como o carvão ativado, surgem aqueles chamados de biossorventes, que podem se originar de materiais vegetais, subprodutos industriais e agrícolas e subprodutos naturais de processamento como, por exemplo, cascas de madeira, cascas de ovos e cascas de arroz. Por serem encontrados em abundância são considerados de baixo custo e têm ótima perspectiva de aplicação (Derco; Vrana, 2018).

O arroz é um dos cereais mais relevantes globalmente, constituindo a base alimentar de mais de três bilhões de pessoas e ocupando a segunda posição em área cultivada e volume de produção, com 800 milhões de toneladas produzidas em 2023, equivalentes a cerca de 28% dos cereais destinados à alimentação humana (EMBRAPA, 2024). Seu cultivo ocorre em todos os continentes, com predominância na Ásia, enquanto nas Américas, Brasil e Estados Unidos se destacam como principais produtores, sendo o Brasil responsável por 28% da produção continental e 1,3% da produção mundial. No cenário nacional, o Rio Grande do Sul responde por aproximadamente 70% da produção brasileira (EMBRAPA, 2024). Como subproduto do beneficiamento, a casca de arroz representa cerca de 23% do peso do grão, possui baixa densidade, reduzido valor nutritivo e lenta degradação ambiental, podendo levar até cinco anos (Coronas et al., 2021). Com composição majoritariamente lignocelulósica e elevado teor de sílica nas cinzas, esse resíduo muitas vezes é utilizado no próprio beneficiamento do arroz, como combustível, o que acaba por gerar a cinza da casca de arroz, além de apresentar crescente potencial como adsorvente devido às suas propriedades físico-químicas, como estabilidade, morfologia granular e presença de grupos funcionais ativos, sendo promissor para aplicação no tratamento de águas residuais (Franco, 2016).

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo desenvolver uma coluna de adsorção de leito fixo em escala laboratorial utilizando como materiais adsorventes a casca de arroz (CA) e a cinza da casca de arroz (CCA), avaliando a capacidade de remoção do corante catiônico Azul Quimacryl LB-PO (AQ) em solução aquosa.

Material e Métodos

A CA e a CCA foram cedidas por um produtor rural do município de Feliz/RS. As cinzas são provenientes da queima da casca em grelhas de caldeiras, sem controle de temperatura ou tempo de queima. Ambos os materiais foram utilizados sem tratamento prévio, conforme apresentado na Figura 01-a e Figura 01-b. A caracterização granulométrica foi realizada por peneiramento: para a CA foram utilizadas peneiras de 4, 12, 14 e 20 mesh (4750, 1700, 1400 e 850 µm), e para a CCA, peneiras de 20, 35 e 50 mesh (850, 500 e 300 µm). O corante AQ foi cedido por uma indústria têxtil do município de Caxias do Sul/RS. Trata-se de um corante de caráter catiônico, coloração azul e pH de 3 a 4 (10 g/L em solução aquosa a 25°C).

A coluna de leito fixo consistiu em um tubo de vidro de 18 cm de altura e 2,3 cm de diâmetro interno. O fluxo foi conduzido em modo ascendente por uma bomba peristáltica da marca Kamoer (modelo KPHM100) com vazão constante de 15 mL/min. Foram preparadas soluções do corante nas concentrações de 10, 15 e 20 mg/L. Os dados de absorbância foram registrados em tempo real no espectrofotômetro de fluxo contínuo modelo 510, no comprimento de onda de 600 nm, permitindo

a elaboração das curvas de ruptura e a estimativa do tempo de ruptura (t_{rup}), da quantidade adsorvida (q_{exp}) e do percentual de remoção (%R). A Figura 01-c apresenta o sistema de adsorção desenvolvido no experimento.

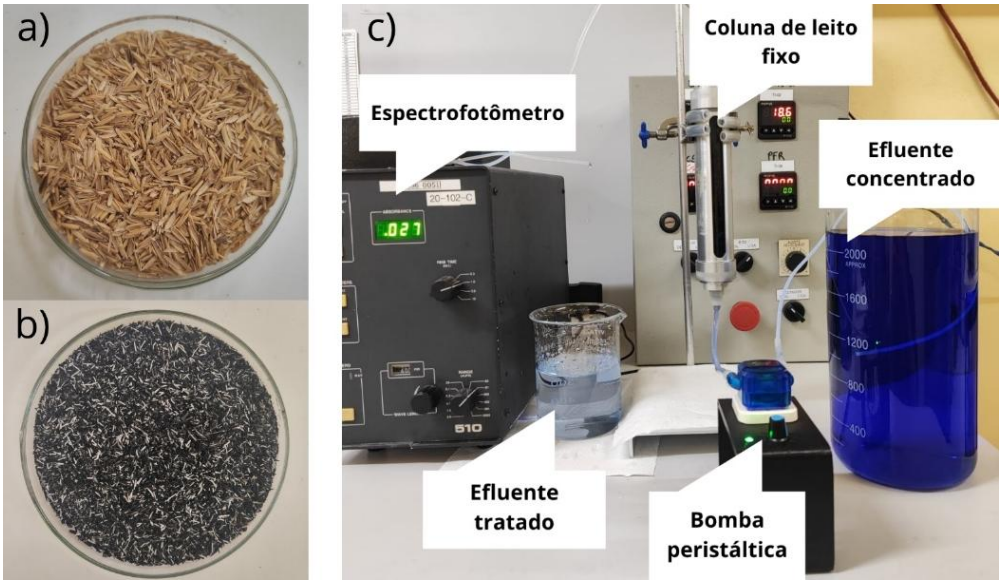


Figura 01: a) casca de arroz, b) cinza da casca de arroz e c) sistema de adsorção.
Fonte: Autores (2025)

Para a CA, a altura do leito foi de 18 cm, totalizando 10 gramas de adsorvente. O tempo total de operação da coluna foi de 600 minutos, com um volume alimentado de 9 L. Já para a CCA, a altura do leito utilizada foi de 7 cm, totalizando 4 gramas de adsorvente. O tempo de operação foi de 480 minutos, com um volume alimentado de 7,2 L. Todos os experimentos foram realizados em duplicata.

Para o cálculo de q_{exp} e %R foram utilizadas as equações (01) e (02):

$$q_{exp} = \frac{C_0 Q}{1000m}\int_0^{t_{total}}\left(1-\frac{C_t}{C_0}\right)dt \qquad (01)$$

$$\%R = \frac{100}{t_{total}}\int_0^{t_{total}}\left(1-\frac{C_t}{C_0}\right)dt \qquad (02)$$

Onde: C_o é a concentração inicial de corante (mg/L), C_t é a concentração no tempo t (mg/L), t_{total} é o tempo total de operação (min), Q é a vazão (mL/min) e m é a massa de adsorvente no leito (g).

Resultados e Discussão

Em relação a granulometria, os diâmetros de Sauter calculados das partículas de CA e CCA foram de 1590 µm e 710 µm, respectivamente. Assim, a razão entre o diâmetro da coluna e o diâmetro das partículas identificado foi de 14,5 e 32,4, validando a recomendação de Worch (2021) que sugere uma razão maior que 10, a fim de evitar efeitos de parede na obtenção das curvas de ruptura.

As curvas de ruptura obtidas para a CA, conforme apresentado na Figura 02-a, apresentaram comportamento similar entre si, com crescimento mais acentuado da razão C/Co em um período inicial, tornando-se mais gradativo posteriormente. Esse padrão sugere que os mecanismos cinéticos atuaram em conjunto durante o processo, hipótese corroborada por Ong e Lee (2016), que constataram a ocorrência de mais de uma etapa controladora de velocidade na adsorção do Azul de Metileno em colunas de leito fixo com CA. Observou-se ainda que o aumento da concentração do afluente resultou em menor tempo de ruptura, fenômeno também evidenciado por Han et al. (2007) e Franco (2016). Isso ocorre porque concentrações mais elevadas aumentam a força motriz para a transferência de massa, acelerando o preenchimento dos sítios de adsorção e reduzindo o comprimento da zona de adsorção. Da mesma forma, Hummadi, Luo e He (2022) demonstraram que o desempenho da adsorção de Azul de Metileno em CA é favorecido por menores concentrações iniciais, menores vazões e maiores alturas de leito, padrão igualmente observado no presente estudo. Franco (2016) também atestou que incrementos na vazão ou na concentração tendem a reduzir o tempo de ruptura e o tempo de saturação, sendo os maiores percentuais de remoção associados às menores vazões e concentrações. Tais comportamentos estão diretamente relacionados aos fenômenos de transferência de massa: concentrações mais altas geram maiores gradientes de transferência, enquanto vazões menores proporcionam maiores tempos de residência.

No que diz respeito à CCA (Figura 02-b), as curvas de ruptura obtidas apresentaram comportamento similar ao observado com a CA, com crescimento mais acentuado até uma razão C/Co aproximada de 0,50, tornando-se mais gradativo posteriormente. Esse padrão pode ser atribuído aos fatores cinéticos que controlam a transferência de massa, sendo que, conforme Hu et al. (2024), curvas com inclinação mais acentuada indicam melhor desempenho de adsorção. De forma análoga ao verificado anteriormente, o aumento da concentração do afluente resultou em redução do tempo de ruptura, comportamento consistente

com os resultados reportados por Ong e Lee (2016), Hummadi, Luo e He (2022) e Rahman et al. (2025), todos avaliando a adsorção do Azul de Metileno, indicando que esse efeito é explicado pela menor força motriz para a transferência de massa em concentrações mais baixas, o que demanda maior tempo para a saturação completa dos sítios ativos.

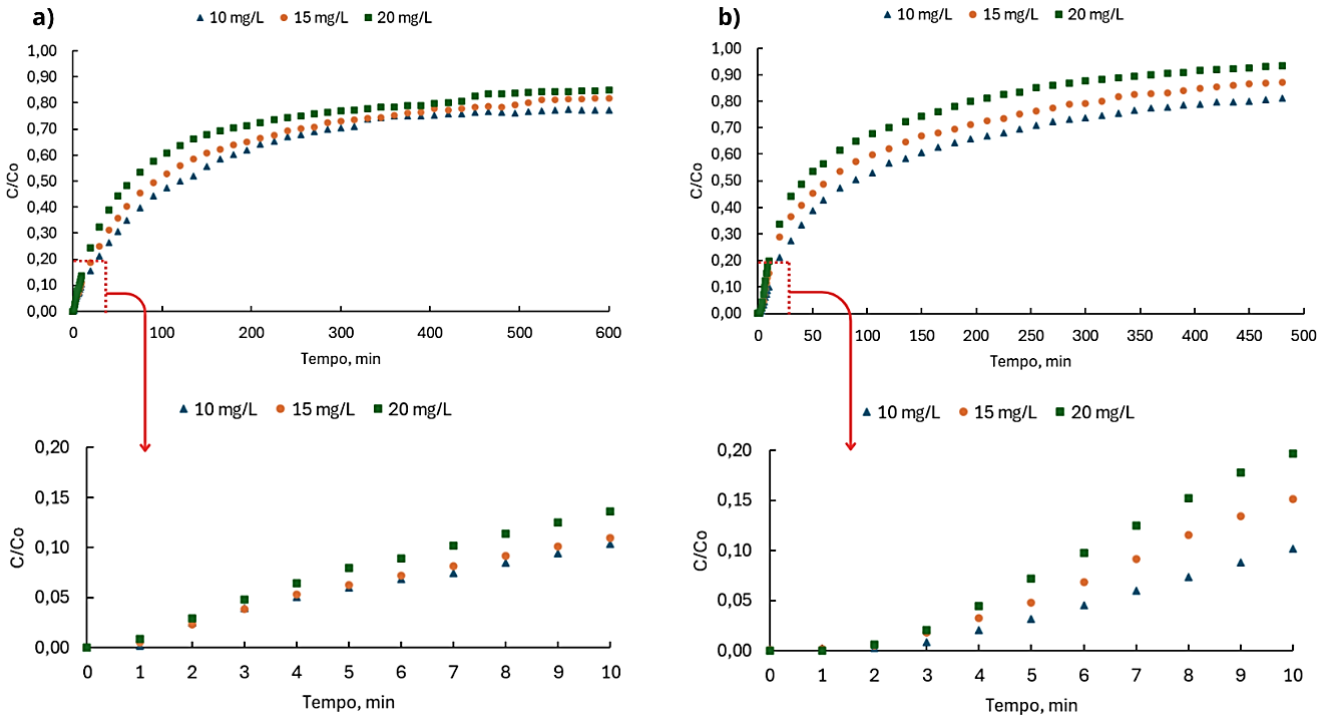


Figura 02: Curvas de ruptura obtidas para a) casca de arroz (CA) e b) cinza da casca de arroz (CCA). Fonte: Autores (2025)

Conforme apresentado na Tabela 01, em ambas os casos, observou-se que o incremento da concentração inicial resulta no aumento de q_{exp}. Por sua vez, o %R e o t_{rup} diminuem com o aumento da concentração inicial, ou seja, a eficiência relativa de remoção diminui devido à saturação mais rápida dos sítios ativos. Por sua vez, a CCA apresentou um resultado superior a CA quanto a q_{exp} e ao t_{rup}, e somente foi inferior em relação ao %R devido a menor massa de adsorvente utilizada. Esses dados evidenciam que após a queima, a CA tem capacidade adsortiva superior à sua forma in natura, indicando que pode ser aproveitada tanto na geração de energia quanto nos processos de adsorção.

Adsorvente	C_o (mg/L)	Mt (mg)	Mr (mg)	q_{exp} (mg/g)	R (%)	t_{rup} (min)
CA	10	92,5 ± 1,3	34,2 ± 1,4	3,42 ± 0,13	37,0 ± 1,9	4
CA	15	136,6 ± 0,2	46,2 ± 0,3	4,62 ± 0,03	33,8 ± 0,3	4
CA	20	181,1 ± 1,5	52,5 ± 1,8	5,25 ± 0,18	29,0 ± 0,7	3
CCA	10	72,3 ± 1,7	26,3 ± 0,1	6,57 ± 0,01	36,4 ± 0,8	6
CCA	15	109,1 ± 1,4	33,3 ± 1,9	8,32 ± 0,47	30,5 ± 1,3	5
CCA	20	145,7 ± 1,0	33,6 ± 0,3	8,39 ± 0,07	23,0 ± 0,4	4

Tabela 01: Dados experimentais de adsorção obtidos. C_o: concentração inicial; Mt: massa de corante alimentada; Mr: massa de corante removida; q_{exp}: quantidade de soluto adsorvida; R: percentual de remoção; t_{rup}: tempo de ruptura. Fonte: Autores (2025)

Considerações Finais

A cinza da casca de arroz (CCA) demonstrou desempenho superior à casca de arroz (CA), destacando-se a maior quantidade adsorvida, o que evidencia sua boa capacidade de adsorção do corante catiônico Azul Quimacryl LB-PO (AQ). O efeito da concentração inicial observado foi consistente com a literatura, sendo explicado pelo aumento do gradiente de transferência de massa, que acelera a saturação do leito, reduzindo o tempo de ruptura (t_{rup}) e a porcentagem de remoção (%R), e elevando a capacidade adsortiva (q_{exp}). Fatores como empacotamento do leito, dispersão do fluido e cinética de adsorção podem ter influenciado os resultados, demandando maior aprofundamento. Dessa forma, conclui-se que a CA e a CCA apresentam potencial para aplicação na remoção de corantes catiônicos, configurando alternativas sustentáveis e de baixo custo, especialmente em regiões com fácil acesso a esses materiais.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS).

Referências Bibliográficas

CORONAS, M. V. *et al*. Resíduos da cinza da casca de arroz: contexto e alternativas. **A Face Transdisciplinar das Ciências Agrárias**, p. 108–120, 10 ago. 2021. DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.91721100812.

DERCO, Jan; VRANA, Branislav (ed.). Biosorption. InTech, 2018. E-book. DOI: https://doi.org/10.5772/intechopen.68261.

EMBRAPA. Arroz. In: EMBRAPA. Agência de Informação Tecnológica. Brasília, DF: Embrapa, 2024. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz. Acesso em: 29 set 2025.

FRANCO, Dison Stracke Pfingsten. **Modificações na casca de arroz para a adsorção de azul de metileno em batelada e leito fixo**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Santa Maria, 2016.

GEANKOPLIS, Christie John.; HERSEL, A. Allen.; LEPEK, Daniel. H. **Transport processes and separation process principles**. 5. ed. Boston: Prentice Hall, 2018.

HAN, R. *et al*. Biosorption of methylene blue from aqueous solution by rice husk in a fixed-bed column. **Journal of Hazardous Materials**, v. 141, n. 3, p. 713–718, 22 mar. 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.031.

HU, Q. *et al*. A critical review of breakthrough models with analytical solutions in a fixed-bed column. **Journal of water process engineering**, v. 59, p. 105065–105065, 1 mar. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105065.

HUMMADI, K. K.; LUO, S.; HE, S. Adsorption of methylene blue dye from the aqueous solution via bio-adsorption in the inverse fluidized-bed adsorption column using the torrefied rice husk. **Chemosphere**, v. 287, p. 131907, jan. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131907.

MEMLAK, Deisy Maria. **Aplicação de coluna de leito fixo na adsorção e dessorção mono e multicomponente de metais tóxicos presentes em água utilizando adsorvente alternativo.** 2019. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Chapecó, 2019.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do *et al*. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. E-book. 2. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária. 2020. (Estudos da pós-graduação). Disponível em: http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/53271.

ONG, S.; LEE, W. Evaluation on the efficiency of ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA)-modified rice husk as a low-cost sorbent for various dyes removal under continuous flow condition. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 39, p. 18157–18167, 12 aug. 2016. DOI: https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1088474.

RAHMAN, M. M. *et al*. Adsorptive removal of toxic heavy metal and dyes from wastewater by rice husk (lignocellulosic biomass) derived activated biochar: A fixed-bed column adsorption study. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, p. 100698–100698, 1 fev. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.100698.

RIBAS, Marielen Cozer. **Remoção de corantes têxteis pelo processo de adsorção utilizando carvão ativado produzido a partir de subprodutos agroindustriais - estudos em batelada e coluna de leito fixo.** 2016. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Porto Alegre, 2016.

WORCH, Eckhard. **Adsorption Technology in Water Treatment: Fundamentals, Processes, and Modeling,** 2 ed., Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2021.

ANÁLISE COMPARATIVA DO IMPACTE AMBIENTAL DE DIFERENTES SISTEMAS DE EMBALAGEM PARA AZEITE VIRGEM EXTRA

1 Jullyele Plana Barbosa, 2 Nuno Miguel de Sousa Rodrigues, 3 Ricardo Nagamine Costanzi, 4 Artur Jorge de Jesus Gonçalves

*1 Instituto Politécnico de Bragança, e-mail: a62881@alunos.ipb.pt; 2 CIMO, LA SusTEC, Instituto Politécnico de Bragança, e-mail: nunorodrigues@ipb.pt; 3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: ricardoconstanzi@utfpr.edu.pr; 4 CIMO, LA SusTEC, Instituto Politécnico de Bragança, e-mail: ajg@ipb.pt**

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida; Embalagens; Azeite

Introdução

O azeite (de oliva) ocupa um lugar central na dieta mediterrânica, sendo amplamente reconhecido pelos seus benefícios nutricionais, nomeadamente na redução do risco de doenças cardiovasculares, bem como pelo seu valor cultural, social e económico nos países do Mediterrâneo (Accorsi et al., 2015; Navarro et al., 2018). A União Europeia concentra cerca de 68% da produção mundial de azeite, assumindo igualmente a liderança no consumo global, com aproximadamente 53% do total mundial (Comissão Europeia, 2024). Espanha, Itália, Grécia e Portugal destacam-se como os principais produtores, sendo que Portugal registou, em 2023, a sua segunda maior campanha oleícola de sempre, com cerca de 160,8 mil toneladas, concentradas majoritariamente na região do Alentejo (INE, 2024).

O crescimento da produção e do consumo de azeite tem reforçado as preocupações associadas aos impactes ambientais do setor agroalimentar, impulsionando a adoção de ferramentas analíticas capazes de avaliar o desempenho ambiental dos produtos ao longo de todo o seu ciclo de vida. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem sido amplamente aplicada neste contexto, permitindo quantificar os impactes ambientais desde a extração das matérias-primas até ao fim de vida dos produtos (ISO, 2006a; ISO, 2006b). Estudos anteriores indicam que a fase agrícola, em particular o cultivo das oliveiras, é responsável pela maior fração do impacte ambiental da produção de azeite, podendo representar entre 60% e 80% do total em categorias como o Potencial de Aquecimento Global, a eutrofização e a acidificação (Rapa; Ciano, 2022; Cherni, et al., 2026; Nogueira et al., 2021). Ainda assim, a embalagem tem um papel relevante no desempenho ambiental final do produto, sobretudo quando são utilizados materiais de elevada massa, persiste um elevado consumo energético ou com baixa eficiência de reciclagem (Salomone & Ioppolo, 2012; Vignali, 2016).

Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo geral avaliar o desempenho ambiental de diferentes embalagens utilizadas no acondicionamento de azeite virgem extra, analisando a sua contribuição para diversos impactes ambientais globais e identificando oportunidades de melhoria em alinhamento com os princípios da economia circular. Foram analisadas quatro tipologias de embalagens com elevada representatividade no mercado: garrafa de vidro, garrafa de PET, lata de alumínio e sistema bag-in-box.

Metodologia

A metodologia adotada baseou-se na Avaliação do Ciclo de Vida, conduzida de acordo com as normas ISO 14040 e ISO 14044, garantindo consistência metodológica, transparência e comparabilidade dos resultados (ISO, 2006a; ISO, 2006b). A análise seguiu uma abordagem “do berço ao túmulo” (cradle to grave), contemplando as fases de produção das embalagens, transporte, utilização e gestão do fim de vida. A unidade funcional definida correspondeu à embalagem necessária para acondicionar 0,1 L de azeite, permitindo a comparação direta entre os diferentes sistemas de embalagem.

Foram analisadas quatro tipologias de embalagem amplamente utilizadas no mercado de azeite virgem extra: garrafa de vidro, garrafa de PET, lata de alumínio e sistema bag-in-box (NAVARRO et al., 2018; Vignali, 2016). A unidade funcional definida correspondeu à embalagem necessária para acondicionar 0,1 L de azeite, permitindo a comparação direta entre os sistemas. As massas consideradas foram de 159,3 g para o vidro, 20,5 g para o PET, 34,2 g para o alumínio e 7,97 g para o bag-in-box.

A modelação foi realizada com recurso ao software Sphera LCA for Experts (GaBi), aplicando o método ReCiPe 2016) ao nível midpoint (HUJIBREGTS, et al. 2016), amplamente reconhecido pela sua robustez e aplicação em estudos de ACV de embalagens. As categorias de impacte ambiental analisadas incluíram: Alterações Climáticas (kg CO_2 eq.), Formação de Partículas Finas (kg $PM_{2.5}$ eq.), Consumo de Água Doce (m^3), Ecotoxicidade em Água Doce (kg 1,4-DB eq.) e Toxicidade Humana Não Carcinogénica (kg 1,4-DB eq.). Complementarmente, foi realizada uma revisão sistemática da literatura de acordo com o protocolo PRISMA, permitindo enquadrar os resultados obtidos em estudos semelhantes publicados na literatura científica (Haddaway et al., 2022).

Resultados

Os resultados da ACV evidenciaram diferenças quantitativas significativas entre os sistemas de embalagem, sendo a massa do material e o cenário de fim de vida os principais fatores determinantes do desempenho ambiental. A embalagem de

vidro, enquanto opção mais pesada, apresentou os valores mais elevados na maioria das categorias. Na categoria Alterações Climáticas, o cenário de aterro registou um Potencial de Aquecimento Global de aproximadamente $1{,}4 \times 10^{-1}$ kg CO_2 eq., valor cerca de 20 vezes superior ao observado no cenário de reciclagem ($6{,}9 \times 10^{-3}$ kg CO_2 eq.) e substancialmente superior ao cenário de reuso ($1{,}9 \times 10^{-2}$ kg CO_2 eq.). Estes resultados confirmam a elevada contribuição da produção primária do vidro, responsável por mais de 85% do impacte total, tal como reportado por ALVAREZ (2012).

As embalagens de PET demonstraram um desempenho ambiental mais favorável, associado à sua baixa massa (redução de cerca de 87% face ao vidro) e à eficiência da reciclagem mecânica. Este cenário apresentou um GWP de aproximadamente $1{,}7 \times 10^{-2}$ kg CO_2 eq., traduzindo-se em reduções de cerca de 60% face ao vidro reciclado e 85% face ao vidro em aterro. Nas categorias de Ecotoxicidade em Água Doce e Toxicidade Humana Não Carcinogénica, os valores obtidos para a reciclagem mecânica foram inferiores a 1×10^{-5} kg 1,4-DB eq., em concordância com resultados reportados para embalagens plásticas recicladas (PLASTICS EUROPE, 2022). Em contraste, a reciclagem química e a incineração apresentaram impactes significativamente mais elevados, associados ao maior consumo energético e às emissões dos processos térmicos (RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017).

O desempenho ambiental do alumínio revelou-se altamente dependente do cenário de fim de vida. Enquanto o aterro apresentou um GWP da ordem de $6{,}5 \times 10^{-2}$ kg CO_2 eq., a reciclagem reduziu esse valor para cerca de $3{,}4 \times 10^{-4}$ kg CO_2 eq., o que corresponde a uma redução superior a 99%, o que confirma a elevada eficiência energética do alumínio secundário (EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION, 2021; RAABE et al., 2022). Tendência semelhante foi observada na Ecotoxicidade em Água Doce, com impactes várias ordens de grandeza inferiores no cenário de reciclagem. O sistema bag-in-box, embora apresente vantagens ao nível da massa e do transporte, evidenciou limitações associadas à sua estrutura multicamada e a taxas de reciclabilidade inferiores a 50%, conforme discutido na literatura (NIERO et al., 2017; FERRARA; DE FEO, 2023).

O sistema bag-in-box destacou-se como uma alternativa leve e eficiente do ponto de vista logístico, apresentando menores impactes associados ao transporte e ao consumo de materiais (Lolis, 2019). No entanto, a sua estrutura multicamada dificulta significativamente a reciclagem. Esta condição, limitou a realização de uma avaliação quantitativa completa. A literatura indica que a baixa reciclabilidade destes sistemas constitui um dos principais obstáculos à sua plena integração em modelos de economia circular (Ferrara & De Feo, 2023; Niero et al., 2017).

Os resultados obtidos demonstram de forma consistente que o cenário de fim de vida é um determinante crítico do desempenho ambiental das embalagens para azeite virgem extra, sobrepondo-se, em muitos casos, ao tipo de material utilizado. A reciclagem e o reuso revelaram-se estratégias fundamentais para a redução dos impactes ambientais, enquanto o aterro sanitário se confirmou como a opção mais penalizadora em todas as categorias avaliadas, em concordância com estudos anteriores (SALOMONE; IOPPOLO, 2012; FERRARA; DE FEO, 2023).

Conclusões

À luz dos resultados, a embalagem de PET reciclado mecanicamente surge como a solução mais equilibrada nas condições atuais, seguida do alumínio reciclado, desde que asseguradas elevadas taxas de recolha. O vidro mantém relevância sobretudo em sistemas de reutilização bem estruturados, enquanto o bag-in-box necessita de avanços tecnológicos que permitam melhorar a sua reciclabilidade. O estudo reforça, assim, a importância da incorporação de princípios de eco-design e de estratégias de economia circular no setor oleícola, contribuindo para a redução dos impactes ambientais e para a sustentabilidade do azeite virgem extra.

Agradecimentos

Este trabalho foi suportado por fundos nacionais, através da FCT/MCTES (PIDDAC): UIDB/00690/2020 (DOI:10.54499/UIDB/00690/2020) e UIDP/00690/2020 (DOI: 10.54499/UIDP/00690/2020), e por SusTEC, LA/P/0007/2020 (DOI: 10.54499/LA/P/0007/2020).

Referências Bibliográficas

ACCORSI, R.; VERSARI, C.; MANZINI, R. **Glass vs. plastic: Life cycle assessment of extra-virgin olive oil bottles across global supply chains**. *Sustainable Production and Consumption*, v. 1, p. 68–82, 2015.

ALVAREZ, S. **Environmental impacts of glass packaging: opportunities for lightweighting and recycling**. Bruxelas: FEVE – The European Container Glass Federation, 2012.

CHERNI, M.; BEN AMMAR, H.; GUESMI, M.; LANWER, R.; HIDRI, Y.; OUERTANI, K.; BOULAL, H.; DHEHIBI, B.; FRIJA, A.; LARBI, A. Comparative life cycle assessment of olive (*Olea europaea* L.) production under different agricultural systems: Environmental trade-offs and sustainability insights. ***Resources, Environment and Sustainability***, v. 23, p. 100288, 2026. ISSN 2666-9161.

COMISSÃO EUROPEIA. **EU olive oil production update 2024/2025**. Bruxelas: Directorate-General for Agriculture and Rural Development, 2024. Disponível em: <https://agridata.ec.europa.eu>. Acesso em: abr. 2026.

EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION. **Environmental profile report – Aluminium value chain in Europe (2024 edition)**. Bruxelas: European Aluminium, 2025.

FERRARA, C.; DE FEO, G. **Comparative life cycle assessment of two different packaging systems for extra-virgin olive oil: glass bottle vs. 100% recycled PET bottle**. *Sustainability*, v. 15, n. 4, p. 3665, 2023.

HUJIBREGTS, M. A. J. et al. **ReCiPe 2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level**. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 22, p. 138–147, 2017.

INE – INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA. **Estatísticas agrícolas 2024: produção de azeite em Portugal**. Lisboa: INE, 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework**. Genebra, 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines**. Genebra, 2006b.

NAVARRO, A.; PUIG, R.; MARTÍ, E.; BALA, A.; FULLANA-I-PALMER, P. Tackling the relevance of packaging in life cycle assessment of virgin olive oil and the environmental consequences of regulation. Environmental Management, v. 62, n. 2, p. 277–294, ago. 2018.

NIERO, Monia; HAUSCHILD, Michael. Closing the loop for packaging: finding a framework to operationalize circular economy strategies. *Procedia CIRP*, v. 61, p. 685–690, 2017

PLASTICS EUROPE. **Eco-profiles and environmental product declarations of the European plastics industry – PET**. Bruxelas: PlasticsEurope, 2022.

RAABE, D.; PONGE, D.; UGGOWITZER, P. J.; ROSCHER, M.; PAOLANTONIO, M.; LIU, C.; et al. Making sustainable aluminum by recycling scrap: The science of “dirty” alloys. ***Progress in Materials Science***, v. 128, p. 100947, 2022.

RAGAERT, K.; DELVA, L.; VAN GEEM, K. **Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste**. *Waste Management*, v. 69, p. 24–58, 2017.

RAPA, M.; CIANO, S. A review on life cycle assessment of the olive oil production. *Sustainability*, v. 14, n. 2, p. 654, 2022.

SALOMONE, R.; IOPPOLO, G. **Environmental impacts of olive oil packaging: a life cycle assessment perspective**. *Journal of Cleaner Production*, v. 30, p. 119–130, 2012.

VIGNALI, Giuseppe. Life-cycle assessment of food-packaging systems. In: MUTHU, S. (ed.). *Environmental footprints of packaging*. Singapore: Springer, 2016. p. 1–22.

POTENCIAL USO DE SUBPRODUTOS DA INDÚSTRIA DE CELULOSE PARA DESENVOLVIMENTO DE MEMBRANAS CERÂMICAS

1 Aquiles Nojiri Mota, 1 Victor Rodrigues Alves de Paula, 1 Julia Hoblos , 1 Nilvania Alves da Silva, 2 Ismarley Lage Horta Moraes

1 Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG), Universidade Federal de Uberlândia, aquiles.mota@ufu.br

2 Faculdade de Engenharia Civil (FECIV), Universidade Federal de Uberlândia, ismarley@ufu.br

Palavras-chave: Celulose e papel Resíduos Sólidos; Membranas Cerâmicas;

Introdução

A indústria de celulose e papel é um pilar fundamental da economia global e um setor estratégico da economia brasileira, destacando-se pela liderança na produção global de celulose. Em 2023, o Brasil produziu 24,3 milhões de toneladas de celulose e consolidou-se como o maior exportador mundial do produto, com receitas de US$ 12,7 bilhões e 2,69 milhões de empregos diretos e indiretos gerados pelo setor (IBÁ, 2024). Contudo, o processo kraft, método predominante para a produção de polpa de alta resistência, gera volumes significativos de resíduos sólidos inorgânicos originados em seu ciclo de recuperação química. Este ciclo inicia-se com a queima do licor negro na caldeira de recuperação, onde a fração orgânica é queimada e convertida em energia, enquanto a parte inorgânica fundida forma o smelt. Ao ser dissolvido em água, o smelt dá origem ao licor verde, cuja purificação gera os dregs, sedimentos compostos por carbono residual, sulfetos metálicos e impurezas insolúveis. Na etapa seguinte, o licor verde reage com a cal virgem no apagador; as partículas de cal que não reagem e impurezas inertes resultam nos grits. Por fim, a reação de caustificação precipita o carbonato de cálcio, conhecido como lama de cal, fechando o ciclo de geração desses três principais resíduos alcalinos. Esses resíduos são, na maioria das vezes, destinados a aterros industriais e representam não apenas um custo operacional crescente, mas também um passivo ambiental considerável, dado o caráter altamente alcalino desses materiais (pH> 10) e o risco de lixiviação de compostos solúveis para o solo e para corpos hídricos (KINNARINEN et al., 2016; QUINA et al., 2020). A geração específica desses resíduos varia de 10 a 30 kg por tonelada de celulose produzida (QUINA et al., 2020), o que, considerando a produção nacional, representa milhões de toneladas geradas anualmente. Dentro dos princípios da economia circular e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, a valorização de resíduos industriais em produtos de maior valor agregado surge como uma alternativa estratégica e necessária. Tais resíduos são majoritariamente compostos por carbonato de cálcio ($CaCO_3$), além de outros óxidos como SiO_2 , Al_2O_3 MgO, composição que os torna matérias-primas promissoras para a indústria de materiais (SANTOS et al., 2019). Neste contexto, o desenvolvimento de membranas cerâmicas porosas a partir de precursores de baixo custo tem atraído crescente interesse científico. As membranas cerâmicas oferecem alta estabilidade química, térmica e mecânica, sendo aplicadas em processos de microfiltração, ultrafiltração e nanofiltração, com grande potencial para o tratamento de efluentes e a remoção de poluentes emergentes (HUBADILLAH et al., 2017; VINOTH KUMAR et al., 2015).

Material e Métodos

Foi realizada uma revisão integrativa da literatura com o objetivo de sintetizar o conhecimento disponível acerca da indústria de celulose e seus principais subprodutos alcalinos (dregs, grits e lama de cal), bem como das diferentes rotas tecnológicas para a produção de membranas cerâmicas. Adicionalmente, foram abordados os avanços no desenvolvimento de membranas filtrantes aplicadas ao tratamento avançado de efluentes e na valorização de resíduos industriais. A busca estruturada contemplou publicações em português e inglês, entre 2005 e 2025, incluindo apenas estudos diretamente relacionados ao tema, excluindo duplicatas e resumos sem acesso ao texto completo. As principais bases consultadas foram ScienceDirect, Web of Science e Periódicos CAPES. Ao final do processo de triagem e seleção, 54 artigos foram incluídos na análise. Adicionalmente, foram considerados dados de mercado obtidos junto à Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2024), para contextualizar a relevância prática e as perspectivas econômicas e ambientais. A combinação desses métodos permitiu uma análise integrada das rotas tecnológicas, dos desafios científicos e do potencial de valorização dos resíduos da indústria de celulose.

Resultados e Discussão

A revisão da literatura permitiu consolidar dois eixos temáticos complementares: (1) as características físico-químicas dos resíduos e sua viabilidade como precursores cerâmicos; e (2) as rotas de fabricação de membranas cerâmicas de baixo custo e seu desempenho no tratamento de efluentes.

A análise aprofundada da literatura permitiu a consolidação de dois eixos temáticos complementares: (1) a caracterização físico-química detalhada dos três resíduos e a elucidação de seu potencial como precursores; e (2) a contextualização das principais rotas de valorização — Sinterização, Geopolimerização e Aplicação em Cimento — e seu potencial para a fabricação de membranas cerâmicas.

A viabilidade de cada resíduo como precursor de materiais de alto valor agregado está diretamente ligada à sua composição química e às suas propriedades físicas. Os óxidos majoritários e minoritários, bem como as principais propriedades físicas dos três resíduos, são apresentados na Tabela 1.

Característica	Dregs	Grits	Lama de cal
Composição principal	CaCO , C, metais	CaCO , inertes	CaCO (alta pureza)
Área BET (m^2/g)	6 – 72	2 – 3	10 – 25
Granulometria D50 (µm)	~11,6	~24,1	< 10
Perda ao Fogo (%)	42,1 – 46,8	37,6 – 40,1	~44
CaO (%)	33,0 – 58,7	55,8 – 84,4	> 60 (CaCO > 90%)
SiO_2 (%)	2,35 – 2,8	1,31 – 3,5	< 1,0
Al_2O_3 (%)	0,5 – 0,69	0,4 – 0,42	< 0,5
MgO (%)	4,65 – 5,1	0,3 – 0,47	< 1,0
Na_2O (%)	4,5 – 11,7	0,6 – 4,5	< 0,5
Fe_2O_3(%)	0,5 – 0,65	0,1 – 0,4	< 0,5
Rota de valorização	Geopolimerização	Sinterização	Sinterização

Tabela 1 – Caracterização dos três resíduos alcalinos gerados durante o processo kraft da indústria de polpa celulósica.
Fonte: Adaptado de Santos et al. (2019), Kinnarinen et al. (2016), Mymrin et al. (2020).

A Lama de Cal destaca-se pela sua elevada pureza, com teores de $CaCO_3$ que frequentemente excedem 90 a 95% em peso, conforme reportado por Kinnarinen et al. (2016) e Bharathi et al. (2006). Sua granulometria fina (D50 < 10 µm) e área superficial moderada (10-25 m^2/g) conferem-lhe alta reatividade, tornando-a um substituto ideal para o calcário virgem em aplicações industriais. Os Grits também possuem alta concentração de CaO (até 84,4%), porém com partículas maiores (D50 ~24,1 µm) e baixíssima área superficial (2-3 m^2/g), o que os torna quimicamente menos reativos, mas estruturalmente estáveis e adequados como base em processos de sinterização direta.

Em contrapartida, os Dregs apresentam a composição mais heterogênea e, por isso, o maior potencial de reatividade. Embora o CaO ainda seja o componente principal (até 58,7%), a presença significativa de óxidos fundentes como Na_2O (até 11,7%) e K_2O, e de óxidos formadores de rede como SiO_2 e Al_2O_3, é crucial para a geopolimerização. Essa composição, aliada à sua elevada área superficial (até 72 m^2/g) e granulometria fina (D50 ~11,6 µm), confere aos dregs alta reatividade química e um menor ponto de fusão, tornando-os um precursor ideal para a ativação alcalina e como aditivo para reduzir a temperatura de sinterização de outras massas cerâmicas (SANTOS et al., 2019). A análise termogravimétrica (TGA) corrobora essa distinção: a descarbonatação da calcita ($CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$) nos dregs inicia-se a ~720°C, enquanto nos grits ocorre ~40°C acima (~760°C), efeito direto da menor granulometria e da ação fundente dos óxidos alcalinos (SANTOS et al., 2019). A lama de cal, com sua alta pureza, apresenta comportamento térmico próximo ao do $CaCO_3$ padrão (~750°C), e a liberação de CO_2 durante essa decomposição pode ser explorada como mecanismo de porosificação in situ durante a sinterização de membranas.

As características de cada resíduo direcionam sua aplicação para três rotas principais de valorização, cada uma com fundamentos e potenciais distintos para a fabricação de membranas cerâmicas e outros materiais de engenharia:

1. Sinterização: É a rota clássica e mais consolidada para a produção de cerâmicas, especialmente indicada para a lama de cal e os grits, em razão de sua alta pureza calcítica. O processo envolve a conformação de uma pasta cerâmica — por extrusão direta ou pela técnica de inversão de fases para obtenção de fibras ocas — seguida por tratamento térmico entre 950°C e 1350°C. A temperatura de sinterização é o parâmetro de controle primário da microestrutura final: tamanho de poro, porosidade e permeabilidade. Vinoth Kumar et al. (2015) fabricaram membranas tubulares de argila sinterizadas a 950°C que alcançaram 53% de porosidade, resistência mecânica de 12 MPa e rejeição de 99,98% de óleo em efluentes sintéticos. Silva e Lira (2008), com membranas de cordierita, demonstraram que o aumento da temperatura de sinterização de 1150°C para 1280°C elevou o tamanho médio dos poros de 1,4 µm para 4,1 µm e o fluxo de água de 68 para 587 $kg/h \cdot m^2$. A técnica de inversão de fases, aplicada por Bessa et al. (2017) com dolomita natural, produziu fibras ocas com permeabilidades que variaram de 84,7 $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot kPa^{-1}$ (a 400°C) a 2219 $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot kPa^{-1}$ (a 1350°C), demonstrando que a temperatura de sinterização define a aplicação da membrana — meio de separação ou suporte para camadas ativas. A lama de cal, com sua decomposição térmica liberando CO_2 , pode atuar como agente porosificante in situ, criando poros de forma controlada sem a necessidade de aditivos externos.

2. Geopolimerização: Esta rota é particularmente promissora para os dregs, aproveitando sua alta reatividade e a presença de aluminossilicatos e óxidos alcalinos. Consiste na ativação alcalina do precursor com soluções de NaOH e/ou silicato de sódio, à temperatura ambiente ou ligeiramente elevada, formando um polímero inorgânico tridimensional de alta resistência. Novais et al. (2019) demonstraram que a incorporação de dregs em argamassas geopoliméricas (até 37,5% em massa) não apenas é viável, mas aumenta a resistência à compressão em até 34% e a resistência à flexão em até 71%, em comparação com a referência sem resíduos. Crucialmente, os metais pesados presentes nos dregs são efetivamente imobilizados na matriz geopolimérica, com níveis de lixiviação muito abaixo dos limites regulatórios, o que garante a segurança ambiental do produto final. Mymrin et al. (2020) confirmaram a viabilidade de compósitos com dregs, grits e lama de cal combinados, atingindo resistência à compressão de 19,4 MPa em 180 dias para a formulação com 30% de dregs, 35% de grits, 15% de lama de cal e 20% de resíduo de pós de concreto.

3. Aplicação em Cimento: A alta pureza da lama de cal a qualifica como substituto direto e de alta performance para o calcário na produção de clínquer de cimento Portland. Srivastava et al. (2024) demonstraram que a substituição de até 20% do calcário por lama de cal não compromete a qualidade do cimento — as composições das fases minerais dos clínqueres produzidos são comparáveis ao padrão —, e reduz significativamente o impacto ambiental associado à extração e calcinação da matéria-prima virgem. A análise de ciclo de vida realizada no mesmo estudo confirma o benefício ambiental líquido desta substituição. Embora não seja uma rota direta para membranas filtrantes, a produção de concretos porosos e permeáveis a partir de cimentos modificados com lama de cal representa uma área de pesquisa correlata com grande potencial para aplicações em sistemas de filtração de grande escala.

Considerações Finais

A análise integrada da literatura evidencia que os subprodutos alcalinos da indústria de celulose oriundos do processo de kraft (dregs, grits e lama de cal) apresentam elevado potencial para aplicação como precursores de materiais de alto valor agregado, especialmente no desenvolvimento de membranas. Essa abordagem representa uma estratégia promissora de valorização de resíduos, convertendo passivos ambientais em soluções tecnológicas alinhadas aos princípios da economia circular e às diretrizes de sustentabilidade industrial.

Os resultados indicam que não há uma única rota tecnológica universalmente aplicável, sendo necessário considerar as particularidades físico-químicas de cada resíduo. A sinterização cerâmica mostra-se mais adequada para grits e lama de cal, devido à sua maior pureza e estabilidade, enquanto a geopolimerização se destaca como alternativa promissora para os dregs, em função de sua maior reatividade e da menor demanda energética associada ao processo. Nesse contexto, a geopolimerização apresenta vantagens adicionais relacionadas à redução da pegada de carbono e maior tolerância à variabilidade dos resíduos, configurando-se como uma rota estratégica para aplicações sustentáveis.

As membranas produzidas a partir desses materiais apresentam potencial significativo para aplicação no tratamento avançado de efluentes. Dessa forma, a tecnologia proposta se insere como uma alternativa relevante frente às limitações dos sistemas convencionais de tratamento de água, contribuindo para a melhoria da qualidade hídrica e para o avanço de práticas de reuso.

Entretanto, a transição do conhecimento teórico para a aplicação prática ainda envolve desafios científicos e tecnológicos relevantes. Dentre eles, destacam-se a variabilidade composicional dos resíduos, que demanda o desenvolvimento de protocolos de caracterização e processamento adaptáveis; o controle preciso da microestrutura das membranas, fundamental para garantir desempenho e seletividade adequados; e a necessidade de avaliação da estabilidade química e mecânica a longo prazo, especialmente em condições reais de operação. Adicionalmente, aspectos como a reprodutibilidade dos processos, o controle de fouling e a viabilidade econômica em escala industrial devem ser considerados em etapas futuras.

Diante desse cenário, as próximas etapas da pesquisa concentram-se no desenvolvimento experimental de protótipos de nanomembranas, na otimização dos parâmetros de síntese e na validação do desempenho em condições controladas e reais de aplicação. Paralelamente, pretende-se aprofundar a caracterização dos resíduos de origem nacional, contribuindo não apenas para o avanço científico, mas também para o desenvolvimento de soluções inovadoras aplicáveis à indústria de celulose e ao setor de saneamento.

Por fim, ressalta-se que o desenvolvimento dessa tecnologia possui potencial de impacto significativo no contexto brasileiro, ao integrar inovação, sustentabilidade e aproveitamento de recursos disponíveis, fortalecendo a cadeia produtiva da celulose e posicionando o país como referência no desenvolvimento de soluções ambientais baseadas em ciência de materiais.

Agradecimentos

Agradecemos ao ICIAG, Empreendedorismo Ambiental e à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo apoio institucional e acadêmico, à FAPEMIG pelo apoio financeiro e pela bolsa de iniciação científica concedida e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio à pesquisa.

Referências Bibliográficas

BESSA, L. P. et al. Macro-porous dolomite hollow fibers sintered at different temperatures for wider applications. Ceramics International, v. 43, p. 16283–16291, 2017.

HUBADILLAH, S. K. et al. Super-hydrophilic, low-cost kaolin-based hollow fiber membranes for efficient oily wastewater separation. Materials Letters, v. 191, p. 119–122, 2017.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES(IBÁ). Relatório Anual 2024. Disponível em: <https://iba.org/wp-content/uploads/2025/05/relatorio2024.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2026.

KINNARINEN, T. et al. Separation, treatment and utilization of inorganic residues of chemical pulp mills. Journal of Cleaner Production, v. 133, p. 953–964, 2016.

MYMRIN, V. et al. Efficient application of wastes of pulp and paper production to produce sustainable construction materials. Construction and Building Materials, v. 263, p. 120604, 2020.

NOVAIS, R. M. et al. In-depth investigation of the long-term strength and leaching behaviour of inorganic polymer mortars containing green liquor dregs. Journal of Cleaner Production, v. 220, p. 630–641, 2019.

QUINA, M. J. et al. Inorganic waste generated in kraft pulp mills: a review. Applied Sciences, v. 10, n. 7, p. 2317, 2020.

SANTOS, V. R. et al. Characterization of green liquor dregs and slaker grits from a kraft pulp mill. Journal of Cleaner Production, v. 240, p. 118220, 2019.

SILVA, F. A.; LIRA, H. L. Obtenção e caracterização de membranas cerâmicas de cordierita. Cerâmica, v. 54, n. 330, p. 296–303, 2008.

SRIVASTAVA, S. et al. Utilization of calcite-rich green liquor dregs (GLD), a by-product of pulp and paper industry: production of cement clinker and life cycle analysis. Case Studies in Construction Materials, v. 20, p. e02870, 2024.

VINOTH KUMAR, R.; GHOSHAL, A. K.; PUGAZHENTHI, G. Elaboration of a new ceramic tubular membrane from low-cost raw materials by the extrusion method and its performance in microfiltration of synthetic oily wastewater treatment. Journal of Membrane Science, v. 490, p. 92–102, 2015.

YASMINE, A. B. Avaliação do potencial de uso dos resíduos dregs e grits da indústria de celulose kraft. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

USO DE ESCÓRIA DE ACIARIA DO TIPO LD COMO ALTERNATIVA NO TRATAMENTO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA

Brenda Teixeira Scardini Marinho[1,2], Laura Loyola Marion Guio[1,2], Isabella Oliveira Britto[1,2], Gabriel Fernandes Souza dos Santos[1], Rosane Hein Campos[1], Sérvio Túlio Alves Cassini*[1,2]

[1]Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento, Laboratório de Caracterização Física, Química e Microbiológica, Rua Eliezer Batista, Cariacica, Espírito Santo 29140-500, Brasil; [2]Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Ambiental, Av. Fernando Ferrari, N 514, Vitória, Espírito Santo 29075-910, Brasil;

** Autor correspondente: casinist@gmail.com*

Palavras-chave: Agente alcalinizante substituto; Extração de lignina; Hidrólise alcalina.

Introdução

A crescente demanda por fontes energéticas sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas à valorização de resíduos, especialmente no contexto da bioeconomia circular. Nesse cenário, a produção de bioenergia a partir de resíduos orgânicos surge como alternativa promissora, pois contribui para a mitigação de impactos ambientais e diversificação da matriz energética. Resíduos provenientes de alimentos e atividades agroindustriais apresentam elevado potencial como substratos, devido ao alto teor de carboidratos, proteínas e lipídios, destacando países como o Brasil pela elevada geração desses materiais.

No entanto, a complexidade estrutural, especialmente de resíduos lignocelulósicos, representa um desafio para sua conversão biológica em hidrogênio. Essa biomassa é composta por celulose (35–55%), hemicelulose (20–40%) e lignina (10–25%), sendo esta última responsável pela recalcitrância e limitação da acessibilidade enzimática (Kang & Tan, 2016).

Nesse contexto, o pré-tratamento é essencial para a desconstrução da matriz lignocelulósica, promovendo alterações físicas e químicas, como remoção parcial da lignina, solubilização da hemicelulose e aumento da porosidade. Isso amplia a exposição das cadeias celulósicas, facilitando a ação enzimática e a liberação de açúcares fermentáveis. Métodos tradicionais incluem abordagens químicas, físicas e biológicas (Bundhoo, Mohee & Hassan, 2015), muitas vezes associadas ao uso de reagentes químicos, o que eleva custos e potenciais impactos ambientais.

Diante deste cenário, este trabalho propõe uma metodologia sustentável para o tratamento de sabugo de milho, visando sua aplicação na produção de hidrogênio por fermentação escura. O processo utiliza uma solução alcalina derivada de escória de aciaria do tipo LD como alternativa aos reagentes convencionais, como NaOH e $Ca(OH)_2$.

Material e Métodos

Preparação e beneficiamento dos materiais

O material lignocelulósico (sabugo de milho) foi obtido de uma empresa produtora de pamonha em Vila Velha, Espírito Santo, Brasil. Após a coleta, o material foi seco naturalmente, moído em moinho de ossos na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), reduzido a partículas menores e armazenado em recipiente hermético.

A escória siderúrgica do tipo LD foi fornecida por uma siderúrgica localizada em Serra, Espírito Santo, Brasil, com tamanho inicial entre 19 e 32 mm. O material foi beneficiado para obtenção de partículas finas (<150 µm), por meio de moagem em moinho de mandíbulas e de bolas (UFES), seguido de secagem em estufa a 105 °C e armazenamento em recipiente hermético. A caracterização química foi realizada por EDXRF (Shimadzu EDX-7000), em atmosfera de ar, sob diferentes condições para elementos leves (Na–Sc) e médios/pesados (Al–U). A caracterização estrutural foi conduzida por DRX, com radiação Cu Kα, em varredura de 5 a 90° (2θ). Os difratogramas foram tratados com correção de fundo, suavização e identificação das fases cristalinas utilizando o software X'Pert HighScore.

Desenvolvimento da solução alcalina e caracterização

A solução alcalina derivada da escória beneficiada do tipo LD, foi suspensa em água ultrapura (nas concentrações de 10, 20 e 50% m/v), sob agitação constante à 160 rpm por 24 h em temperatura ambiente, e em seguida, filtrada (0,45 µm). O pH resultante dessa solução ficou entre 12 e 13. Esta solução foi nomeada como Solução Alcalina de Escória de Aciaria (SAEA), e utilizada como um agente deslignificante, substituto ao NaOH e $Ca(OH)_2$.

A caracterização da SAEA incluiu determinação de dureza total, alcalinidade por titulação e cálculo de parâmetros como $pAlk_t$, pCa, pH de saturação (pH_s) e índice de saturação (IS), visando avaliar a condição do sistema em relação ao $CaCO_3$. Para essas caracterizações foram usados o analisador automatizado discreto SmartChem® 210 (AMS Alliance, França), e metodologias conforme descritos no Standard Methods of Water and Wastewater (APHA, 2017), Langelier (1936) e Stumm & Morgan (1996).

O potencial alcalinizante da SAEA foi comparado ao NaOH e $Ca(OH)_2$ com base na liberação de OH^- (2 mol/mol para $Ca(OH)_2$ e 1 mol/mol para NaOH). A alcalinidade (mg/L de $CaCO_3$) foi convertida em mmol de OH^- considerando 1 equivalente igual à 50 mg de $CaCO_3$. A partir da capacidade de geração de OH^- (meq/L) na dosagem de 10 g/L, estimou-se a quantidade de escória necessária (g/L) para atingir alcalinidade equivalente a soluções a 1% de $Ca(OH)_2$ e NaOH.

Tratamento alcalino em sabugo de milho

O sabugo de milho foi submetido ao tratamento com SAEA (10, 20 e 50% m/v). Para isso, foi adicionada ao sabugo de milho a SAEA, em uma relação 1:10, e mantida sob agitação constante de 160 rpm por 24 horas, em temperatura ambiente. Após o período de tratamento, procedeu-se à separação entre a fase líquida e o substrato sólido. Para a análise morfológica, as amostras do substrato tratado foram previamente metalizadas com ouro e examinadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando o equipamento modelo JSM-6610LV (Japan Electron Optics Laboratory, Japão).

Resultados e Discussão

A Figura 01 apresenta o espectro de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF), no qual a intensidade de fluorescência (cps/µA) é plotada em função da energia (keV) dos elementos presentes na escória. A análise indicou que os principais constituintes são cálcio (49,1%) e ferro (30,1%), seguidos por silício (12,7%), alumínio (3,8%) e manganês (3,1%). Em menores concentrações, foram identificados titânio (0,40%), cromo (0,22%), estrôncio (0,18%), enxofre (0,12%), potássio (0,10%), vanádio (0,09%), fósforo (0,03%), nióbio (0,02%) e zircônio (0,01%). Esses resultados evidenciam que a escória LD é predominantemente composta por óxidos de cálcio e ferro, além de conter quantidades relevantes de sílica e alumina, bem como elementos traço característicos do processo siderúrgico. Os difratogramas de DRX obtidos, que correspondem aos padrões registrados no banco de dados ICDD PDF, são observados na Figura 02.

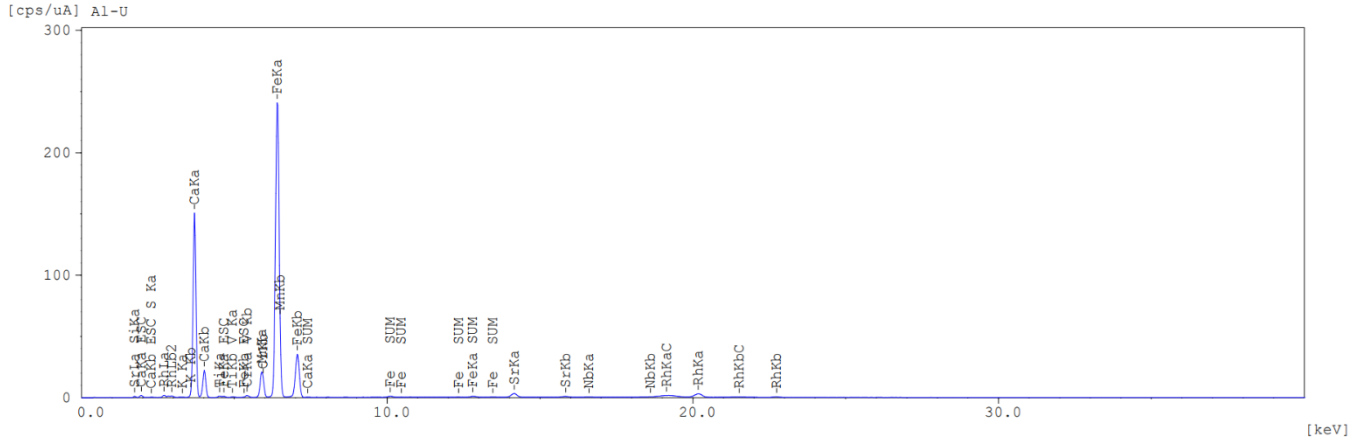


Figura 01: Espectrometria de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (EDXRF) da escória de aciaria LD.

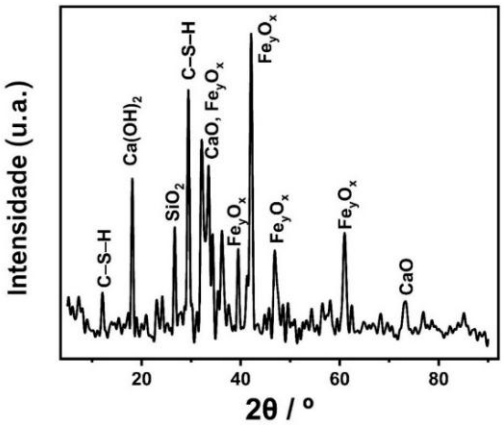


Figura 02: Padrão de Difração de Raios X (DRX) da escória de aciaria LD.

De acordo com a Figura 02, as principais fases identificadas foram óxidos de ferro (01-074-1884), óxido de cálcio (00-028-0775), hidróxido de cálcio (01-076-0570), ferrita de cálcio (00-011-0675) e dióxido de silício (00-032-0993) (Yildirim & Prezzi, 2011; Wang et al., 2021; Balaguera & Botero, 2020; Biava et al., 2023).

A composição elementar obtida por EDXRF (Figura 01) evidencia elevados teores de Ca (49,1%), Fe (30,1%) e Si (12,7%), além de menores proporções de Al (3,8%) e Mn (3,1%), corroborando com as fases cristalinas identificadas no DRX. O predomínio de Ca em relação ao Si sugere uma matriz rica em fases básicas, típica de escórias LD, favorecendo a formação de óxidos e silicatos de cálcio. Este resultado indica que, embora esses elementos estejam presentes, parte deles encontra-se incorporada em soluções sólidas nos principais óxidos ou distribuída em fases amorfas. Assim, confirma-se que a matriz da escória LD é predominantemente constituída por óxidos de cálcio e ferro, com a presença de sílica e produtos de hidratação secundários, em concordância com a literatura sobre escórias provenientes do refino do aço (Yildirim & Prezzi, 2011; Wang et al., 2021; Balaguera & Botero, 2020; Biava et al., 2023).

A análise de solubilização de Ca^{2+} na escória indica que, embora tenham sido estudadas diferentes concentrações (10 a 50 g/L), todas apresentaram estabilização em torno de 390 mg/L. Observa-se ainda que a porcentagem de Ca^{2+} dissolvido foi inversamente proporcional às concentrações avaliadas (3,92% em 10 g/L; 1,96% em 20 g/L; e 0,78% em 50 g/L), demonstrando que a solubilização de cálcio está relacionada ao equilíbrio químico do sistema, e não à quantidade de material adicionada (Lee *et al*., 2021). A alcalinidade total variou de 1500 (em 10 e 20 g/L) a 1700 mg/L (em 50 g/L de escória), enquanto os valores negativos do índice de saturação (SI) indicam que os íons presentes no meio são insuficientes para promover a formação de precipitados de carbonato de cálcio (Dietzel & Boch, 2024).

Os cálculos indicaram que a alcalinidade total da SAEA (10, 20 e 50% m/v) corresponde a uma faixa de 30 a 34 meq/L de íons OH^-. Com base nesses valores, estimou-se que, em comparação aos reagentes convencionais, seriam necessárias concentrações de aproximadamente 90 g/L de escória LD para atingir alcalinidade equivalente a uma solução de 1% de $Ca(OH)_2$ (270 meq/L de OH^-) e 83,3 g/L para equivalência com uma solução de 1% de NaOH (250 meq/L de OH^-), conforme apresentado na Figura 03.

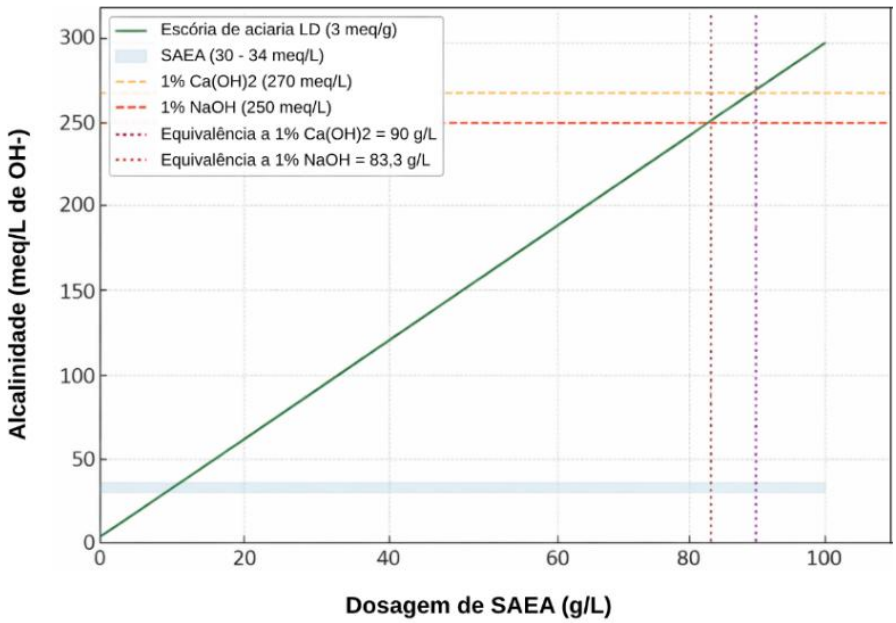


Figura 03: Relação entre a concentração de SAEA e a alcalinidade gerada na solução (meq/L de OH^-).
As linhas horizontais indicam a alcalinidade equivalente dos reagentes comerciais. As linhas verticais indicam as concentrações de escória necessárias para atingir a equivalência a esses valores.

Os resultados de relação da concentração e da alcalinidade de SAEA com os demais reagentes alcalinos (NaOH e $Ca(OH)_2$) reforça que apesar da SAEA possuir uma capacidade à agente alcalinizante, a sua capacidade é efetivamente mais baixa quando comparada ao hidróxido de sódio e hidróxido de cálcio. No entanto, é importante ressaltar essa via de tratamento como uma alternativa de interesse ambiental especialmente para substituição parcial em processos que buscam reduzir custos e reutilizar resíduos industriais.

A Figura 04, destaca como o uso da SAEA foi capaz de transformar da matriz lignocelulósica após o ensaio em sabugo de milho. As micrografias evidenciam que o tratamento foi capaz de promover desestruturação progressiva do sabugo de milho, aumentando a rugosidade, porosidade e exposição das fibras de celulose. Com o aumento da concentração, foi observada uma maior degradação da matriz, favorecendo a acessibilidade, embora condições mais severas possam implicar perdas estruturais.

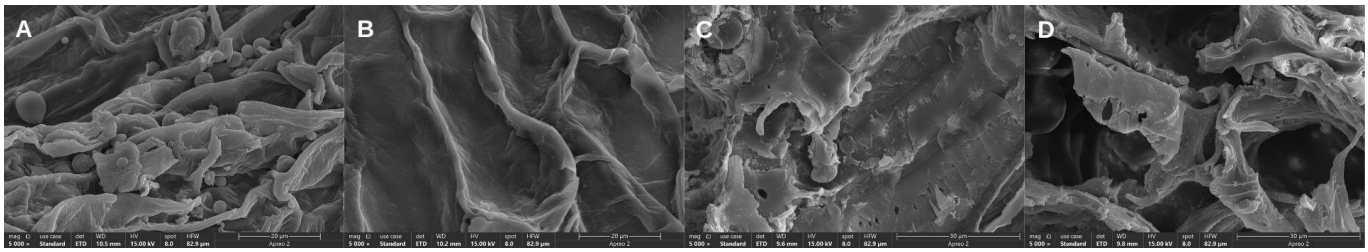


Figura 04: Microscopia eletrônica de varredura (MEV) do sabugo de milho após o tratamento por SAEA.
A estrutura do sabugo de milho antes do tratamento; **B** estrutura do sabugo de milho após o tratamento com 10% de SAEA; **C** com 20% de SAEA e; **D** com 50% de SAEA.

Considerações finais

Em síntese, a análise da relação entre concentração e alcalinidade da SAEA, em comparação com reagentes alcalinos convencionais (NaOH e $Ca(OH)_2$), demonstra que, embora a SAEA atue como agente alcalinizante, sua eficiência é inferior à desses hidróxidos. Ainda assim, destaca-se o potencial dessa alternativa como uma via ambientalmente relevante, especialmente para aplicações que visem à substituição parcial de reagentes químicos tradicionais, contribuindo para a redução de custos operacionais e para a valorização de resíduos industriais. Ademais, as análises por MEV corroboram esses resultados ao evidenciar a ruptura da matriz lignocelulósica, mais pronunciada nas condições de 20% e 50% de SAEA.

Agradecimentos

Os Autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de doutorado a autora Brenda T. S. Marinho (processo nº 88887.834846/2023-00), bem como ao corpo docente e técnico da Universidade Federal do Espírito Santo, *campus* Goiabeiras e Maruípe; ao apoio financeiro (MCT/FINEP/CT-INFRA – PROINFRA 01/2006) do Laboratório de Ultraestrutura Celular Carlos Alberto Redins (LUCCAR/UFES) responsável pelas análises de MEV e ao Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento do Espírito Santo (CPID/LACAR), vinculado à Secretaria de Estado da Ciência, Tecnologia e Inovação (SECTI).

Referências Bibliográficas

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23. ed. Washington, DC: APHA, 2017.

BALAGUERA, C. A. C; BOTERO, M. A. G. **Characterization of steel slag for the production of chemically bonded phosphate ceramics (CBPC)**. *Construction and Building Materials*, v. 241, p. 118138, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118138

BIAVA, G.; ZACCO, A.; ZANOLETTI, A.; SORRENTINO, G. P.; CAPONE, C.; PRINCIGALLO, A.; DEPERO, L. E.; BONTEMPI, E. **Accelerated direct carbonation of steel slag and cement kiln dust: An industrial symbiosis strategy applied in the Bergamo–Brescia area**. *Materials*, v. 16, n. 11, p. 4055, 2023. DOI: 10.3390/ma16114055

BUNDHOO, M. A. Z.; MOHEE, R.; HASSAN, M. A. Effects of pre-treatment technologies on dark fermentative biohydrogen production: A review. Journal of Environmental Management, v. 157, p. 20–48, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.04.006

DIETZEL, M.; BOCH, R. **Precipitation of $CaCO_3$ in natural and man-made aquatic environments:** mechanisms, analogues, and proxies. *Geochemistry*, v. 84, n. 4, p. 126206, 2024. DOI: 10.1016/j.chemer.2024.126206

KANG, Q.; TAN, T. **Exergy and CO_2 analyses as key tools for the evaluation of bio-ethanol production**. *Sustainability*, v. 8, n. 1, p. 76, 2016. DOI: 10.3390/su8010076

LANGELIER, W. F. **The analytical control of anti-corrosion water treatment.** *Journal of the American Water Works Association*, v. 28, n. 10, p. 1500–1521, 1936. DOI: 10.1002/j.1551-8833.1936.tb13785.x

STUMM, W.; MORGAN, J. J. **Aquatic chemistry:** chemical equilibria and rates in natural waters. 3rd ed. New York: Wiley-Interscience, 1996.

LEE, Y. H.; EOM, H.; LEE, S. M.; KIM, S. S. **Effects of pH and metal composition on selective extraction of calcium from steel slag for $Ca(OH)_2$ production**. *RSC Advances*, v. 11, 2021. DOI: 10.1039/d0ra08497b.

YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. **Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag**. Advances in Civil Engineering, p. 1–13, 2011. DOI: 10.1155/2011/463638

WANG, X.; NI, W.; LI, J.; ZHANG, S.; LI, K. **Study on mineral compositions of direct carbonated steel slag by QXRD, TG, FTIR, and XPS**. Energies, v. 14, p. 4489, 2021. DOI: 10.3390/en14154489.

GRADIENTE DE TEMPERATURA COMO ESTRATÉGIA PARA CRESCIMENTO DE CRISTAIS DE ESTRUVITA

1 Gabriel Wottrich Dobrachinski, 2 Karen de Camargo, 3 Gerônimo Rodrigues Prado, 4 Marcos Vinícios Novaes de Souza, 1,3,4 Fabiane Goldschmidt Antes, 1 Airton Kunz

1 PPGETA/UFPR – setor Palotina e-mail: Gabrielwttd@gmail.com; 2 IFC -Campus Concórdia; 3 PPGCTA/UFFS Campus Erechim; 4 Embrapa Suinos e Aves e-mail: Airton.kunz@embrapa.br

Palavras-chave: Nutrientes; Fertilizantes; Cristalização

Introdução

Existem diversos modos para remoção de P de águas residuárias, entretanto, a precipitação tem destaque por ser um método de baixo custo que além de tudo permite a utilização posterior do P, sendo um destes minerais o fosfato de amônio e magnésio ($MgNH_4PO_4{}^*6(H_2O)$) conhecido como estruvita. A estruvita tem ganhado destaque por conter tanto P como N e ser considerado um fertilizante de liberação lenta. No entanto, o processo de produção do cristal ainda apresenta alguns desafios de processo e estão sendo avaliadas diversas rotas para a sua produção. Entretanto a maioria dos estudos vislumbram somente a produção do cristal sem considerar seu posterior deságue e secagem, o que limita as plantas já operacionais à centrifugação do lodo (Kunz et al. 2019; Aguilar-Pozo et al. 2025; Incio et al, 2025).

O princípio base do processo de cristalização é atingir uma quantidade maior de soluto do que o solvente consegue solubilizar. Tal estado pode ser atingido reduzindo-se a quantidade de solvente, no caso da cristalização evaporativa, ou se reduzindo a capacidade de solvatação do solvente, sendo este o caso da cristalização resfriativa, com anti-solventes e precipitação (Green, Don W, 2018; Lewis et al, 2015).

Para que ocorra a formação de cristais, primeiro é necessário que ocorra a formação de um novo cristal, processo chamado de nucleação primária, e o subsequente crescimento de tais núcleos formados e, com condições adequadas, pode ocorrer ainda uma nucleação secundária, sendo caracterizada pelo crescimento de um novo cristal em um já formado. Entretanto, quando o grau de supersaturação é muito elevado, a tendência é que o processo de nucleação primária seja muito mais proeminente, gerando assim muitos cristais pequenos (MC Cabe et al, 1993).

O método de resfriamento naturalmente apresenta uma curva de supersaturação menos inclinada, o que favorece o processo de crescimento e nucleação secundária, assim tendendo a produzir cristais maiores quando comparado ao método de precipitação (MC Cabe et al, 1993; Green, Don W, 2018).

Por mais que uma elevada produção seja desejada, seja por melhor aproveitamento dos reagentes ou, no caso do tratamento de efluentes, uma elevada remoção de um contaminante, também é crucial uma uniformidade nos cristais, uma vez que este material será processado (MC Cabe et al, 1993).

O objetivo deste trabalho é a obtenção de cristais maiores por meio da cristalização com o uso do método de resfriamento, de modo a ser possível o deságue do lodo final não somente por centrifugação, mas por métodos mais robustos e de baixo custo.

Materiais e Métodos

Para o processo de cristalização foi utilizado um reator de polietileno tereftalato glicol (PETG) confeccionado por impressão em uma impressora Creality® modelo K1C densidade de impressão de 94%, volume reacional de 3L com camisa de aquecimento. Para aquecimento do meio a camisa do reator foi conectada a um banho térmico da marca Julabo® modelo MB ajustado para 37 °C.

Para a agitação foi utilizado um agitador IKA® modelo RW20 digital, regulado a 76 rpm, promovendo movimento no fluido sem causar danos aos cristais.

Como fonte de P foi utilizado digestato coletado de um reator CSTR em uma planta de tratamento de dejetos suínos localizada em Videira, SC (Cândido et al. 2022). Após o processo de extração de P eseparação do lodo, o sobrenadante rico em PO_4^{3-} foi transferido para o reator para a cristalização.

Para a reação de produção de estruvita foi adicionado $Mg(Cl)_2$ P.A. da marca Synth® para se atingir uma relação estequiométrica de P:Mg de 1:2. Para a realização do processo de cristalização, primeiramente 2 L de digestato foram colocados no reator, posteriormente sendo adicionado o $Mg(Cl)_2$ já dissolvido (0,5 mol L^{-1}) . Após estabilização da temperatura no interior do reator em 37°C, foi adicionado NaOH (4mol L^{-1}) até se atingir um pH ~7,5.

Com o pH ajustado, foi desligado então o controle de temperatura, e o reator foi mantido sob agitação até atingir a temperatura ambiente, a qual foi mantida a 22 °C. Seguiu-se a separação sólido liquido, por sedimentação e o lodo foi seco em estufa a 55 °C.

Para o controle comparativo, o processo foi realizado nas mesmas condições, entretanto sem aquecimento do digestato previamente à reação de cristalização

A caracterização das amostras de cristais obtidos foi feita por microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em um microscópio TESCAN VEGA modelo 4 LMU (S5124) equipado com detector energia dispersiva (EDS). As amostras foram previamente metalizadas com ouro a 10 mA por 500 s. As análises foram realizadas utilizando feixe de elétrons de 20 kV de energia e correntes de 300 pA (para as imagens) e 20 nA (para o espectro de EDS)

As amostras também foram avaliadas qualitativamente com um microscópio óptico da marca Nikon modelo Eclipse E200 com aproximação de 40x a 1000x.

Resultados e Discussão

O método de aquecimento mostrou resultados promissores, uma vez que foi possível obter cristais distinguíveis a olho nu, como pode ser observado na Figura 2A. Este mesmo comportamento não foi observado na reação controle (sem aquecimento pré-reação de cristalização). Também foi possível observar a nucleação secundária, evento que não foi observado no método controle, sendo demonstrado respectivamente nas Figuras 2B e 2C, obtidas por um microscópio óptico.

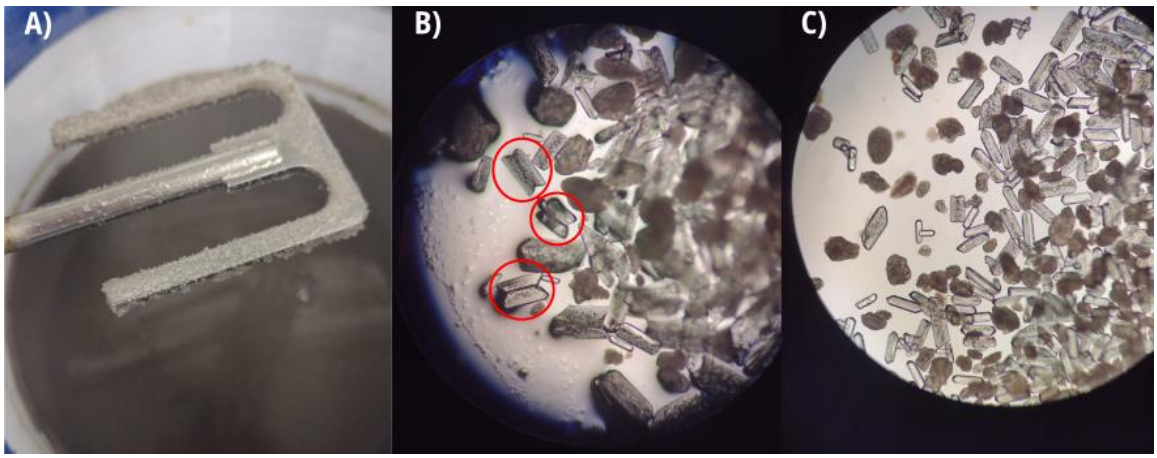


Figura 2: Cristais de estruvita aderidos na haste de agitação (A), imagens de microscopia óptica de cristais de estruvita com aquecimento (B) e pela cristalização (C)
Fonte: Autoral

Por meio da análise de EDS foi possível confirmar que os cristais formados são de estruvita. Na figura 3B tem-se a área selecionada e na figura 3B a resposta do EDS, podendo ser observados 3 picos distintos, correspondendo em ordem decrescente ao P, Mg e O.

Ao se comparar os cristais produzidos pelo método de aquecimento com o método tradicional de cristalização, demonstrados respectivamente na figura 4A e 4B, há uma diferença considerável de tamanho entre os cristais das amostras, ambas com a escala de 1 mm e aproximação de 100 vezes. Por outro lado, na figura 4C e 4D tem se os cristais produzidos, respectivamente, por meio de aquecimento e precipitação, mas com uma aproximação de 500 vezes.

Baseando-se nas imagens de MEV e com o uso da escala na base das imagens pode-se estimar que os cristais produzidos com o método de aquecimento apresentaram um tamanho máximo de 0,41 mm de comprimento por 0,2 mm de largura, com o tamanho mais comum de aproximadamente 0,3 por 0,15 mm enquanto as amostras sem aquecimento apresentaram cristais com um tamanho máximo de 0,1 por 0,02 mm, sendo mais comum a formação de cristais com tamanho em torno de 0,09 por 0,03 mm.

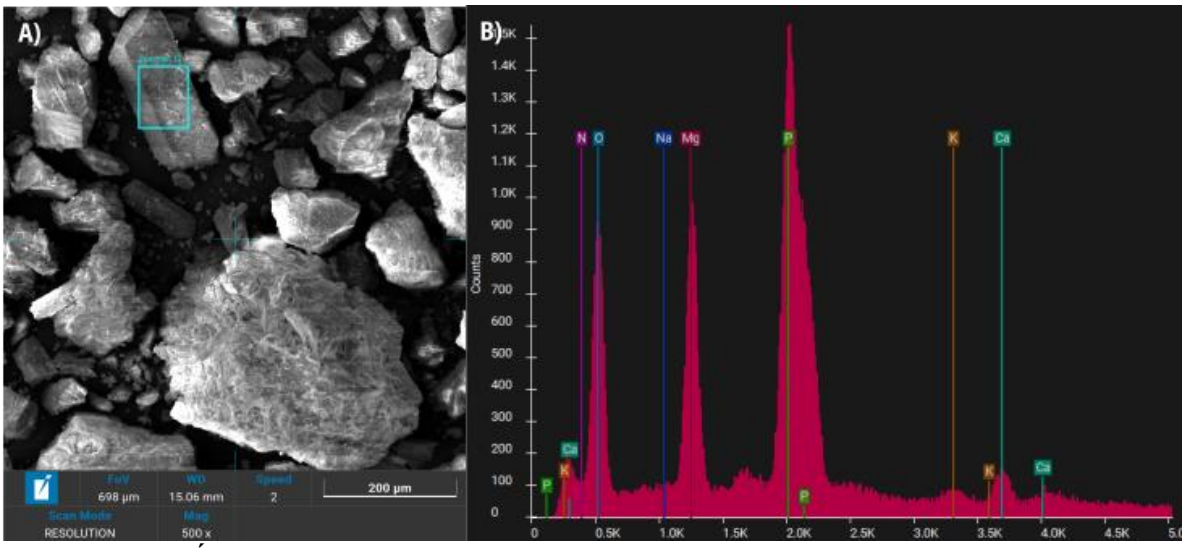


Figura 3: Área do cristal selecionada para análise de EDS (A), resposta da análise de EDS.
Fonte: Autoral

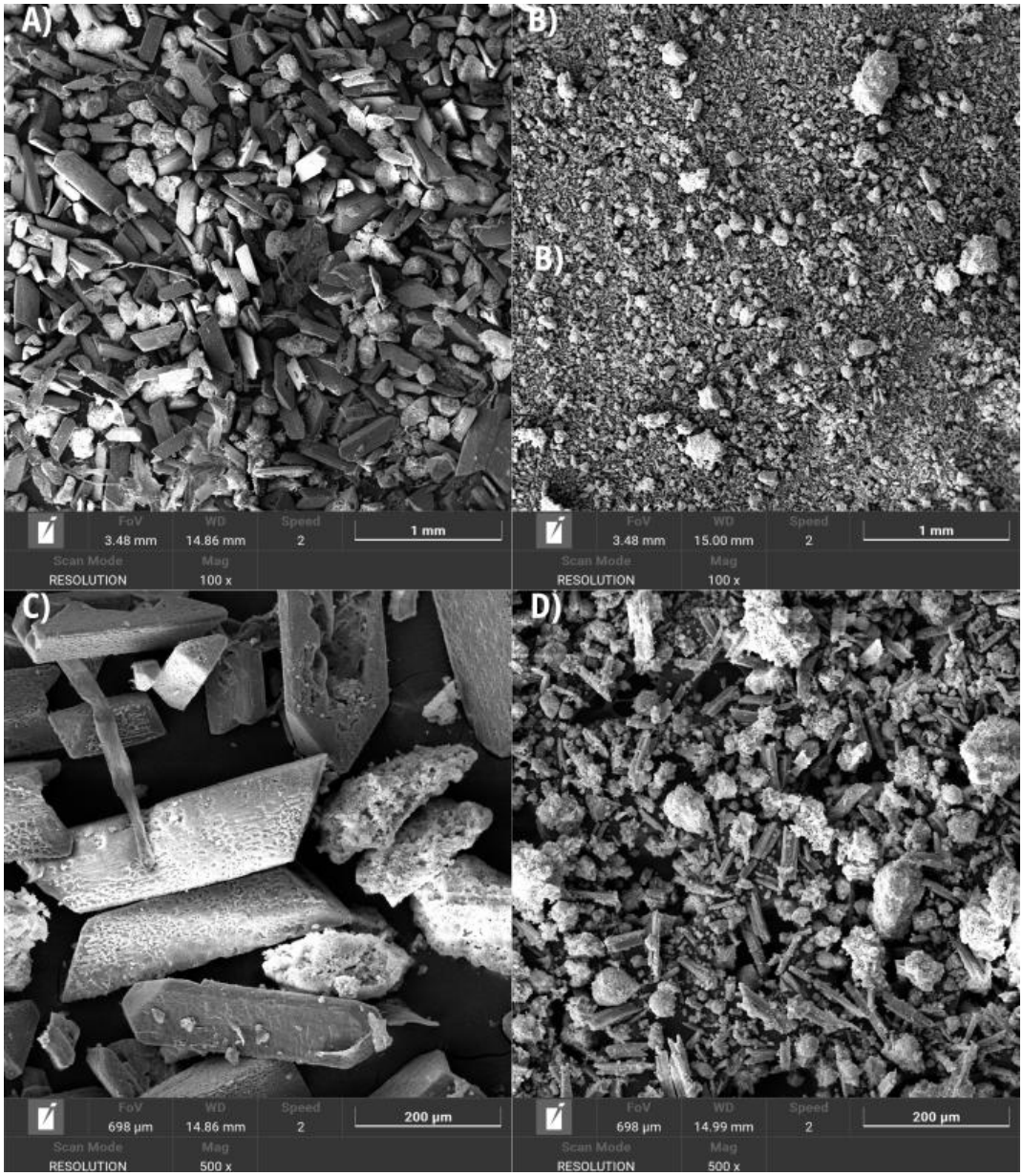


Figura 4: Imagens dos cristais de estruvita obtidas por MEV produzidos com: método de aquecimento e aproximação de 100x(A), precipitação e aproximação de 100x (B), aquecimento e aproximação de 500x (C) e precipitação com aproximação de 500x (D).
Fonte: Autoral

Conclusão

Conclui-se que o método de cristalização por resfriamento permite aumentar consideravelmente o tamanho máximo dos cristais, sendo encontrados cristais até 4 vezes maiores que os produzidos por meio do método de precipitação sem aquecimento inicial do digestato.

Deste modo, sugere-se que é possível a aplicação de métodos como filtragem por meio de filtros-prensa, e peneiras, equipamentos em geral de menor custo tanto de instalação como operação em comparação com centrífugas.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) com apoio financeiro da FINEP.e à Central Analítica da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS, Campus Erechim).

Referências Bibliográficas

AGUILAR-POZO. V.B.; CHIMENOS. J.M.; TRIBBY E.; LÓPEZ A.; GÓMEZ J.; OLACIREGUI-ARIZMENDI K.; ELDUAYEN-ECHAVE B.; AYESA E.; GUEMBE M.; GARCÍA-ZUBIRI I.X.; ASTALS S. **Phosphorus recovery using low-grade magnesium oxide as a magnesium source and an alkaline reagent: A pilot-scale study**, *Journal of Water Process*

Engineering, Volume 72, 2025,107408, ISSN 2214-7144, Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107408. Acesso em: 4 mar. 2026.

CÂNDIDO, DANIELA; BOLSAN, ALICE CHIAPETTI; HOLLAS, CAMILA ESTER; VENTURIN, BRUNO; TÁPPARO, DEISI CRISTINA; BONASSA, GABRIELA; ANTES, FABIANE GOLDSCHMIDT; STEINMETZ, RICARDO LUÍS RADIS; BORTOLI, MARCELO; KUNZ, AIRTON. **Integration of swine manure anaerobic digestion and digestate nutrients removal/recovery under a circular economy concept**. *Journal of Environmental Management*, v. 301, p. 113825, 2022. ISSN 0301-4797. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113825.

INÁCIO CT, CAMPOS DVB, GOLDSCHMIDT FA, MORES R, KUNZ A, BRUNETTO G, NATALE W, CONTI L, WELTER DW, MARCHEZAN C, MENEZES JFS, DIAS RC, ALVES BJR. **Struvite potential as a slow-release fertilizer for phosphorus sustainable management in Brazilian agriculture**. *Rev Bras Cienc Solo*. 2025;49. https://doi.org/10.36783/18069657rbcs2024012.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. do (ed.). **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019. 209 p.

LEWIS, ALISSON; SECKLER, MARCELO; KRAMER, HERMAN; ROSMALEN, GERDA VAN. **Industrial crystallization, fundamentals and applications**, Cambridge CB2 8BS, United Kingdom: *University Printing House*, 2015.

MCCABE, WARREN L.; SMITH, JULIAN C.; HARRIOTT, PETER. **Unit operations of chemical engineering**. 5. ed. New York, St. Louis, San Francisco, Auckland, Bogotá, Caracas, Lisbon, London, Madrid, Mexico, Milan, Montreal, New Delhi, Paris, San Juan, Singapore, Sydney, Tokyo, Toronto: *McGraw-Hill*, 1993.

GREEN, DON W.; SOUTHARD, MARYLEE Z. **Perry's chemical engineers' handbook**. 9. ed. S.L: *McGraw-Hill*, 2018.

ECONOMIA CIRCULAR NO CONTEXTO DO SANEAMENTO BÁSICO BRASILEIRO COMO UMA NOVA PERSPECTIVA DE GESTÃO PÚBLICA

1 Ma. Juliana Francine da Costa; 2 Dr. Rodrigo de Almeida Mohedano
1 UFSC, e-mail: juliana.francine.costa@posgrad.ufsc.br; 2 UFSC, e-mail: rodrigo.mohedano@ufsc.br

Palavras-chave: Economia Circular; Saneamento Básico.

Introdução

No Brasil, o Novo Marco do Saneamento Básico (Lei n° 14.026 de 2020) define saneamento básico como um conjunto de serviços públicos, infraestrutura e instalações operacionais de: abastecimento de água potável (1), esgotamento sanitário (2), limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos (3) e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas (4).

A Política Nacional de Saneamento Básico (Lei n° 11.045 de 2007), alterada pelo novo marco, dentre seu conteúdo, estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, estabelece que os serviços públicos de saneamento básico devem ser prestados com base em universalização do acesso, estabelece também vínculo com políticas de desenvolvimento urbano e regional e estímulo à pesquisa. Conforme a política nacional, exercem a titularidade dos serviços públicos de saneamento básico: os municípios e o Distrito Federal, no caso de interesse local; e os estados, em conjunto com os municípios, que compartilham instalações operacionais integrantes de regiões metropolitanas, aglomerações urbanas e microrregiões, no caso de interesse comum.

Alinhados ao estabelecimento legal descrito, Sousa et al. (2021), discorrem que o titular dos serviços deve formular o plano de saneamento básico, bem como estabelecer metas e indicadores de desempenho e mecanismos de aferição de resultados, a serem obrigatoriamente observados na execução dos serviços prestados. A existência de plano é condição de validade de contratos que tenham por objeto a prestação de serviços públicos de saneamento básico. Ribeiro et al. (2024), exploraram benefícios de implementação dos planos no fomento à melhoria da prestação dos serviços públicos, sendo que com a implementação, a União pode conceder incentivos (orçamentários, fiscais ou creditícios) como contrapartida ao alcance de metas de desempenho previamente estabelecidas no plano. Borges e Moraes (2025), após análise da Lei n° 11.045/2007, reconheceram a importância do plano de saneamento básico, e atribuíram a necessidade da representação da sociedade civil se sobrepondo aos interesses difusos e/ou individuais, como forma de fortalecimento do processo democrático do planejamento participativo.

O saneamento básico envolve recursos naturais que desempenham uma função crucial na entrega de valor para a sociedade. Conforme Iwasaka (2018) e Parchomenko et al. (2019), o uso eficiente de recursos recebe crescente atenção nas últimas décadas. Os autores descrevem que manter os materiais durante o período máximo, evitando a extração de recursos e a geração de resíduos e emissões é requisito importante e está inserido em agendas governamentais de diversos países.

A reflexão sobre otimização de recursos naturais no saneamento básico converge para os preceitos da Economia Circular, cujo propósito fundamental é prolongar a permanência destes recursos dentro de ciclos produtivos, minimizando simultaneamente a necessidade de novas extrações do meio ambiente (Sultanova et al., 2021; Smol et al., 2024; Rebello et al., 2025).

A Economia Circular (EC) é um modelo de economia regenerativa que se opõe à economia linear, baseada em extrair matérias-primas, transformar, produzir, utilizar e descartar. Existe um consenso das noções básicas da estrutura da EC, destacando que o "Princípio dos 3 R's da Sustentabilidade" (reduzir, reutilizar e reciclar) é frequentemente mencionado na literatura referente à temática. Na literatura acadêmica, também foi identificado um consenso sobre o fato de a EC ser dividida em três níveis de implementação: micro (empresas), meso (simbiose entre empresas) e macro (cidade/região/província) (Ghisellini; Cialani; Ulgiati, 2016; Kirchherr, 2017; Merli; Preziosi; Acampora, 2018; Moraga et al., 2019; Prieto; Jaca; Ormazabal, 2018; Saidani et al., 2019).

Em 2024, um conjunto de normas, contempladas na série ISO 59000, foi desenvolvido para a implementação da EC. A ABNT NBR ISO 59004/24 estabelece vocabulário, princípios e orientações para implementação da EC. A ABNT NBR ISO 59010/24 orienta sobre a transição de modelos de negócios e redes de valor e a ABNT NBR ISO 59020 trata da mensuração e avaliação do desempenho de circularidade. As três normas citadas estão interligadas e consistem na base para todo o conjunto (ABNT NBR ISO 59004/24, ISO 59010/24, ISO 59020/24).

Até o momento, a maioria dos estudos acadêmicos e exemplos de negócios realizados em torno do conceito de EC consideram a realidade dos países europeus. No entanto, grande parte da população global está concentrada nos países em desenvolvimento. Impactos ambientais e sociais globais no futuro próximo serão determinados em grande parte pela forma como países como Brasil, China e Índia usam seus recursos naturais. Portanto, há oportunidades desperdiçadas em não apoiar as iniciativas econômicas circulares nos países de economias emergentes. E para que este potencial não seja perdido, há um papel importante do governo na criação do ambiente propício para estabelecer cadeias circulares socialmente, ambientalmente e economicamente efetivas (NURES, 2016; Kirchherr, 2022). Ademais, uma análise realizada pela Ellen MacArthur Foundation (EMF) (2017), rede líder mundial em EC, indicou que em 2050, uma trajetória de desenvolvimento fundamentada na EC pode proporcionar a um país em desenvolvimento, com economia emergente, benefícios anuais que equivalem a 30% do Produto Interno Bruto (PIB).

Problema de Pesquisa e Objetivos

A gestão do Saneamento Básico (SB) no Brasil se consolidou sob uma lógica linear, focada na remoção de poluentes para descarte. Apesar da emergência da Economia Circular (EC), observa-se uma dissociação entre sua teoria e prática

operacional no saneamento básico no Brasil. Portanto, existe uma lacuna na compreensão de como os princípios de circularidade podem ser adaptados a um setor altamente regulado.

Diante dos conceitos apresentados e do problema identificado, este estudo objetivou analisar o estágio de integração e aplicação dos princípios da Economia Circular no contexto do saneamento básico brasileiro. Os objetivos específicos foram definidos em: verificar se há integração formal demonstrada pela literatura acadêmica entre EC e SB (1); identificar rotas de circularidade tecnicamente possíveis considerando os quatro eixos do SB (2); e propor forma de aplicação de princípios de circularidade no SB no âmbito da gestão pública brasileira (3).

Metodologia

A verificação de adaptação da teoria da EC ao SB foi realizada por meio de indicadores, que conforme a norma ABNT ISO 14.031 (2015) são representações mensuráveis das condições ou estados de operações e simplificam informações sobre fenômenos complexos. Além da busca por indicadores, optou-se pelos indicadores diretos, que conforme Moraga et al. (2019), representam a eficiência do processo relacionada à otimização de recursos. Para elucidar, toma-se como exemplo de indicador direto, a taxa de recuperação de materiais recicláveis, e como exemplo de indicador indireto, o número de patentes relacionadas à reciclagem. Ou seja, os indicadores indiretos medem aspectos auxiliares de EC, mostrando conhecimento de áreas relevantes, envolvendo questões ambientais, sociais e/ou econômicas, mas não necessariamente abrangendo a circularidade diretamente.

Desta forma, buscou-se por meio de uma revisão de literatura narrativa indicadores diretos em publicações de indicadores de EC para o SB dos últimos cinco anos, a fim de compreender se há integração formal entre EC e SB demonstrada pela literatura. A opção por este tipo de revisão de literatura se justifica pelo estágio atual da EC enquanto campo de estudo, em que abordagens e métricas ainda se encontram em consolidação e apresentam significativa diversidade interpretativa.

Dentre os artigos que integram a EC e o SB, buscou-se identificar rotas de circularidade tecnicamente possíveis considerando os quatro eixos do SB. E posteriormente foi proposta uma forma de viabilizar a integração na gestão pública brasileira.

Análise e Discussão de Resultados

Papageorgiou et al., 2021, concluíram que não existe um índice único, padronizado e universal que contemple indicadores para municípios (indicadores macro de EC). Estes indicadores poderiam fornecer base de extração para indicadores de circularidade voltados ao SB. Tampouco foi encontrado na literatura um índice padrão e universal concentrando indicadores de EC para SB contemplando seus 4 eixos (abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas). No entanto, já existem indicadores diretos envolvendo eixo único ou relacionados a mais de um eixo.

No eixo de abastecimento de água potável, as rotas de circularidade identificadas na literatura, focam na minimização da dependência de fontes naturais, no fechamento do ciclo da água com foco na otimização de recursos e no planejamento estratégico da infraestrutura. Destacam-se os indicadores: redução do consumo de água potável, reuso de águas residuais para uso potável, eficiência de remoção de poluentes para a água potável, perda de água tratada (Kakwani; Kalbar, 2024; Smol et al., 2024).

Para o esgotamento sanitário, as estratégias baseiam-se na fonte contínua de novos recursos, no fechamento do ciclo da água com foco na otimização de recursos, nos nutrientes e energia na infraestrutura urbana. Destacam-se os indicadores: redução da geração de águas residuais, redução da geração de lodo, eficiência na redução de poluentes das águas residuais, volume de águas residuais convertido em água não potável, volume de águas residuais tratadas destinadas à irrigação, volume de águas residuais tratadas com tecnologias avançadas para uso potável, taxa de recuperação de matérias-primas biogênicas (como fósforo e nitrogênio), taxa de aproveitamento de biogênicos na produção de fertilizantes, taxa de energia recuperada na Estação de Tratamento de Efluentes, taxa de produção de biogás a partir da digestão do lodo (Kakwani; Kalbar, 2024; Smol et al., 2024; Rebello et al., 2025).

Quanto à limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, baseadas nos indicadores apresentados na literatura acadêmica, as rotas priorizam a minimização e prevenção na fonte, a extensão da vida útil de produtos e o fechamento do ciclo físico com foco na otimização de recursos. Destacam-se os indicadores: produção de resíduos municipais per capita, participação de aterros sanitários, recuperação de energia, taxas de reciclagem de resíduos, taxa de uso de material circular, taxa de resíduos orgânicos enviados para a compostagem, taxa de produtos reciclados e recicláveis em compras públicas (Sultanova et al., 2021; Jakubelskas e Skvarciany, 2022; Simková e Bednárová, 2022; Moraes et al., 2023).

As rotas de circularidade possíveis para o eixo de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas, baseadas nos indicadores apresentados na literatura acadêmica, focam na captação da água da chuva no próprio local, evitando sobrecarregar a rede convencional; na recuperação e no tratamento. Destacam-se os indicadores: taxa de captação de águas pluviais, taxa de recuperação de águas pluviais (Smol et al., 2024).

Como não há publicações que integrem todos os eixos do SB simultaneamente, foi constatado que o conceito de EC não está inserido no gerenciamento do SB e não há perspectivas práticas de aplicação na gestão pública brasileira. Além da falta de integração entre eixos, da falta de consenso referente aos indicadores abordando os mesmos eixos, na literatura proposta houve uma lacuna referente a falta de indicadores de drenagem e manejo de águas pluviais. Para o eixo de limpeza urbana e manejo de resíduos industriais há um maior consenso sobre os indicadores. E, na maioria dos artigos os eixos de abastecimento de água potável e esgotamento sanitário foram abordados de forma integrada (Sultanova et al., 2021; Jakubelskas e Skvarciany, 2022; Simková e Bednárová, 2022; Moraes et al., 2023; Smol et al., 2024; Kakwani; Kalbar, 2024; Rebello et al., 2025).

Como solução estratégica, propõe-se que a inclusão de indicadores de circularidade nos Planos de Saneamento Básico seja adotada como uma ferramenta fundamental de gestão pública para viabilizar essa transição no Brasil.

Considerações Finais

Constatou-se que a Economia Circular falha em atender às demandas específicas do Saneamento Básico, considerando os quatro eixos estabelecidos no Brasil e necessita-se da integração desta teoria, por meio de indicadores consolidados, que poderiam ser implementados nos Planos de Saneamento Básico. Mesmo com rotas de circularidade tecnicamente possíveis considerando os quatro eixos do Saneamento Básico e identificadas em estágio inicial, não há integração formal demonstrada pela literatura acadêmica entre EC e SB.

No entanto, a revisão de literatura narrativa por sua natureza flexível e exploratória mostrou-se adequada para captar a pluralidade, permitindo acompanhar a evolução das discussões e reunir uma variedade de propostas de indicadores.

Agradecimentos

Os autores expressam seu agradecimento à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) pelo apoio institucional e infraestrutura disponibilizada. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14031**: Gestão ambiental: avaliação de desempenho ambiental: diretrizes. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 59004**: Economia circular: terminologia, princípios e orientações para implementação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 59010**: Economia circular: orientações sobre a transição de modelos de negócios e redes de valor. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 59020**: Economia circular: mensuração e avaliação do desempenho de circularidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BORGES, Mayara Santana; MORAES, Luiz Roberto Santos. Participation and social control in the process of preparing Municipal Sanitation Plans based on Law No. 11,445/2007: a case study in three municipalities of Bahia-Brasil. **Revista Caribeña de Ciências Sociales**, Miami, v. 14, n. 3, p. 1-23, jan. 2025.

BRASIL. [Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007]. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Brasília, DF: Presidência da República, [2007]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 3 mai. 2026.

BRASIL. [Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020]. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico. Brasília, DF: Presidência da República, [2020]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 3 mai. 2026.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (EMF). **Uma Economia Circular no Brasil**: uma exploração inicial. 2017. Disponível em: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/publicacoes. Acesso em: 1 mai. 2026.

GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 11-32, fev. 2016.

IWASAKA, Fernanda Yumi. **Políticas públicas e Economia Circular**: levantamento internacional e avaliação da Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2018. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

JAKUBELSKAS, U.; SKVARCIANY, V. An Evaluation of Circular Economy Development in the Baltic States. **Folia Oeconomica Stetinensia**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 193–208, 2022.

KAKWANI, N. S.; KALBAR, P. P. Prioritization of strategies for urban water circular economy using water circularity indicator. **Water Policy**, [s. l.], v. 26, n. 5, p. 480-505, 2024.

KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marko. Conceptualizing the Circular Economy: an analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 221-232, dez. 2017.

KIRCHHERR, Julian. Circular economy and growth: A critical review of "post-growth" circularity and a plea for a circular economy that grows. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 179, abr. 2022.

MERLI, Roberto; PREZIOSI, Michele; ACAMPORA, Alessia. How do scholars approach the Circular Economy? A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 703-722, mar. 2018.

MORAES, F. T. F. et al. Transitioning towards a sustainable circular city: How to evaluate and improve urban solid waste management in Brazil. **Waste Management & Research**, [s. l.], v. 41, n. 5, p. 1046–1059, 2023.

MORAGA, Gustavo et al. Circular economy indicators: What do they measure? **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, n. 1, p. 452-461, jul. 2019.

NÚCLEO DE REDES DE SUPRIMENTOS (NURES). **Os benefícios da Economia Circular para os países em desenvolvimento e as economias emergentes**. 2016. Disponível em: https://learn.tearfund.org. Acesso em: 1 mai. 2026.

PAPAGEORGIOU, A.; FINNVEDEN, G.; DAVIDSSON, Å. Mapping and assessing indicator-based frameworks for monitoring circular economy development at the city-level. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 75, n. 103317, dez. 2021.

PARCHOMENKO, Alexej et al. Measuring the Circular Economy - a multiple correspondence analysis of 63 metrics. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 200-216, fev. 2019.

PRIETO-SANDOVAL, Vanessa; JACA, Carmen; ORMAZABAL, Marta. Towards a consensus on the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 179, p. 605-615, abr. 2018.

REBELLO, T. A. et al. Integrating the circular economy concept with one water approach to enhance sustainability in urban water systems: identification, selection, and ranking of key sustainability indicators. **Clean Technologies and Environmental Policy**, [s. l.], v. 27, p. 5183–5206, 2025.

RIBEIRO, Douglas Matheus de Avellar et al. Infraestrutura verde e saneamento básico: paralelos, benefícios e o potencial de implementação por meio dos Planos Municipais. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 13, n. 1, p. 1-45, jan. 2024.

SAIDANI, Michael et al. A taxonomy of Circular Economy indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 207, p. 542-559, jan. 2019.

ŠIMKOVÁ, Z.; BEDNÁROVÁ, L. Municipal waste in Slovakia as a potential for the circular economy. **Modern Management Review**, [s. l.], v. 27, n. 3, p. 59-68, 2022.

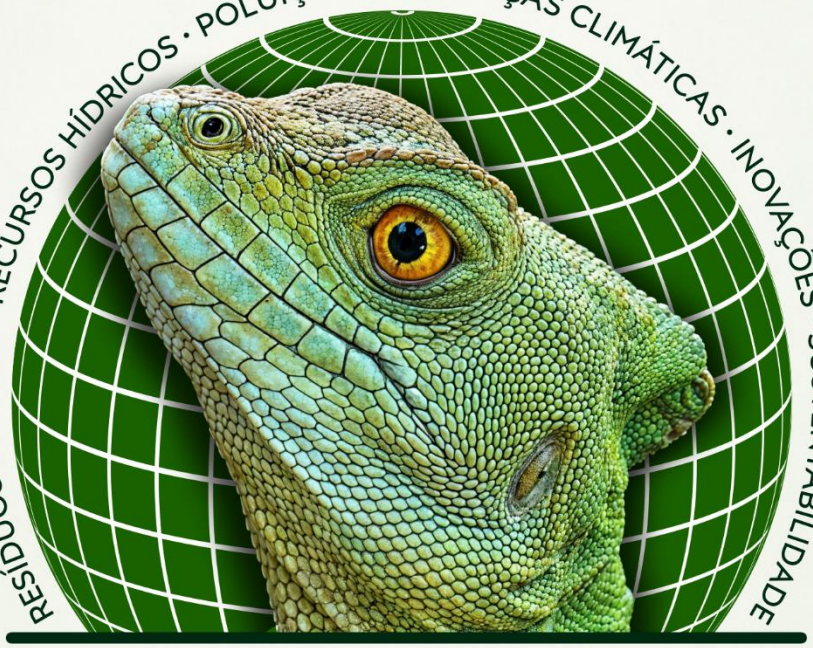
SMOL, M. et al. Environmental Indicators for Assessment of Circular Economy (CE) Implementation in the Water and Wastewater Sector. **Business Strategy and the Environment**, [s. l.], 2024.

SOUSA, Verônica Conceição et al. Avaliação de planos municipais de saneamento básico da região de integração Rio Capim, PA. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, p. 1-15, mar. 2021.

SULTANOVA, D.; MALIASHOVA, A.; GADELSHINA, S. Waste management as an element of sustainable development of the circular economy in the European Union. **E3S Web of Conferences**, [s. l.], v. 247, n. 01007, 2021.

ÁREA TEMÁTICA 7

EDUCAÇÃO AMBIENTAL



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

EDUCAÇÃO AMBIENTAL POR MEIO DA GAMIFICAÇÃO, UMA EXPERIÊNCIA LÚDICA NO MUNICÍPIO DE LUÍS EDUARDO MAGALHÃES - BA

1 Luiz Felipe Almeida dos Santos, 2 Deysianne Cristina Santos Duarte, 3 Luiz Leal Pereira, 4 José Roberto dos Santos Batista, 5 Camila Oliveira Vieira, 6 Ludgero Rêgo Barros Neto, 7 Douglas Ferreira, 8 Armando Dias Duarte

1 Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB-CMLEM), e-mail: luiz.s1431@ufob.edu.br; 2 Prefeitura Municipal de Luís Eduardo Magalhães, e-mail: Deysianne.cristina@gmail.com; 3 Prefeitura Municipal de Luís Eduardo Magalhães, e-mail: luizleal.38pereira@gmail.com;4 Prefeitura Municipal de Luís Eduardo Magalhães, e-mail: trabalhorobertosantos2lem@gmail.com;5Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB-CMLEM), e-mail: camila.vieira@ufob.edu.br;6 Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB-CMLEM), e-mail: lrbneto@ufob.edu.br;7 Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB-CMLEM), e-mail: douglas.ferreira@ufob.edu.br; 8 Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB-CMLEM), e-mail: adduarte@ufob.edu.br

Palavras-chave: Gamificação; Educação; Meio ambiente.

Introdução

No contexto brasileiro, a Educação Ambiental (EA) no ensino fundamental, tornou-se um dos temas transversais conforme a Política Nacional de Educação Ambiental lei de n° 9.795/1999 além de constar na Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para a formação de crianças e adolescentes críticos em relação às transformações que o planeta e o Meio Ambiente enfrentam, sobre questões hídricas e ecológicas e a intensidade que os problemas vêm sendo cada vez mais preocupante para a sociedade.

Discutir sobre problemas ambientais como: poluição, mudanças climáticas, esgotamento de recursos naturais e perda de biodiversidade. É importante começar na infância, para que a criança sinta parte daquele meio e passe a criar uma consciência sobre o cuidado com os outros e com a natureza.

Ensinar práticas sustentáveis nas escolas (Moura; Fernandes, 2025). Além de constituir uma responsabilidade inerente a cada ser humano, a EA encontra respaldo em acordos internacionais, nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e na legislação nacional.

Esse marcos dialoga diretamente com as Diretrizes Curriculares Nacionais para a Educação Ambiental, integrando-a ao currículo escolar como um tema transversal e incentivando professores de escolas públicas e privadas a promoverem a consciência ecológica desde os anos iniciais da formação educacional(Brasil, 2012).No entanto, não se trata de uma tarefa fácil colocar em prática todo esse conhecimento, especialmente quando são utilizados métodos tradicionais, como aulas expositivas que parecem distantes da realidade das crianças do século XXI.

Por isso, um grande desafio é manter os(as)estudantes interessados(as) em temas transversais como o meio ambiente, já que eles estão cada vez mais complexos e exigem do ensino tradicional medidas eficazes para não se tornarem abstratos ou desconectados do cotidiano. A divisão rígida entre disciplinas no currículo pode dificultar que as crianças vejam o "todo" das questões ambientais, o que atrapalha o desenvolvimento de habilidades importantes, como pensar criticamente e tomar decisões responsáveis pelo meio ambiente (Pereira *et al*., 2025).

O que torna o processo de ensino e aprendizagem repleto de desafios. É nesse cenário que as estratégias pedagógicas ativas ganham importância e passam a fazer sentido para as crianças e adolescentes do ensino fundamental.

Usar métodos como projetos que envolvem várias disciplinas, resolução de problemas reais e atividades lúdicas ajuda os alunos a construírem o conhecimento de forma participativa, e aqui surge a gamificação, que se utilizada de elementos de jogos, como desafios, histórias e recompensas, em aulas comuns, como uma ferramenta poderosa para tornar a EA mais envolvente, atrativa e eficaz (Pereira *et al*., 2025; Moura; Fernandes, 2025).

Essa proposta leva o estudante a várias possibilidades: imagine transformar uma aula sobre reciclagem usando a metodologia gamificação, com criação de jogos interativos que permite as crianças acumulem pontos, resolver enigmas ambientais e trabalhem em equipe para "salvar" o Meio Ambiente. Essa é a realidade dos projetos que envolvem a gamificação como método de ensino de EA. Estudos mostram que isso não só aumenta o interesse dos alunos pelos temas, mas também ajuda a fixar hábitos sustentáveis e atitudes positivas em relação à natureza (Ricoy; Sánchez-Martínez, 2022; Pereira *et al*., 2025). Tudo isso através de jogos educativos, simulações ou atividades temáticas, onde as crianças e adolescentes vivenciam situações reais, refletem sobre problemas ambientais e aprendem a colaborar para encontrar soluções para problemas reais.

Portanto, ao enfrentar os desafios atuais na educação ambiental do ensino fundamental brasileiro, a gamificação se destaca como uma abordagem ativa e adaptada à realidade das crianças e adolescentes. Ela pode tornar o currículo escolar mais divertido e próximo, incentivando os alunos a adotarem práticas que impactem positivamente o mundo ao seu redor. Como professores, ao incorporar esses elementos lúdicos, podemos ajudar a formar cidadãos que não só entendam, mas também atuem pela sustentabilidade no dia a dia.

Assim, o presente trabalho, demonstra a aplicação do projeto Gamificação à luz das ODS, na Rede Municipal de Educação de Luís Eduardo Magalhães-BA, realizado em 2025, envolvendo a participação de 146 estudantes do ensino fundamental I, nas turmas dos 3º anos, por meio das práticas da gamificação durante o processo de ensino-aprendizagem.

Material e Métodos

Para fundamentar a natureza deste trabalho, foi realizada uma pesquisa aplicada, conforme definido por Gil (2022). Esta abordagem é caracterizada pela obtenção de conhecimento por meio da aplicação prática em um contexto específico, voltada à solução de problemas ou à geração de resultados imediatos. O trabalho estrutura-se em etapas (Figura 1) que integram o levantamento teórico à intervenção prática na escola municipal Aldori Luiz Tolazzi, localizada no município de Luís Eduardo Magalhães-BA, nas turmas do terceiro ano do ensino fundamental. A escola foi escolhida por estar próxima ao Centro Multidisciplinar de Luís Eduardo Magalhães (CMLEM) e também inserida em um bairro de vulnerabilidade social, o que contribuiu para o primeiro contato e para a consolidação de um vínculo institucional com a referida unidade de ensino. No ano de 2023, o município registrou um Índice de Desenvolvimento da Educação Básica (IDEB) de 4,8, resultando na 33° posição no estado da Bahia (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2025).

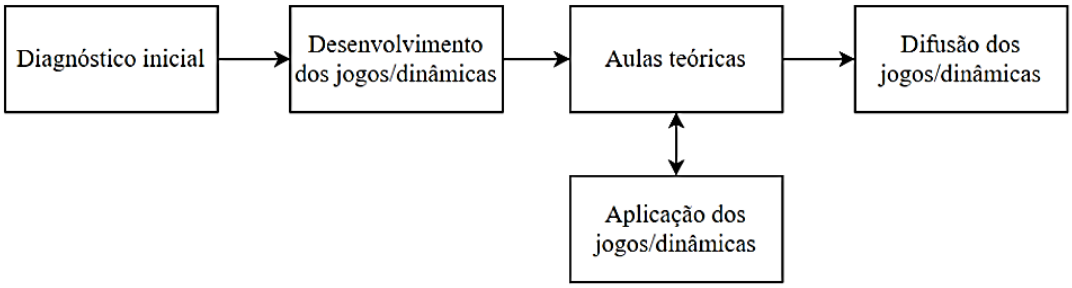


Figura 01: Metodologia do projeto.
Fonte: Autores (2026)

Foram realizadas visitas presenciais à escola e reuniões com a direção acadêmica, nas quais o projeto foi apresentado e discutido. Após a análise, a proposta foi aprovada pela gestão escolar, viabilizando a condução do diagnóstico inicial.

A partir desse diagnóstico inicial, os protótipos dos jogos/dinâmicas foram planejados e desenvolvidos de forma que, contemplassem: definição dos objetivos pedagógicos (ODS e competências a mobilizar), elaboração de regras e mecânicas, seleção de materiais, estimativa do tempo de aplicação e estabelecimento de critérios para verificação da aprendizagem.

Concluída a fase de desenvolvimento, foram ministradas aulas teóricas expositivas, em articulação com os conteúdos trabalhados pelas professoras participantes do projeto, seguidas da aplicação prática dos jogos e dinâmicas. Essa etapa teve como finalidade consolidar a aprendizagem e favorecer a compreensão dos temas abordados.

Ao término de cada aplicação, foram coletados *feedbacks* dos(as) estudantes e professoras para avaliar a clareza das regras, o nível de engajamento, a adequação do grau de dificuldade, o tempo de execução e a contribuição das atividades para a compreensão dos ODS. Com base nesses registros, foram realizados ajustes nos protótipos (mecânica, linguagem, materiais e instruções), buscando ampliar a efetividade pedagógica.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos evidenciam que a criação e aplicação dos jogos educativos contribuíram de forma significativa para a compreensão dos ODS e também, para o engajamento dos(as) estudantes nas atividades propostas. No contexto do ODS 1 (Erradicação da Pobreza), o jogo Corrente do Bem promoveu reflexões sobre solidariedade, cooperação e redução das desigualdades, estimulando atitudes coletivas voltadas ao apoio mútuo e à empatia (Figura 2).



Figura 2: Exemplos das atividades desenvolvidas na escola.
Fonte: Autores (2026)

Em relação ao ODS 4 (Educação de Qualidade), o jogo Direito de todas as crianças à escola, possibilitou o debate sobre o acesso universal à educação, reforçando a importância da escola como espaço de formação cidadã e de garantia de direitos. O Caça ao Tesouro destacou-se como uma estratégia lúdica e integradora, favorecendo o trabalho em equipe, o raciocínio lógico e a resolução de problemas, ao mesmo tempo em que articulou conteúdos relacionados aos ODS. Por sua vez, o Jogo do Bem-Estar contribuiu para o desenvolvimento de aspectos socioemocionais, abordando temas ligados à saúde, ao autocuidado e à convivência social. De maneira geral, as atividades gamificadas mostraram-se eficazes para promover aprendizagem ativa, e uma maior participação dos (as) estudantes e assimilação dos princípios de sustentabilidade e cidadania por meio dos ODS (Nações Unidas no Brasil, 2025).

Considerações Finais

A gamificação surge como uma ferramenta para auxiliar na modernização da Educação Ambiental no ensino fundamental brasileiro, adaptando-a à realidade das novas gerações. Ao tornar o currículo mais divertido e relevante, essa abordagem contribui para a formação de cidadãos que não apenas compreendem a importância da sustentabilidade, mas também, para atuarem ativamente como agentes de mudança no contexto global.

Agradecimentos

Os(As) Autores(as) agradecem a Pró-Reitoria de Extensão e Cultura (PROEC) da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), a prefeitura Municipal de Luiz Eduardo Magalhães (Secretarias de Meio Ambiente e Educação) e a Escola municipal Aldori Tollazi.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Resolução CNE/CP nº 2, de 2012. Estabelece as Diretrizes Curriculares Nacionais para a Educação Ambiental. Diário Oficial da União, Brasília, 2012.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ba/luis-eduardo-magalhaes/historico. Acesso em 04fevereiro de 2025, 2025.

GIL, A. C. Como Elaborar Projetos de Pesquisa. 7 ed. São Paulo: GEN Atlas, 2022.

MOURA, M. J. B. S.; FERNANDES, F. G. Gamificação na educação ambiental: estratégias ativas para a conservação da natureza no ensino fundamental. RealizAção, v. 12, n. 23, 2025. DOI: https://doi.org/10.30612/realizacao.v12i23.20135.

Nações Unidas no Brasil. “Objetivos de Desenvolvimento Sustentável”, Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs, Acessado: 06 fevereiro de 2025. 2025.

PEREIRA, C. P. C. et al. Ensino das relações ecológicas com o uso da gamificação. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), v. 20, n. 2, p. 419–435, 2025. DOI: 10.34024/revbea.2025.v20.19786.

IMPLANTAÇÃO DE COMPOSTEIRAS DOMÉSTICAS COMO ESTRATÉGIA DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL: DESAFIOS OPERACIONAIS E PERCEPÇÃO DOS USUÁRIOS EM MATUPÁ

Eduardo A. A. Silva, Rodrigo Barbosa Craidy, Lilian Christian Domingues de Souza, Emanuele Helmann Nunes, Andrey Rosa Alleim, Cleoane Moura Ferreira

Prefeitura de Matupá, e-mail: eng.sanitarista@matupa.mt.gov.br; Prefeitura de Matupá, e-mail: eng.agronomo@matupa.mt.gov.br; Escola Técnica Estadual de Educação Profissional e Tecnológica de Matupá e-mail: liliansouza@secitec.mt.gov.br; Escola Técnica Estadual de Educação Profissional e Tecnológica de Matupá e-mail: manu.helmann@hotmail.com; Escola Técnica Estadual de Educação Profissional e Tecnológica de Matupá e-mail: e2444274@edu.mt.gov.br; Escola Técnica Estadual de Educação Profissional e Tecnológica de Matupá e-mail: cleoanemouraferreira@gmail.com

Palavras-chave: Compostagem doméstica; Gestão de resíduos; Educação ambiental.

Introdução

A gestão dos resíduos sólidos urbanos ainda apresenta significativa assimetria entre coleta e tratamento adequado no Brasil. Dados do Sistema Nacional de Informações em Saneamento indicam que a coleta atende 92,63% da população, enquanto apenas 29,02% dos municípios possuem algum tipo de coleta seletiva. A geração média nacional é de 1,14 kg habitante^{-1} dia^{-1}, sendo aproximadamente 45% composta por matéria orgânica, porém somente cerca de 2,7% dessa fração recebe tratamento adequado.

A destinação predominante em aterros sanitários ou áreas inadequadas favorece a degradação anaeróbia da matéria orgânica e a formação de líquidos percolados (chorume), capazes de infiltrar no solo e promover alterações físico-químicas e contaminação ambiental (ALCÂNTARA, 2010). Nesse contexto, a redução da fração orgânica encaminhada ao sistema público de manejo torna-se etapa estratégica para a melhoria do gerenciamento de resíduos.

A compostagem doméstica apresenta-se como alternativa técnica de tratamento na fonte, porém sua efetividade depende diretamente do manejo adequado pelos usuários. Na prática, dificuldades operacionais, presença de presença de insetos e larvas associadas ao processo e descontinuidade do uso frequentemente comprometem sua adoção. Assim, a educação ambiental aplicada, associada ao acompanhamento técnico contínuo, surge como ferramenta potencial para promover autonomia e manutenção do processo. (Fontes et al., 2021)

Assim, viabilizou-se este trabalho para levar a comunidade a aprender a conduzir sistemas de compostagem caseiros, de fácil manuseio, para que aprendam sobre a importância da reciclagem de compostos orgânicos e seus benefícios econômicos, sociais e ambientais, levando a sensibilização da comunidade sobre o conhecimento adquirido, praticando e semeando atos de sustentabilidade.

Apesar da ampla abordagem teórica sobre compostagem e educação ambiental, ainda são limitados os estudos que avaliam a implantação assistida de composteiras em condições reais de uso doméstico, considerando as dificuldades práticas enfrentadas pelos participantes ao longo do tempo.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a implantação assistida de composteiras domésticas como ferramenta de educação ambiental aplicada, analisando a adesão dos participantes, as principais dificuldades operacionais encontradas durante o manejo, a ocorrência de presença de insetos e larvas associadas ao processo, o tempo de maturação do composto e a percepção ambiental dos educandos após acompanhamento técnico contínuo.

Material e Métodos

O estudo foi conduzido no município de Matupá – MT, com estudantes do ensino médio integrado ao curso técnico em agricultura de uma instituição pública de ensino, por meio da implantação assistida de composteiras domésticas como prática de educação ambiental aplicada.

Antes do início das atividades foi realizado encontro presencial para orientação inicial dos participantes, abordando funcionamento do sistema, separação dos resíduos, uso do material estruturante e manejo básico da composteira. Nessa etapa ocorreu a entrega dos kits e padronização das instruções operacionais. O kit constou de 3 caixas empilháveis, sendo 2 digestoras e 1 coletora de líquidos, sendo 1 Torneira na caixa coletora de líquidos. A Figura 1 ilustra o momento de entrega das composteiras, caracterizando o início da fase operacional do projeto.



Figura 1: Entrega das composteiras domésticas aos participantes do projeto.
Fonte: Autor (2025).

Foram disponibilizados kits de compostagem doméstica fornecidos pela prefeitura municipal, compostos por caixas plásticas empilháveis e material estruturante (pó de serra). Inicialmente participaram 20 alunos, sendo considerados participantes ativos aqueles que mantiveram o processo ao longo do acompanhamento, totalizando nove unidades monitoradas.

A condução do processo ocorreu nas residências dos participantes, onde eram depositados resíduos orgânicos gerados no domicílio. O manejo foi realizado pelos próprios alunos, incluindo alimentação da composteira, cobertura com material seco e revolvimento periódico. O acompanhamento técnico foi realizado semanalmente por meio de grupo de comunicação digital, utilizado para orientações operacionais, esclarecimento de dúvidas e registro fotográfico das unidades.

Durante o desenvolvimento do projeto foram aplicados formulários periódicos para registro de frequência de alimentação, ocorrência de presença de insetos e larvas associadas ao processo, dificuldades operacionais e tempo de maturação do material. Ao final do acompanhamento, com duração média de quatro meses, os participantes elaboraram um relatório descritivo resumido relatando aprendizados e dificuldades enfrentadas durante a prática. Os participantes também utilizaram o chorume da caixa coletora, diluindo 1 litro do chorume em 10 litros de água e pulverizando as plantas. E o adubo orgânico foi utilizado em plantas ornamentais e hortaliças condimentares.

Os dados foram analisados de forma descritiva, considerando frequência de ocorrências, registros fotográficos e relatos obtidos ao longo do desenvolvimento da atividade.

Resultados e Discussão

O projeto iniciou com 20 participantes, porém apenas nove mantiveram a composteira ativa durante todo o período de acompanhamento, correspondendo a uma permanência de 45%. A desistência parcial indica que a adoção da compostagem doméstica não depende exclusivamente da disponibilização do equipamento, mas principalmente da adaptação do usuário à rotina de manejo.

A taxa de permanência observada indica que a adoção da compostagem doméstica envolve desafios relacionados à mudança de hábitos e à adaptação ao manejo biológico do processo. Esse resultado sugere que programas de incentivo à compostagem domiciliar devem incluir estratégias contínuas de orientação técnica e acompanhamento dos participantes, de forma a reduzir dificuldades operacionais e aumentar a adesão ao longo do tempo.

Durante o acompanhamento observou-se que as principais dificuldades relatadas estiveram associadas à presença de presença de insetos e larvas associadas ao processo, controle da umidade e frequência de revolvimento do material. Tais fatores exigem mudança de hábito doméstico e acompanhamento contínuo, o que explica a redução do número de participantes ao longo do tempo. A permanência dos nove participantes ativos esteve relacionada ao suporte técnico semanal realizado por meio de comunicação digital, que permitiu intervenções rápidas diante de problemas operacionais. Esse resultado sugere que a assistência contínua exerce papel determinante na manutenção da prática, reduzindo a percepção de complexidade do processo.

Dessa forma, os resultados indicam que iniciativas baseadas exclusivamente na distribuição de composteiras podem apresentar dificuldades de continuidade quando não acompanhadas por orientação técnica. Por outro lado, modelos que incorporam acompanhamento sistemático tendem a apresentar maior taxa de permanência, caracterizando a educação ambiental aplicada como elemento relevante para a consolidação do tratamento domiciliar da fração orgânica.

Durante o acompanhamento, a ocorrência de presença de insetos e larvas associadas ao processo foi a principal dificuldade relatada pelos participantes, destacando-se a presença de larvas e pequenos insetos associados ao excesso de umidade e à insuficiência de material estruturante. Observou-se que a adição de resíduos com alta carga hídrica, sem cobertura adequada com material seco, favoreceu a compactação do substrato e a redução da aeração, criando condições propícias à decomposição anaeróbia.

Nessas situações, o processo passou a apresentar odor mais intenso e maior incidência de organismos oportunistas, levando alguns participantes a interromper temporariamente ou reiniciar a compostagem. Entretanto, após orientações corretivas — aumento da proporção de material seco e revolvimento mais frequente — verificou-se estabilização do material e redução gradual dos presença de insetos e larvas associadas ao processo, sem necessidade de descarte do conteúdo.

O tempo médio de maturação observado foi influenciado diretamente pelas condições de manejo. Unidades que mantiveram alimentação fracionada, cobertura adequada e revolvimento periódico apresentaram decomposição mais homogênea e menor ocorrência de problemas. Por outro lado, composteiras com alimentação irregular ou excesso de resíduos úmidos demandaram maior tempo de estabilização.

Os registros demonstram que a maioria das dificuldades esteve relacionada à interpretação prática do equilíbrio entre umidade, aeração e relação carbono-nitrogênio, indicando que o desafio principal não foi o funcionamento do sistema, mas a adaptação do usuário ao manejo biológico do processo. Dessa forma, a intervenção técnica contínua mostrou-se essencial para transformar falhas operacionais em aprendizado prático, reforçando o caráter educativo da atividade.

Tabela 01: Síntese das observações relatadas pelos participantes durante o processo de compostagem doméstica.

Indicador observado no processo	Evidência nos relatórios
Formação de umidade nos primeiros dias	observada por vários participantes
Escurecimento gradual dos resíduos	relatado durante o processo de decomposição
Redução de volume da matéria orgânica	percebida após algumas semanas
Presença de mofo na fase inicial	registrada em alguns relatos
Formação de líquido (chorume)	mencionada em diversos relatos
Presença de larvas de mosca	dificuldade recorrente relatada
Uso de folhas secas e serragem	estratégia comum para controle de umidade e presença de insetos e larvas associadas ao processo
Revolvimento/aeração do material	prática adotada para melhorar a decomposição
Aprendizagem por tentativa e erro	alunos relatam ajustes no manejo
Percepção ambiental positiva	todos destacam redução do lixo e benefício ambiental

Fonte: Autor (2025).

Esses registros evidenciam que o processo de compostagem foi acompanhado de forma empírica pelos participantes, permitindo a observação de fenômenos típicos da decomposição da matéria orgânica e a adaptação progressiva do manejo.

Os resultados observados indicam que a prática da compostagem doméstica contribuiu para o desenvolvimento da percepção ambiental dos participantes, evidenciada pelos relatos sobre redução de resíduos e valorização do reaproveitamento da matéria orgânica. Resultados semelhantes foram observados por Fontes et al. (2021), que ao desenvolverem atividades de compostagem em ambiente escolar verificaram que essa prática favorece a sensibilização ambiental dos estudantes e estimula mudanças de comportamento relacionadas à gestão de resíduos orgânicos.

De forma semelhante, Marques et al (2017). destacam que a compostagem pode atuar como ferramenta pedagógica capaz de estimular reflexão crítica e participação ativa dos estudantes em questões ambientais. Entretanto, diferentemente do estudo conduzido por esses autores, no qual a atividade foi desenvolvida em ambiente escolar, o presente trabalho envolveu a implementação da compostagem no ambiente doméstico dos participantes. Essa abordagem ampliou os desafios da prática, uma vez que o manejo passou a depender da rotina familiar e da adaptação dos usuários às exigências operacionais do processo.

A experiência também permitiu aos participantes contato direto com problemas ambientais cotidianos, transformando a aprendizagem em uma prática associada à gestão de resíduos orgânicos. Resultados semelhantes foram relatados por Pascoal et al. (2018), que destacam a importância de atividades práticas para promover a compreensão das questões ambientais e estimular o envolvimento dos estudantes com a temática.

Nesse contexto, Lima et al. (2016) ressaltam que a prática da compostagem deve ser incentivada não apenas no ambiente escolar, mas também no contexto comunitário. O presente estudo contribui para essa perspectiva ao avaliar a aplicação da compostagem diretamente no ambiente doméstico dos participantes, demonstrando que a atividade pode extrapolar o espaço escolar e contribuir para mudanças de comportamento relacionadas à gestão de resíduos orgânicos no cotidiano familiar.

Considerações Finais

Mesmo com a redução do número inicial de participantes, os resultados obtidos com as unidades que permaneceram ativas permitiram avaliar o funcionamento do sistema e identificar os principais desafios operacionais associados à compostagem doméstica.

Os resultados obtidos demonstram que a compostagem doméstica apresenta potencial como ferramenta de educação ambiental e de estímulo à gestão adequada da fração orgânica dos resíduos sólidos. A experiência evidenciou que a simples disponibilização de composteiras não garante a continuidade da prática, uma vez que a adoção do sistema requer acompanhamento sistemático e a adaptação dos participantes às rotinas de manejo, como controle da umidade, uso de material estruturante e revolvimento do substrato. A taxa de permanência observada ao longo do acompanhamento indica que dificuldades operacionais podem influenciar a continuidade da atividade, especialmente quando os participantes ainda estão em processo de aprendizagem sobre o funcionamento biológico da compostagem. Nesse contexto, o suporte técnico periódico mostrou-se um fator relevante para auxiliar na resolução de problemas e para a manutenção do processo nas unidades ativas.

Além dos aspectos operacionais, a prática proporcionou aos participantes maior percepção sobre a geração de resíduos orgânicos e suas possibilidades de reaproveitamento. Assim, a compostagem doméstica mostrou-se uma estratégia que, quando associada à orientação técnica e ao acompanhamento educativo, pode contribuir para a redução de resíduos enviados à coleta convencional e para o fortalecimento de práticas ambientais no cotidiano doméstico.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Prefeitura Municipal de Matupá e a Escola Técnica Estadual de Educação Profissional e Tecnológica de Matupá de pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ALCÂNTARA, Arleme Janissara de Oliveira. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos e caracterização química do solo da área de disposição final do município de Cáceres-MT. 2010. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade do Estado de Mato Grosso, Cáceres, 2010. Disponível em: https://www.saude.mt.gov.br/storage/old/files/composicao-gravimetrica-dos-residuos-solidos-urbanos-e-caracterizacao-quimica-do-solo-da-area-de-disposicao-final-do-municipio-de--[104-041011-SES-MT].pdf
. Acesso em: 15 fev. 2026.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Relatório dos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos – SINISA 2025: ano de referência 2024. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa/resultados-sinisa/RELATORIO_SINISA_RESIDUOS_SOLIDOS_2025.pdf
. Acesso em: 02 fev. 2026.

FONTES, Karen Dayana de Souza Andrade et al. A compostagem como instrumento de educação ambiental em escolas do Município de João Monlevade – MG. Research, Society and Development, v. 10, n. 10, e410101018863, 2021. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v10i10.18863.

LIMA, G. A. A. de; DIAS, C. A. C.; LIMA, A. H. Compostagem de resíduos sólidos orgânicos como tema incentivador de educação ambiental. Scientia Plena, v. 12, n. 6, p. 069933, 2016. DOI: https://doi.org/10.14808/sci.plena.2016.069933.

MARQUES, Ronualdo et al. Compostagem como ferramenta de aprendizagem para promover a educação ambiental no ensino de ciências. In: FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 8., 2017, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: UTFPR, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/330093084
. Acesso em: 17 fev. 2026.

PASCOAL, Clayton Rosa et al. Compostagem e educação ambiental: implantação de projeto em uma escola estadual de Marzagão (GO). Espaço em Revista, v. 20, n. 2, p. 98–116, jul./dez. 2018.

EDUCAÇÃO AMBIENTAL POR MEIO DE PROJETO INTERDISCIPLINAR: DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA O ENSINO FUNDAMENTAL

Marilda Mendes Loureiro Pinto, Andreza Gomes Weil, Paloma Duarte Ferreira

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos (PPGCTRA), Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Programa de Pós-Graduação Latus-Sendo em Educação Museal e Técnicas de Aprendizagens, Universidade do Estado do Amazonas (UEA)Presidente Figueiredo – AM; e-mail: mendesmarilda2015@gmail.com; e-mail: andrezaweil@ufam.edu.br ; e-mail: palloma.tga20@gmail.com;

Palavras-chave: Educação Ambiental; Interdisciplinaridade; Ensino Fundamental.

Introdução

O município de Presidente Figueiredo, situado a 107 km de Manaus (AM), é internacionalmente reconhecido como a "Terra das Cachoeiras" por ser rico em atrativos naturais, possuindo até o ano de 2023, mais de 150 atrativos catálogados e estimasse existir mais de 100 atrativos ainda não catalogados. No entanto, esse patrimônio ambiental enfrenta ameaças crescentes: dados do Monitor do Fogo do MapBiomas indicam que, em 2022, o fogo consumiu aproximadamente 2,8 milhões de hectares no Brasil – quase o dobro da área queimada em 2021 (cerca de 1,4 milhão de hectares). O registro do dia 3 de julho de 2023 como o mais quente já documentado, segundo os Centros Nacionais de Previsão Ambiental dos EUA, reforça o alerta do secretário-geral da ONU, António Guterres, de que já ultrapassamos o "aquecimento global" e vivemos uma era de "ebulição global".

Diante desse cenário, a Educação Ambiental (EA) se apresenta como ferramenta indispensável para a formação de cidadãos conscientes e protagonistas de mudanças. A escola – por meio de seu currículo e Projeto Político-Pedagógico, constitui o espaço privilegiado para o desenvolvimento de práticas interdisciplinares que entrecruzem saberes das diferentes áreas do conhecimento (Ciências Naturais, Língua Portuguesa, Geografia, Artes, entre outras), potencializando o engajamento dos estudantes do Ensino Fundamental I na temática socioambiental (Ferreira, 2010). Contudo, muitos currículos ainda operam de forma fragmentada, tratando a Educação Ambiental de maneira apenas transversal, gerando lacunas entre teoria e prática que limitam a capacidade dos alunos de compreender e enfrentar os desafios ambientais contemporâneos.



Figura 01: Monumento Povos Originários localizado no Parque Municipal Corredeira do Urubuí, dentro da APA Urubuí em Presidente Figueiredo - AM.
Fonte: Ferreira, P. D. (2025)

Material e Métodos

A pesquisa será desenvolvida com abordagem qualitativa, conforme os pressupostos de Bogdan e Biklen (2003) e Godoy (1995), adotando a pesquisa-ação como método participativo (Thiollent, 2009). O estudo utilizará, ainda, pesquisa documental (Projetos Políticos-Pedagógicos das escolas) e bibliográfica, com base em dissertações, teses e artigos científicos disponíveis na literatura especializada.

Os lócus da pesquisa serão compostos por três escolas municipais de Ensino Fundamental de Presidente Figueiredo/AM. Os participantes serão 40 professores que ministram aulas para o Ensino Fundamental I, além de 3 pedagogos atuantes no mesmo segmento. Para a coleta de dados, serão aplicados: (1) um questionário inicial de sondagem; (2) um questionário final de avaliação; e (3) uma entrevista semiestruturada com os pedagogos. Todas as etapas serão realizadas após aprovação pelo Comitê de Ética em Pesquisa (CEP/CONEP).

Como produto central da pesquisa, será desenvolvida e implementada uma oficina participante e interdisciplinar de produção textual em forma de cordel, a partir de imagens relacionadas a secas, enchentes, desmatamento e focos de incêndio, seguindo os pressupostos de Lück (2003). A análise dos dados será realizada por meio da pesquisa descritiva (Gil, 1999).

Resultados e Discussão

Por se tratar de uma pesquisa em andamento, os resultados apresentados nesta seção são preliminares e de natureza teórica. O levantamento bibliográfico realizado até o momento evidencia que a implementação de projetos interdisciplinares de Educação Ambiental no Ensino Fundamental encontra-se diretamente condicionada à formação dos professores, à estrutura curricular das escolas e ao apoio pedagógico disponível (Hernandez, 1998; Fazenda, 2001; Morin, 2007).

Com base em Paulo Freire (2000), compreende-se que a Educação Ambiental deve constituir um processo de conscientização, em que educador e educando se engajam em diálogo transformador e comprometido com a realidade local. Edgar Morin (2007) reforça que a crise ambiental não pode ser dissociada de questões sociais, econômicas e culturais, o que exige uma abordagem holística e interdisciplinar. Nesse sentido, espera-se que a pesquisa revele tanto os obstáculos institucionais, formativos e culturais enfrentados pelos professores, quanto as potencialidades dos projetos interdisciplinares para promover o engajamento dos alunos e transformar a forma como a Educação Ambiental é vivenciada nas escolas do município.

A proposta está sustentada pelo tripé econômico, social e ambiental: na dimensão social, buscará promover solidariedade e cidadania; na ambiental, cultivará práticas sustentáveis e respeito à natureza; e, na econômica, desenvolverá habilidades voltadas a soluções inovadoras que beneficiem tanto o meio ambiente quanto a economia local (Weil, 2014). Reigota (2009) ressalta que a Educação Ambiental, na escola ou fora dela, continuará sendo tema de relevância, pela herança histórica e ecológica que exige alternativas educacionais justas e críticas.

Considerações Finais

A presente pesquisa, ainda em fase inicial, aponta para a necessidade urgente de se repensar as práticas pedagógicas voltadas à Educação Ambiental no contexto do Ensino Fundamental, especialmente em municípios amazônicos como Presidente Figueiredo/AM, diretamente impactados pela degradação ambiental.

Espera-se que a implementação do projeto interdisciplinar proposto contribua para a identificação dos desafios enfrentados pelos educadores, para o desenvolvimento de metodologias ativas e inovadoras de Educação Ambiental, e para a mensuração do impacto dessas práticas na conscientização dos alunos em relação à sustentabilidade e à preservação ambiental. A oficina de produção de cordel, em especial, deverá funcionar como estratégia de sensibilização coletiva, integrando linguagem, criatividade e engajamento ambiental de forma lúdica e significativa.

Os resultados finais da pesquisa, previstos para 2026, deverão fornecer subsídios concretos para a reformulação de currículos escolares e para a capacitação de professores, contribuindo para que a Educação Ambiental deixe de ser tratada apenas como tema transversal e passe a ocupar lugar central no processo formativo das novas gerações, em consonância com os princípios de interdisciplinaridade e desenvolvimento sustentável defendidos por Freire (2000), Morin (2007), Fazenda (2001) e Weil (2014).

Referências Bibliográficas

BOGDAN, R.; BIKLEN, S. K. Investigação qualitativa em educação: uma introdução à teoria e aos métodos. Porto: Porto Editora, 2003.

FAZENDA, I. C. Interdisciplinaridade: história, teoria e pesquisa. Campinas: Papirus, 2001.

FERREIRA, E. Educação Ambiental e desenvolvimento de práticas pedagógicas sob um olhar da ciência química. Dissertação (Mestrado). São Paulo: UNISAL, 2010.

FREIRE, P. Pedagogia da Indignação: cartas pedagógicas e outros escritos. São Paulo: UNESP, 2000.

FREITAS, A. L. S. de. Pedagogia da conscientização: um legado de Paulo Freire à formação de professores. Porto Alegre: EdiPUCRS, 2001.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 4. ed. São Paulo: Atlas, 1994.

GODOY, A. S. Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. RAE – Revista de Administração de Empresas, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 57-63, 1995.

HERNANDEZ, F. Transgressão e Mudança na Educação: Os Projetos de Trabalho. Porto Alegre: Artes Médicas Sul, 1998.

HERNANDEZ, F.; VENTURA, M. Os projetos de trabalho: uma forma de organizar os conhecimentos escolares. Porto Alegre: Artes Médicas, 1994.

JAPIASSU, H. Interdisciplinaridade e patologia do saber. Rio de Janeiro: Imago, 1976.

LEITE, L. H. A. Pedagogia de Projetos: Intervenção no Presente. Presença Pedagógica, Belo Horizonte, v. 2, n. 8, p. 25-33, mar./abr. 1996.

LÜCK, H. Pedagogia interdisciplinar: fundamentos teórico-metodológicos. 11. ed. Petrópolis, RJ: Vozes, 2003.

MORIN, E. Introdução ao pensamento complexo. Porto Alegre: Sulina, 2007.

REIGOTA, M. O que é Educação Ambiental? 2. ed. São Paulo: Brasiliense, 2009.

LEVANTAMENTO FLORÍSTICO E IMPLICAÇÕES PARA A GESTÃO AMBIENTAL E DE INFRAESTRUTURA EM UMA INSTITUIÇÃO DE ENSINO

André Assis Pires[1], Ana Carolina de Lima Barizão[2], Luiza Ambrósio Narciso[3], Caio Sarmento da Silva[4], Poliana Daré Zampirolli Pires[5]

1 Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) Campus Vitória, e-mail: andre.pires@ifes.edu.br; 2 Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes), e-mail: carolina.barizao@gmail.com; 3 Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) Campus Vitória, e-mail: luiza.ambrosio2003@gmail.com.br;4 Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) Campus Vitória, e-mail: caio906b@gmail.com; 5 Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) Campus Vitória, e-mail: poliana.pires@ifes.edu.br.

Palavras-chave: Inventário florístico; Planejamento ambiental urbano; Educação ambiental aplicada

Introdução

A presença de áreas verdes e de arborização em ambientes urbanos tem sido amplamente reconhecida como um elemento essencial para a melhoria da qualidade ambiental nas cidades. Em Instituições de Ensino localizadas em grandes centros urbanos, a vegetação exerce funções ecológicas, paisagísticas, pedagógicas e sociais, contribuindo para a melhoria do conforto térmico, para a redução da poluição atmosférica e sonora e para o bem-estar psicológico da comunidade acadêmica. Nesse contexto, o levantamento florístico surge como uma importante ferramenta de diagnóstico ambiental, permitindo conhecer a diversidade vegetal existente em determinado espaço, bem como subsidiar o planejamento e a gestão adequada dessas áreas verdes.

De acordo com diversos estudos sobre arborização urbana e vegetação em espaços institucionais realizados no Brasil, inventários florísticos permitem identificar a composição de espécies, a abundância relativa, o estado fitossanitário e a adequação das espécies ao ambiente urbano, constituindo uma etapa fundamental para a tomada de decisões relacionadas ao manejo da vegetação (Castro et al., 2023; Fogaça, et al., 2008; Santos et al., 2025; Silva et al., 2019; Souza et al., 2015). Em instituições de ensino, tais levantamentos também apresentam importante valor didático, uma vez que possibilitam a integração entre ensino, pesquisa e extensão, especialmente em cursos da área ambiental.

No caso específico de cursos voltados à Engenharia Sanitária e Ambiental, o conhecimento da vegetação presente no espaço institucional torna-se particularmente relevante. Isso ocorre porque a arborização urbana, quando não planejada ou manejada inadequadamente, pode gerar uma série de impactos sobre a infraestrutura urbana, sistemas de saneamento e condições de uso dos espaços públicos. Entre os principais problemas associados à presença de determinadas espécies vegetais em áreas urbanizadas estão os danos a rede elétrica e danos estruturais provocados por sistemas radiculares agressivos, que podem afetar fundações de edificações, tubulações de água e esgoto, redes de drenagem e pavimentações além de provocar o levantamento de calçadas e pisos devido ao crescimento de raízes superficiais, comprometendo a acessibilidade e a segurança de pedestres (Fogaça, et al., 2008).

Outro aspecto frequentemente observado refere-se ao acúmulo de resíduos orgânicos provenientes das árvores, tais como folhas, flores, frutos, galhos e resinas e óleos. Em ambientes institucionais com intensa circulação de pessoas e veículos, esses resíduos podem ocasionar diferentes transtornos operacionais e sanitários, apesar dos frutos servirem de alimento para a comunidade escolar. A deposição de folhas e galhos em telhados e calhas, por exemplo, pode provocar entupimentos nos sistemas de drenagem pluvial das edificações, favorecendo infiltrações, danos estruturais e custos adicionais de manutenção predial.

Da mesma forma, a queda de frutos de espécies frutíferas presentes em áreas de circulação ou estacionamentos pode causar sujeira, odores desagradáveis e atrair insetos e animais considerados indesejáveis em ambientes institucionais, como roedores, gambás e outros organismos oportunistas. Espécies frutíferas como manga (*Mangifera indica*), jaca (*Artocarpus heterophyllus*), pitangua (*Eugenia uniflora*), carambola (*Averrhoa carambola*), jamelão (*Syzygium cumini*), quando presentes em ambientes urbanos sem manejo adequado, podem contribuir para o acúmulo de matéria orgânica em decomposição, favorecendo problemas sanitários e operacionais (Morigi & Bovo, 2013).

Além disso, árvores envelhecidas, mortas ou com comprometimento estrutural representam risco potencial à segurança das pessoas e ao patrimônio, podendo ocasionar quedas de galhos ou mesmo de indivíduos arbóreos inteiros durante eventos de vento ou chuvas intensas. Esses riscos reforçam a necessidade de monitoramento contínuo da arborização em ambientes urbanos e institucionais.

Apesar desses potenciais impactos negativos, a presença de árvores em instituições de ensino apresenta inúmeros benefícios ambientais e sociais. Entre os principais destaca-se a melhoria do conforto térmico proporcionado pelo sombreamento e pela evapotranspiração das plantas, fatores particularmente importantes em regiões tropicais e em áreas urbanizadas com elevada impermeabilização do solo. A redução da temperatura ambiente em áreas arborizadas contribui diretamente para a melhoria das condições de permanência e circulação de estudantes, professores e servidores.

Outro aspecto relevante refere-se ao bem-estar psicológico associado à presença de áreas verdes. Estudos indicam que ambientes arborizados contribuem para a redução do estresse, para o aumento da sensação de conforto e para a melhoria

da qualidade de vida das pessoas que frequentam esses espaços (Pivetta & Silva Filho, 2002). Em instituições de ensino superior, esses espaços também funcionam como áreas de convivência e socialização, fortalecendo a integração da comunidade acadêmica.

Além dos benefícios ambientais e sociais, a arborização institucional pode ainda desempenhar importante função pedagógica, permitindo o desenvolvimento de atividades acadêmicas relacionadas à botânica, ecologia, gestão ambiental e planejamento urbano. Dessa forma, levantamentos florísticos realizados em campus universitários e de Institutos Federais contribuem não apenas para a gestão ambiental desses espaços, mas também para a formação prática de estudantes, especialmente em cursos ligados à área ambiental.

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo realizar um levantamento florístico da vegetação arbórea existente no Campus Vitória do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), buscando analisar a diversidade de espécies presentes e discutir suas implicações para a gestão ambiental e de infraestrutura do campus, com enfoque nas relações entre arborização urbana e aspectos ligados à Engenharia Sanitária e Ambiental.

Material e Métodos

O estudo foi realizado no Campus Vitória do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (Ifes), localizado no bairro Jucutuquara, no município de Vitória, estado do Espírito Santo, Brasil. O campus possui área aproximada de 41.352,30m² e caracteriza-se como um espaço urbano institucional com intensa circulação diária de estudantes, professores, servidores e visitantes, com uma média diária de 4.000 pessoas. O levantamento florístico foi conduzido no mês de novembro de 2025 e março de 2026 por estudantes do curso superior de Engenharia Sanitária e Ambiental do Ifes, como atividade acadêmica voltada à identificação e caracterização da vegetação presente no campus.

Para a realização do inventário foram considerados todos os indivíduos arbóreos e arbustivos presentes na área do campus que apresentavam diâmetro à altura do peito (DAP) superior a 5 cm. A medição do DAP foi realizada a aproximadamente 1,30 m do solo, seguindo os procedimentos usualmente adotados em inventários florestais e levantamentos de arborização urbana.

Durante o trabalho de campo utilizou a técnica do inventário de caráter qualitativo do tipo censo, conforme descrito por Buckeridge (2015), abordando parâmetros como: nome comum e científico, família, número de indivíduos, número de espécies, tipo de espécie (nativa ou exótica). A identificação foi realizada diretamente em campo com o auxílio do aplicativo Google Lens com base em características morfológicas das plantas, como folhas, frutos, flores e arquitetura da copa.

Após a coleta das informações, os dados foram organizados em planilhas e os dados foram posteriormente analisados de forma descritiva, permitindo avaliar a diversidade florística e a distribuição das espécies no ambiente institucional.

Resultado e Discussão

O levantamento florístico realizado no campus Vitória do Ifes permitiu identificar um total de 56 diferentes espécies vegetais, distribuídas em 205 indivíduos, considerando apenas plantas com DAP superior a 5 cm (Quadro 1).

Das 50 espécies identificadas 55 foram classificadas como Angiospermas, ou seja, plantas que apresentam de flores complexas e frutos que protegem suas sementes e apenas 1 como Gimnosperma, que são plantas sem flores verdadeiras e apresentam sementes nuas. Das espécies identificadas como Angiospermas, 18 foram classificadas como frutíferas comestíveis, 18 como paisagísticas e ornamentais e 10 como florestais úteis para arborização, nativas ou exóticas e 9 como palmáceas que também podem ter caráter paisagístico. A única Gimnosperma identificada, foi classificada como espécie com potencial paisagístico e ornamental.

Observa-se predominância de algumas espécies na composição da arborização do campus, com destaque para a Aroeira vermelha (*Schinus terebinthifolia*), com 21 indivíduos, o Oiti (*Licania tomentosa*), com 18 indivíduos e das ornamentais Hibisco (*Hibiscus sabdariffa*), com 28 indivíduos e Yuca (*Yucca elephantipes*), com 14 indivíduos. Das frutíferas comestíveis destaca-se a presença da Mangueira (*Mangifera indica*), com 9 indivíduos e da Seriguela (*Spondias purpurea*), com 5 indivíduos (Quadro 1). Essas espécies são frequentemente utilizadas em arborização e paisagismo urbano no Brasil devido à sua capacidade de adaptação a ambientes urbanos e ao sombreamento proporcionado.

Das seis espécies mais observadas na composição florística do campus, é importante ressaltar que metade é composta de espécies nativas do Brasil, que são o Oiti, a Aroeira e a Seriguela e a outra metade de espécies exóticas, que são o Hibisco, a Yuca e a Mangueira. Quanto as informações das famílias das espécies encontradas, observamos a presença de 30 diferentes famílias, sendo as seis principais em relação a quantidade de indivíduos observadas foram a Anacardiaceae, Malvaceae, Arecaceae, Chrysobalanaceae, Asparagaceae, Verbenaceae, que juntas responderam pela presença de 136 indivíduos, correspondendo a 66% das plantas observadas no campus Vitória (Quadro 1). Resultados semelhantes foram observados em levantamentos florísticos realizados em áreas urbanas e institucionais (Castro et al., 2023; Santos et al., 2025; Silva et al., 2019; Souza et al., 2015).

Quadro 01 – Espécies vegetais identificadas no Ifes campus Vitória.

Nome comum	Nome científico	Nº In.*	Origem*		Nome comum	Nome científico	Nº In.*	Origem*
Angiospermas								
Frutíferas comestíveis					**Espécies paisagísticas / ornamentais**			
Acerola	*Malpighia emarginata*	1	E		Algodão de seda	*Calotropis procera*	1	E
Amora	*Morus nigra* L.	1	E		Árvore da felicidade fêmea	*Polyscias fruticosa*	4	E
Araçá amarelo	*Psidium cattleianum*	2	N		Árvore da felicidade macho	*Polyscias guilfoylei*	5	E
Café conilon	*Caffea conphora*	1	E		Árvore do viajante	*Ravenala madagascariensis*	1	E
Cajá	*Spondias mombin*	2	N		Café de jardim	*Ardisia elliptica*	1	E
Carambola	*Averrhoa carambola*	1	E		Canela	*Cinnamomum verum*	3	E
Fruta da condessa	*Anona reticulata*	1	E		Corda de viola	*Ipomoea triloba*	1	N
Goiaba	*Psidium guajava*	1	N		Cróton	*Codiaeum variegatum*	4	E
Grumixama	*Eugenia brasiliensis*	1	N		Flamboyanzinho	*Caesalpinia pulcherrima*	1	E
Jabuticaba	*Plinia cauliflora*	3	N		Flor coral	*Russelia equisetiformis*	1	E
Jamelão	*Syzygium cumini*	1	E		Hibisco	*Hibiscus sabdariffa*	28	E
Limão Taiti	*Citrus latifolia*	1	E		Jasmim do Caribe	*Plumeria pudica*	1	E
Mamão	*Carica papaya*	1	E		Murta de Cheiro	*Murraya paniculata*	2	E
Manga	*Mangifera indica*	9	E		Mussaenda	*Mussaenda erythrophylla*	1	E
Pitanga	*Eugenia uniflora*	1	N		Pingo de ouro	*Duranta repens*	10	N
Romã	*Punica granatum*	1	E		Pleomele	*Dracaena reflexa*	3	E
Sapoti	*Manilkara zapota*	3	E		Rasedá	*Lagerstroemia indica*	1	E
Siriguela	*Spondias purpurea*	5	N		Yucca	*Yucca elephantipes*	14	E
Palmáceas					**Espécies florestais / arborização**			
Arenca bambu	*Dypsis lutescens*	11	E		Aldrago	*Pterocarpus violaceus*	1	N
Coqueiro	*Cocos nucifera*	1	E		Amendoeira da praia	*Terminalia catappa*	1	E
Palmeira de dendê	*Elaeis guineensis*	1	E		Aroeira vermelha	*Schinus terebinthifolia*	21	N
Palmeira imperial	*Roystonea oleracea*	2	E		Encino branco	*Quercus subspathulata*	1	E
Palmeira Jerivá	*Syagrus romanzoffiana*	1	N		Gumbo limbo	*Bursera simaruba*	1	N
Palmeira real australiana	*Archontophoenix alexandrae*	1	E		Monguba	*Pachira aquatica*	3	N
Palmeira fênix	*Phoenix roebelenii*	8	E		Nim	*Azadirachta indica*	1	E
Palmeira leque da China	*Livistona chinensis*	6	E		Oiti	*Licania tomentosa*	18	N
Saw Palmeto	*Serenoa repens*	1	E		Pata de vaca	*Bauhinia forficata*	1	N
Gimnosperma					Sumauma	*Ceiba pentandra*	1	N
Espécies paisagísticas / ornamentais								
Cica	*Cycas revoluta*	5	E					

***Nº In. (Número de Indivíduos)** ***Origem (N – Nativa / E – Exótica)**

Do ponto de vista da Engenharia Sanitária e Ambiental, os resultados do levantamento evidenciam a necessidade de monitoramento e planejamento da arborização institucional, visto que 24% das plantas catalogas se classificaram como espécies florestais com potencial para arborização urbana, sendo estas praticamente todas já maduras e totalmente formadas com grandes copas (Quadro 1). É importante destacar que a maioria destes indivíduos estavam encontram-se próximas a edificações do campus o que pode representar risco potencial à infraestrutura predial e aos sistemas de saneamento, especialmente quando observamos que estas espécies em sua grande maioria apresentam sistemas radiculares agressivos ou de grande expansão lateral.

Observou-se também a presença de 36 indivíduos classificados como frutíferas comestíveis, sendo que nem todos os indivíduos estavam em período de frutificação quando da catalogação (Quadro 1). Mas esse alto número de frutíferas, alerta para a presença constante de frutos em decomposição, o que contribui para a atração de insetos e roedores, representando um desafio adicional para a gestão sanitária do campus. Além disso, a deposição de folhas, galhos e frutos pode interferir nos sistemas de drenagem pluvial das edificações, favorecendo o entupimento de calhas e tubulações.

Apesar dessas questões já levantadas, observou-se que a arborização existente também oferece benefícios ambientais significativos, especialmente em relação ao sombreamento, ao conforto térmico e a melhoria da qualidade de vida proporcionado aos usuários do campus. Considerando que o campus Vitória está localizado em área densamente urbanizada, a presença dessas árvores contribui para a redução da temperatura local e para a melhoria das condições ambientais do espaço institucional.

Considerações Finais

O levantamento florístico realizado no campus Vitória do Ifes permitiu identificar significativa a diversidade de espécies vegetais, evidenciando a importância da arborização existente para a qualidade ambiental do espaço institucional. Entretanto, os resultados também demonstram que a presença de determinadas espécies, especialmente árvores de grande porte ou com sistemas radiculares agressivos, pode gerar impactos sobre a infraestrutura institucional e os sistemas de saneamento do campus, como danos em pavimentações, interferências em redes de água e esgoto, entupimento de sistemas de drenagem e acúmulo de resíduos orgânicos. Dessa forma, destaca-se a importância da realização de inventários florísticos periódicos como ferramenta fundamental para o planejamento e manejo da arborização institucional, permitindo conciliar os benefícios ambientais e sociais das áreas verdes com a manutenção adequada da infraestrutura e das condições sanitárias do campus, além de contribuir para a formação prática dos estudantes do campus.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (Ifes), Campus Vitória, pelo apoio recebido.

Referências bibliográficas

BUCKERIDGE, Marcos. Árvores urbanas em São Paulo: planejamento, economia e água. **Estudos Avançados**, v.29, n.84, p.85-101, 2015.

CASTRO, Isabella Lopes Barbosa*, et al*., Estudo do levantamento florístico da unidade Flamboyant do IFG – Campus Jataí, In: **Anais da Semana de Licenciatura,** Jataí, v. 1, n. 1, p. 33–37, 2023.

FOGAÇA, Isabella Stéphanie, *et al.* Levantamento florístico arbóreo-arbustivo do Centro de Estudos da Natureza (Univap/ Campus Urbanova), São José dos Campos, SP. In: **XII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, VII Encontro de Pós-Graduação e II INIC Jr.**, São José dos Campos. Encontros Latino Americano de Iniciação Científica e de Pós-Graduação, 2008.

PIVETTA, Kathia Fernandes Lopes & SILVA FILHO, Demóstenes Ferreira da., **Boletim Acadêmico**: Série de Arborização Urbana. Jaboticabal, SP: UNESP/FCAV/FUNEP, 2002.

SANTOS, Willy Silva, *et al.* Análise da composição florística do Instituto Federal da Bahia, Campus Eunápolis: subsídios para um plano de manejo. **Revista Princípia**. v. 62, e8534, 2025.

SOUZA, E. P. de, *et al.*, Nepad: Levantamento florístico do Câmpus da Unesp de Dracena/SP. In: **8° Congresso de Extensão da Unesp,** 2015.

SILVA, Gabriel José da, *et al*., Levantamento florístico da Escola Estadual "Nossa Senhora da Piedade" como instrumento para educação ambiental, **Revista do CMEB**, v.1, n.1 2019.

MORIGI, Josimari de Brito; BOVO, Marcos Clair, A qualidade do ambiente urbano: uma breve reflexão sobre a ocorrência de espécies frutíferas na arborização das vias públicas do centro urbano de Mamborê (PR). In: **Simpósio De Estudos Urbanos: A Dinâmica Das Cidades E A Produção Do Espaço. Campo Mourão**. 2013.

SANEAMENTO ALÉM DO CANO: DOSADORES ARTESANAIS E FILTROS DE BARRO COMO ESTRATÉGIA DE SOBERANIA HÍDRICA E JUSTIÇA AMBIENTAL EM COMUNIDADES RURAIS DO TOCANTINS E AMAPÁ - BRASIL

1Ana Marise Pereira Gomes, 2 Carmem Nilza dos Santos Silva, 3 Álvaro Henrique Pereira Gomes Ornellas, 4 Rosany Lopes Martins

1 Fundação Nacional de Saúde, e-mail: ana.marise@funasa.gov.br/anamarisegomes@gmail.com; 2 Fundação Nacional de Saúde; e-mail: carmem.s.silva@funasa.gov.b; 3 Laboratório Central do Tocantins, e-mail: ornellas.alvaro@gmail.com;4 Universidade Federal do Amapá, e-mail: rosyufpa@gmail.com

Palavras-chave: Água potável; Segurança hídrica; Saúde Ambiental

Introdução

O acesso à água potável é um direito fundamental reconhecido pela Organização das Nações Unidas (ONU) e pela Constituição Federal Brasileira (BRASIL, 1988; UNITED NATIONS, 2010). Contudo, a realidade das comunidades rurais dos estados do Amapá e do Tocantins, revela uma profunda "Dívida de Saúde Ambiental": um hiato histórico onde a infraestrutura de saneamento convencional (redes de tratamento e distribuição) raramente alcança as populações isoladas, quilombolas, tradicionais e ribeirinhas. A

Nesses territórios, a água consumida provém majoritariamente de fontes brutas, como rios, igarapés, poços rasos ou cisternas, que frequentemente são expostas a contaminações microbiológicas. Esta vulnerabilidade se traduz em indicadores elevados de Doenças Diarreicas Agudas (DDA), que sobrecarregam o SUS e perpetuam ciclos de desigualdade social. Diante da inviabilidade imediata de sistemas de engenharia pesada ("o cano"), surge a necessidade imperativa de implementar Tecnologias Sociais de Saneamento. Neste contexto, este trabalho propõe uma intervenção integrada entre a Vigilância em Saúde Ambiental (DISAM/FUNASA e a Educação Popular em Saúde, fundamentada no conceito de barreiras múltiplas de proteção da água.

A estratégia integra o uso de dosadores artesanais de cloro para desinfecção coletiva em reservatórios e filtros de barro para o tratamento domiciliar, garantindo simultaneamente a segurança microbiológica e a qualidade sensorial da água para consumo. O filtro de barro, utilizando uma vela de carvão ativado, que reduz o gosto e o odor do cloro, podendo minimizar a rejeição cultural e favorecer a adesão das famílias às práticas de tratamento. Além disso, destaca-se que a estratégia está alinhada ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6, que visa assegurar o acesso universal à água potável e ao saneamento.

O uso dessas tecnologias apresenta vantagens relevantes do ponto de vista técnico, econômico e social, uma vez que seu custo é significativamente inferior ao de sistemas convencionais, como Estações de Tratamento de Água, além de possibilitar maior autonomia das comunidades no manejo da qualidade da água. Ademais, o uso do laboratório móvel da Fundação Nacional de Saúde (FUNASA) como ferramenta pedagógica amplia o alcance da intervenção, ao permitir a visualização dos resultados analíticos em tempo real, fortalecendo o letramento sanitário e o protagonismo comunitário.

Em relação a perspectiva da justiça ambiental, o trabalho aborda a necessidade de acesso igualitário à água segura, ao integrar conhecimento técnico-científico e saberes locais. De acordo com Gomes e Martins (2025), a tecnologia por si só não resolve o problema; é necessária a "pedagogia das águas" para transformar moradores em guardiões de seus territórios. Assim, a articulação entre tecnologias de baixo custo e processos educativos configura-se como estratégia promissora para a promoção da soberania hídrica e da saúde em territórios rurais.

Diante desse contexto, o trabalho tem como objetivo implementar e avaliar uma estratégia integrada de Vigilância em Saúde Ambiental, baseada na aplicação de tecnologias sociais de saneamento e na Educação Popular em Saúde, em comunidades rurais dos estados de Tocantins e do Amapá, com foco na melhoria da qualidade da água e na promoção da autonomia comunitária.

Metodologia

O presente estudo adota uma abordagem metodológica de natureza mista (quantitativa e qualitativa) (TEDDLIE; TASHAKKORI, 2009), estruturada como pesquisa-ação (LEITE; LEMOS, 2022), desenvolvida em comunidades rurais dos estados do Tocantins e do Amapá. A investigação foi organizada em etapas sequenciais e integradas, contemplando diagnóstico situacional, intervenção tecnológica participativa, monitoramento da qualidade da água e avaliação de impacto.

O estudo foi conduzido em dois contextos territoriais estratégicos, caracterizados por elevada vulnerabilidade sanitária e diversidade sociocultural, abrangendo os biomas Amazônia, no estado do Amapá, e Cerrado, no Tocantins. No Amapá, a intervenção concentrou-se no município de Oiapoque, em comunidades ribeirinhas e indígenas com acesso predominantemente fluvial. No Tocantins, a seleção incluiu municípios com adesão voluntária, priorizando comunidades rurais e quilombolas, com acesso majoritariamente terrestre, complementado por travessias fluviais em períodos sazonais. A definição dos locais baseou-se em critérios epidemiológicos e operacionais, como histórico de Doenças Diarreicas Agudas (DDA), ausência ou precariedade de sistemas de abastecimento de água e viabilidade logística.

Inicialmente, foi realizado o diagnóstico das condições de abastecimento e qualidade da água nas comunidades selecionadas. Amostras de água bruta, provenientes de rios, poços e cisternas, foram coletadas e submetidas a análises físico-químicas (pH e turbidez) e microbiológicas (coliformes totais e *Escherichia coli*), utilizando a Unidade Móvel de Controle da Qualidade da Água (UMCQA/Funasa). Paralelamente, aplicaram-se questionários semiestruturados para levantamento da percepção comunitária sobre a qualidade da água, práticas de consumo e barreiras socioculturais relacionadas ao tratamento domiciliar.

A intervenção será fundamentada em uma metodologia participativa, orientada pelos princípios da Educação Popular em Saúde, com ênfase no diálogo de saberes e na valorização dos conhecimentos locais. Serão realizadas oficinas comunitárias voltadas à implementação de tecnologias sociais de saneamento, com participação ativa dos moradores. A estratégia adotará o conceito de barreiras múltiplas de proteção da água, integrando a desinfecção coletiva por meio de dosador artesanal de cloro e o tratamento domiciliar por meio de filtro de barro. O dosador artesanal será confeccionado em PVC, com uso de pastilhas de tricloro estabilizado (90% de cloro ativo), permitindo a manutenção de níveis de cloro residual livre entre 0,2 e 2,0 mg/L nos reservatórios. O filtro domiciliar consistirá em unidade cerâmica equipada com vela de tripla ação, promovendo filtração física, ação bacteriostática e adsorção de compostos, contribuindo para a melhoria da qualidade microbiológica e sensorial da água.

Durante as oficinas, serão realizadas demonstrações práticas de montagem, instalação e manutenção dos dispositivos, bem como a utilização de kits colorimétricos (DPD) para verificação da presença de cloro residual, promovendo o letramento sanitário e a autonomia comunitária. O monitoramento da qualidade da água será realizado em três momentos: pré-intervenção e pós-intervenção, aos 30 e 60 dias, com coletas em três pontos distintos: fonte de água bruta, reservatório após cloração e água filtrada para consumo. As análises contemplaram parâmetros físico-químicos e microbiológicos, permitindo avaliar a eficiência das tecnologias implantadas na redução de contaminantes e na manutenção de níveis adequados de cloro residual. Os dados serão sistematizados e inseridos em sistema de vigilância da qualidade da água para consumo humano.

A avaliação de impacto considerou indicadores relacionados à melhoria da qualidade da água, à eficiência das tecnologias e à adesão comunitária às práticas de tratamento. Os resultados foram apresentados às comunidades por meio de encontros participativos, com linguagem acessível, favorecendo a compreensão e a apropriação dos achados. Adicionalmente, procedeu-se à sistematização da experiência para elaboração de um protocolo técnico-operacional de intervenção, com potencial de replicação em diferentes contextos territoriais e biomas.

Como estratégia de sustentabilidade, será implementado o monitoramento comunitário da qualidade da água, fundamentado nos princípios da "ciência cidadã". Os moradores serão capacitados para utilização de kits simplificados de análise de cloro residual, possibilitando o acompanhamento contínuo da qualidade da água no domicílio. Serão incentivadas práticas de registro comunitário dos resultados, contribuindo para a construção de um sistema local de vigilância participativa, reduzindo a dependência de monitoramento externo e fortalecendo a autonomia das comunidades.

Resultados Esperados

Espera-se que a implementação da estratégia integrada de Vigilância em Saúde Ambiental, associada ao uso de tecnologias sociais e à Educação Popular, resulte em melhorias significativas na qualidade da água e no fortalecimento da autonomia comunitária. No âmbito técnico-sanitário, projeta-se alcançar a conformidade microbiológica da água para consumo humano, com ausência de *Escherichia coli* nas amostras filtradas, bem como a manutenção de níveis adequados de cloro residual livre nos reservatórios, contribuindo para a prevenção de recontaminações.

No campo social, espera-se ampliar o letramento sanitário e a participação comunitária, com a capacitação das famílias para o uso de tecnologias de tratamento e monitoramento da água, bem como que a maioria dos participantes desenvolva habilidades para utilização de kits simplificados de análise de cloro residual, favorecendo a autonomia no controle da qualidade da água e a adoção contínua das tecnologias implementadas.

Adicionalmente, acreditar-se que a consolidação de práticas de monitoramento comunitário, com registro sistemático de dados locais, possa fortalecer a vigilância participativa e o diálogo entre comunidades e gestão pública. No plano institucional, projeta-se a sistematização de um protocolo técnico-operacional de intervenção, com potencial de replicação em diferentes contextos territoriais e biomas, contribuindo para o aprimoramento de políticas públicas de saneamento rural de baixo custo e alto impacto.

Considerações finais

O presente estudo evidencia que o saneamento rural exige abordagens que transcendam soluções exclusivamente tecnológicas, incorporando dimensões sociais, culturais e educativas. A estratégia proposta, baseada na integração entre tecnologias sociais e Educação Popular em Saúde, demonstra que a efetividade das intervenções depende da articulação entre o rigor técnico e o engajamento comunitário.

Nesse sentido, o conceito de saneamento "além do cano" revela-se como uma abordagem orientada pela equidade e pela justiça ambiental, ao promover não apenas o acesso à água segura, mas também o fortalecimento da autonomia das comunidades. A combinação entre a desinfecção química e o tratamento domiciliar, associada a processos educativos participativos, contribui para a construção da soberania hídrica em contextos de vulnerabilidade.

Corroborando essa perspectiva, destaca-se que o saneamento constitui um determinante fundamental da saúde pública e da dignidade humana, conforme apontado por Léo Heller. Assim, a validação desta proposta em contextos reais reforça o papel das políticas públicas na promoção de soluções sustentáveis e inclusivas, especialmente em territórios que desempenham papel estratégico na proteção dos biomas Amazônia e Cerrado

Agradecimento

Expressamos nosso profundo agradecimento ao Laboratório Central do Tocantins (LACEN-TO), à Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) e, de forma muito especial, às Superintendências Estaduais da Funasa no Tocantins (Suest-TO) e no Amapá (Suest-AP). Esta tripla parceria foi fundamental para viabilizarmos o projeto 'Saneamento além do cano: dosadores artesanais e filtros de barro como estratégia de soberania hídrica e justiça ambiental em comunidades rurais do Tocantins e Amapá'. Acreditamos que o acesso à água de qualidade, por meio de soluções inovadoras e sustentáveis, é o caminho para a verdadeira justiça social em nossa região. Este trabalho é a prova de que o saneamento vai muito além das infraestruturas: trata-se de dignidade e cuidado com as pessoas

Referências Bibliográficas

BRASIL. **Constituição (1988)**. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidência da República, 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm. Acesso em: 09 de abril de 2026.

GOMES, Ana Marise Pereira; MARTINS, Rosany Lopes. **Educação popular em saúde e saneamento ambiental: formação transformadora em comunidades rurais e indígenas**. In: **II SANEA BRASIL: Congresso Internacional de Saneamento Rural**, 2025. Petrolina, PE: Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2025.

LEITE, Ana Luiza; LEMOS, Dannyela da Cunha. **Utilização da pesquisa-ação no campo das ciências sociais aplicadas.** REAd. Revista Eletrônica de Administração (Porto Alegre), v. 28, n. 1, p. 64-91, 2022.

TEDDLIE, Charles; TASHAKKORI, Abbas. **Foundations of mixed methods research: integrating quantitative and qualitative approaches in the social and behavioral sciences**. Thousand Oaks, CA: Sage, 2009.

UNITED NATIONS. **General Assembly. Resolution adopted by the General Assembly on 28 July 2010: 64/292 – the human right to water and sanitation**. New York: United Nations, 2010. Disponível em: https://documents.un.org/doc/undoc/gen/n09/479/35/pdf/n0947935.pdf?OpenElement. Acesso em: 09 de abril de 2026.

EDUCAÇÃO AMBIENTAL EM EVENTO ESPORTIVO: RELATO DE EXPERIÊNCIA DO PROJETO CORRIDAS SUSTENTÁVEIS NA CORRIDA DA AME

1 Larissa Rodrigues Souza Costa, 2 Kelly Isabel Werneck de Oliveira, 3 Anita Loyane Mendonça de Souza, 4 Sueli Moura Bertolino

1 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: larissa.costa2@ufu.br; 2 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: kelly.oliveira@ufu.br; 3 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: anita.loyane@ufu.br; 4 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: suelibertolino@ufu.br

Palavras-chave: educação ambiental; sustentabilidade; eventos esportivos.

Introdução

A Educação Ambiental é um processo contínuo voltado à formação de valores, conhecimentos e atitudes que contribuem para a preservação do meio ambiente e a construção de uma sociedade mais sustentável. Desde a Conferência de Tbilisi, destaca-se a importância de promover a compreensão das questões ambientais e incentivar a participação ativa da população na sua resolução (UNESCO, 1977). Nesse sentido, a Educação Ambiental vai além da transmissão de informações, buscando sensibilizar e estimular mudanças de comportamento, especialmente por meio de experiências práticas e contextualizadas.

A extensão universitária desempenha papel fundamental nesse processo ao aproximar a universidade da sociedade. De acordo com as diretrizes da educação superior brasileira, a extensão deve promover a integração entre ensino, pesquisa e comunidade, contribuindo para a formação cidadã dos estudantes (BRASIL, 2018). Além disso, autores como Paulo Freire (1996) destacam a importância de práticas educativas baseadas no diálogo e na construção coletiva do conhecimento. Assim, projetos extensionistas tornam-se espaços relevantes para o desenvolvimento de ações de Educação Ambiental que dialogam diretamente com a realidade social.

Nesse contexto, eventos de corrida de rua configuram-se como ambientes favoráveis para ações educativas, pois reúnem grande diversidade de participantes em um mesmo espaço. Apesar de promoverem saúde e integração social, esses eventos também geram impactos ambientais, principalmente relacionados à produção de resíduos sólidos. Estudos apontam que a mudança de comportamento ambiental está diretamente ligada à vivência prática e ao envolvimento ativo dos indivíduos (HUNGERFORD; VOLK, 1990). A experiência do projeto Corridas Sustentáveis na Corrida da AME evidenciou que atividades interativas, como orientações, jogos e quizzes, podem contribuir de forma significativa para a conscientização ambiental do público.

Diante disso, o presente resumo expandido tem como objetivo apresentar a experiência do projeto Corridas Sustentáveis em um evento de corrida de rua, destacando suas contribuições para a educação ambiental da comunidade e para a formação dos estudantes envolvidos. Busca-se evidenciar como ações extensionistas em eventos esportivos podem favorecer a adoção de práticas mais sustentáveis, reforçando a importância da integração entre universidade e sociedade na promoção da sustentabilidade.

Material e Métodos

A ação extensionista foi realizada durante a 12ª Corrida da AME, no ano de 2025, com largada e chegada no Parque do Sabiá, localizado no município de Uberlândia-MG. A organização disponibilizou um espaço específico para a atuação do projeto Corridas Sustentáveis, permitindo a instalação de uma tenda identificada e organizada para o desenvolvimento das atividades de educação ambiental.

O planejamento da ação ocorreu previamente à realização da corrida e envolveu a definição das estratégias educativas, a preparação dos materiais de apoio, a organização da equipe e a divisão das funções entre as participantes. A equipe extensionista foi composta por quatro discentes do projeto, sendo duas agentes de pesquisa e duas agentes de extensão, além da presença da professora orientadora. Antes da execução das atividades, as participantes alinharam a abordagem que seria utilizada com o público, buscando garantir uma comunicação clara, acessível e adequada às diferentes faixas etárias presentes no evento.

No dia da ação, o espaço foi organizado de forma a favorecer a aproximação espontânea dos participantes. Na tenda, foram expostos os materiais utilizados nas dinâmicas, como medalhas simbólicas do projeto, canetas ecológicas personalizadas, cartilhas educativas e materiais ilustrativos relacionados à separação de resíduos. A disposição desses elementos teve como finalidade tornar o estande mais atrativo, estimular a curiosidade do público e facilitar a interação entre a equipe extensionista, corredores, familiares e crianças.

A metodologia adotada baseou-se em atividades educativas presenciais, lúdicas e participativas. Inicialmente, os participantes eram convidados a responder um quiz ambiental, composto por três perguntas relacionadas à sustentabilidade, à geração de resíduos em eventos esportivos e ao descarte correto de materiais. As questões foram elaboradas com linguagem simples e objetiva, de modo a possibilitar a participação tanto de adultos quanto de crianças, promovendo reflexão sobre atitudes cotidianas e práticas sustentáveis em corridas de rua.

Após a etapa do quiz, os participantes eram direcionados para uma atividade prática de separação de resíduos. Nessa dinâmica, recebiam figuras representando diferentes tipos de materiais e deveriam indicar o descarte adequado em lixeiras ilustrativas, diferenciando resíduos recicláveis, orgânicos e rejeitos. Essa etapa buscou transformar o conteúdo ambiental em uma experiência concreta, permitindo que os participantes aplicassem, de forma prática, os conhecimentos discutidos durante a atividade.

Como estratégia de incentivo e valorização da participação, foram utilizados brindes educativos, como canetas ecológicas e medalhas simbólicas do projeto. Além disso, foram distribuídas cartilhas educativas destinadas ao público infantil e adulto, contendo informações sobre sustentabilidade, redução da geração de resíduos, descarte correto e hábitos ambientalmente responsáveis. A entrega das cartilhas teve como objetivo ampliar o alcance da ação para além do momento do evento, possibilitando que os conteúdos abordados fossem compartilhados posteriormente em ambientes familiares e sociais.

Durante toda a execução, as atividades foram conduzidas com adaptação da linguagem conforme o perfil dos participantes, considerando a presença de corredores, acompanhantes, crianças e pessoas com diferentes níveis de conhecimento sobre a temática ambiental. Dessa forma, a metodologia priorizou a escuta, o diálogo e a participação ativa do público, buscando fortalecer a educação ambiental em um espaço não formal de aprendizagem e aproximar a universidade da comunidade por meio da extensão.



Figura 01: Interação entre alunos do projeto com participantes da corrida.
Fonte: Autoria Própria, 2025.

Resultados e Discussão

A ação alcançou diretamente cerca de 110 participantes, sendo aproximadamente 40 crianças e 70 adultos, entre corredores, familiares e demais pessoas presentes no evento. A participação do público ocorreu de forma espontânea, favorecida pela localização da tenda, pela identificação visual do projeto e pela exposição dos materiais educativos e simbólicos utilizados na dinâmica.

Observou-se boa receptividade por parte da comunidade, especialmente entre as crianças, que demonstraram interesse pelas atividades lúdicas e, em alguns casos, retornaram ao estande mais de uma vez. A dinâmica de separação de resíduos mostrou-se uma ferramenta eficiente para trabalhar a educação ambiental de forma prática, permitindo que os participantes associassem o conteúdo apresentado a situações comuns do cotidiano, como o descarte de copos plásticos, embalagens e resíduos orgânicos.

Durante a realização do quiz e das conversas com os participantes, percebeu-se que muitos ainda apresentavam dúvidas sobre a destinação correta de determinados resíduos. Um dos pontos que mais chamou atenção foi a dificuldade em compreender que materiais potencialmente recicláveis podem deixar de ser reciclados quando estão excessivamente sujos. Também houve surpresa em relação ao tempo de decomposição dos plásticos, o que evidenciou a importância de ações educativas em espaços não formais de aprendizagem.

Ao longo da atividade, foram entregues 35 medalhas, 50 canetas ecológicas e parte das cartilhas produzidas pelo projeto. Mais do que a distribuição dos materiais, esses recursos funcionaram como elementos de aproximação com o público, estimulando a participação e tornando a experiência mais atrativa. A fala de um dos participantes, ao afirmar que muitas vezes não se tem dimensão do quanto um resíduo pode ser prejudicial ao planeta, reforça que a ação contribuiu para despertar reflexões sobre responsabilidade ambiental.

Outro aspecto relevante foi a contribuição da vivência para a formação das discentes envolvidas. A necessidade de adaptar a linguagem para diferentes públicos, incluindo crianças e pessoas com necessidades específicas, exigiu sensibilidade,

empatia e clareza na comunicação. Dessa forma, a ação não apenas promoveu educação ambiental junto à comunidade, mas também fortaleceu a formação acadêmica, profissional e cidadã das estudantes, reafirmando o papel transformador da extensão universitária.

Considerações Finais

A experiência desenvolvida pelo projeto Corridas Sustentáveis na Corrida da AME demonstrou que eventos esportivos podem ser espaços potentes para a promoção da educação ambiental. A abordagem lúdica, participativa e acessível favoreceu o envolvimento do público e possibilitou a discussão de temas ambientais de forma próxima da realidade dos participantes.

A ação evidenciou que a sustentabilidade em corridas de rua não depende apenas da organização do evento, mas também da participação consciente de atletas, voluntários, familiares e demais envolvidos. Nesse sentido, práticas como o descarte correto, a redução do uso de materiais descartáveis e a valorização da reciclagem devem ser continuamente incentivadas por meio de ações educativas.

Conclui-se que a iniciativa contribuiu para a sensibilização ambiental da comunidade e para a formação das discentes extensionistas, fortalecendo a relação entre universidade e sociedade. Além disso, a experiência apresenta potencial de replicação em outros eventos esportivos, ampliando o alcance do Programa Empreendedorismo Ambiental e consolidando a extensão universitária como instrumento de transformação social e ambiental.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio institucional recebido e aos docentes do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária pela contribuição acadêmica, ao Programa Empreendedorismo Ambiental e ao projeto Corridas Sustentáveis pela oportunidade de atuação extensionista, bem como à organização da Corrida da AME pelo espaço disponibilizado e pela parceria na realização das atividades educativas.

Referências

FREIRE, Paulo. Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa. São Paulo: Paz e Terra, 1996. Disponível para consulta institucional em: https://acervo.paulofreire.org/handle/7891/1970.

HINES, J. M.; HUNGERFORD, H. R.; TOMERA, A. N. Analysis and synthesis of research on responsible environmental behavior: a meta-analysis. Journal of Environmental Education, 18(2), 1–8, 1986.

HUNGERFORD, H. R.; VOLK, T. L. Changing learner behavior through environmental education. The Journal of Environmental Education, v. 21, n. 3, p. 8–21, 1990.

UNESCO. Education for Sustainable Development Goals: learning objectives. Paris: UNESCO, 2017.

PLANEJAMENTO DA ARBORIZAÇÃO VIÁRIA E EDUCAÇÃO AMBIENTAL: ANÁLISE CRÍTICA EM CAMPINA DA LAGOA/PR

1 Danielli Casarin Vilela Cansian, 2 Irene Carniatto de Oliveira
1 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: daniellivilela@gmail.com; 2 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: irenecarniatto@gmail.com

Palavras-chave: Educação ambiental; Arborização urbana; Participação comunitária

Introdução

A arborização urbana tem sido muitas vezes abordada sob um ponto de vista funcional, vinculada ao conforto ambiental e à estética urbana. Contudo, essa abordagem simplificada tem se mostrado insuficiente para responder aos desafios contemporâneos das cidades. Segundo Milano e Dalcin (2000), a arborização constitui elemento essencial da infraestrutura urbana, enquanto Biondi e Althaus (2005) destacam a necessidade de planejamento técnico para sua efetividade. Entretanto, tais abordagens ainda se concentram predominantemente em aspectos operacionais.

A partir de uma visão mais ampla, a problemática da arborização urbana pode ser compreendida como expressão de um sistema socioambiental. Nesse sentido, Enrique Leff (2001) propõe uma racionalidade ambiental que integra dimensões ecológicas, sociais e culturais, superando a fragmentação do conhecimento. De forma complementar, Fritjof Capra (1996) defende a compreensão dos sistemas vivos a partir de relações interdependentes, enquanto Edgar Morin (2005) enfatiza a necessidade de um pensamento complexo que articule múltiplas dimensões da realidade. Nesse contexto, a educação ambiental emerge como elemento estruturante, capaz de promover a integração entre conhecimento técnico e transformação social.

A educação ambiental, nesse contexto, não se limita à transmissão de informações, mas envolve processos educativos capazes de promover mudanças de percepção e comportamento. Conforme Loureiro (2004), trata-se de uma prática social crítica, orientada à transformação das relações entre sociedade e natureza. Jacobi (2003) destaca que a educação ambiental deve estimular a participação ativa da população na gestão urbana, fortalecendo a corresponsabilidade sobre os bens coletivos. Assim, a arborização urbana passa a ser compreendida não apenas como elemento físico, mas como espaço educativo, no qual se constroem práticas de cidadania ambiental.

No Brasil, a educação ambiental é reconhecida como componente essencial das políticas públicas, sendo regulamentada pela Lei nº 9.795/1999, que institui a Política Nacional de Educação Ambiental (PNEA). Essa legislação estabelece a educação ambiental como prática integrada, contínua e permanente em todos os níveis e modalidades de ensino, bem como nas ações não formais, envolvendo a sociedade de maneira ampla. Além disso, o Decreto nº 4.281/2002 reforça a necessidade de articulação entre diferentes setores para a implementação de ações educativas voltadas à sustentabilidade. No meio urbano, tais diretrizes indicam que a gestão ambiental, incluindo a arborização viária, deve incorporar processos educativos que promovam a participação social e a construção de uma consciência crítica em relação ao uso e conservação dos recursos naturais.

Nesse ambiente, a arborização urbana também assume papel estratégico frente às mudanças climáticas, especialmente no que se refere às ações de adaptação. A presença de vegetação nas cidades contribui para a redução das ilhas de calor, melhoria do conforto térmico, aumento da infiltração de água no solo e mitigação de eventos extremos. Assim, a arborização viária passa a ser compreendida como solução baseada na natureza, integrando estratégias de adaptação climática no ambiente urbano. Essa perspectiva reforça a necessidade de planejamento adequado e de ações educativas que promovam o reconhecimento desses benefícios pela população.

Considerando as cidades brasileiras, especialmente em municípios de pequeno porte, a arborização urbana ocorre de maneira desarticulada, sem planejamento técnico adequado e sem integração com políticas públicas contínuas. Essa realidade resulta em conflitos recorrentes entre vegetação e infraestrutura urbana, além de comprometer os benefícios ambientais e sociais associados à presença de árvores nas vias públicas. A ausência de ações permanentes de educação ambiental contribui para a reprodução dessas práticas, dificultando a construção de uma cultura urbana voltada à sustentabilidade.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar criticamente a arborização viária de Campina da Lagoa/PR, articulando o diagnóstico técnico com o marco regulatório de 2018, sob o cenário da educação ambiental.

Material e Métodos

O levantamento foi realizado por meio de censo, com coleta de dados em campo envolvendo equipe previamente orientada quanto aos critérios de identificação e avaliação dos indivíduos arbóreos. Foram considerados aspectos como porte, interferência com infraestrutura, estado fitossanitário e localização no espaço urbano. A análise adotou abordagem qualitativa e interpretativa, permitindo a articulação entre dados técnicos e a dinâmica social observada no processo de implantação e manejo da arborização. A pesquisa se baseou na integração entre dados empíricos, referenciais teóricos e análise normativa. Utilizou-se como base o inventário qualiquantitativo realizado em 2013, abrangendo treze bairros e uma extensão de 17.818,73 metros de vias públicas, com levantamento de 1.474 indivíduos arbóreos. Foram analisados aspectos relacionados à diversidade florística, origem das espécies, estado fitossanitário e conflitos com a infraestrutura urbana.

A interpretação dos dados foi orientada por referenciais clássicos da arborização urbana (Milano; Dalcin, 2000; Biondi;

Althaus, 2005), associados à regra de diversidade ecológica proposta por Santamour (1990). Relacioando o referencial da educação ambiental crítica (Jacobi, 2003; Loureiro, 2004) e do pensamento sistêmico e da complexidade (Leff, 2001; Capra, 1996; Morin, 2005), permitindo uma análise integrada entre aspectos técnicos, sociais e epistemológicos.

Além disso, a análise considerou a relação entre as características das espécies identificadas e as condições do espaço urbano, especialmente no que se refere à compatibilidade com a infraestrutura existente. Também foram observadas as intervenções realizadas pela população ao longo do tempo, permitindo uma leitura comparativa entre o planejamento inicial e a situação atual da arborização viária no município.

Resultados e Discussão

Os resultados indicaram uma arborização viária caracterizada por baixa diversidade florística e predominância de espécies exóticas, correspondendo a aproximadamente 63% dos indivíduos. A elevada concentração em poucas espécies, como *Poincianella pluviosa* e *Ligustrum lucidum*, ultrapassa os limites recomendados por Santamour (1990), comprometendo a resiliência ecológica do sistema urbano. Soma-se a isso um déficit arbóreo estimado em cerca de 60% e a ocorrência de conflitos em mais de 30% dos indivíduos, evidenciando fragilidades no planejamento e na gestão da arborização.

Além dos impactos ecológicos e estruturais, a baixa diversidade e o déficit arbóreo observados comprometem a capacidade adaptativa do município frente às mudanças climáticas. A redução da cobertura vegetal urbana limita a regulação térmica e a retenção de águas pluviais, aumentando a vulnerabilidade da cidade a eventos climáticos extremos, conforme destacado por relatórios internacionais sobre mudanças climáticas (IPCC, 2022), onde a arborização viária, quando planejada adequadamente, pode atuar como elemento fundamental na construção de cidades mais resilientes.

Concentração em poucas espécies reduz a heterogeneidade da arborização urbana, tornando o sistema mais suscetível a impactos ambientais e fitossanitários. Além disso, a predominância de espécies exóticas pode comprometer a interação com a fauna local, reduzindo o potencial ecológico da arborização e limitando seus benefícios ambientais.

A predominância de espécies exóticas indica não apenas uma escolha baseada na disponibilidade de mudas, mas também a ausência de diretrizes técnicas consolidadas no período de implantação da arborização, comprometendo a biodiversidade local e a capacidade de adaptação do sistema arbóreo.

O caso estudado do Jardim Santa Terezinha permitiu compreender a arborização como processo social e dinâmico. O planejamento proposto no levantamento foi acompanhado por ações de participação comunitária, indicando, naquele momento, um avanço na integração entre conhecimento técnico e envolvimento da população. Contudo, a análise atual da avenida central do bairro revelou situações que fugiram do controle técnico.

Essa situação evidenciou uma lacuna entre o planejamento técnico e sua efetiva apropriação pela população. A ausência de processos educativos contínuos impede a consolidação de práticas adequadas, fazendo com que a arborização urbana seja constantemente redefinida por intervenções individuais, muitas vezes incompatíveis com as condições do espaço urbano. Nesse sentido, a educação ambiental assume papel fundamental na mediação entre conhecimento técnico e prática social.

De um lado da via, a espécie *Bauhinia sp*. apresentou desenvolvimento satisfatório, sem conflitos com a infraestrutura urbana, evidenciando a adequação da escolha técnica. Em contraste, a implantação do *Tibouchina sp.* sob a rede elétrica não se mostrou sustentável, resultando na não permanência dos indivíduos, o que reforça a importância da compatibilização vegetal e espaço disponível.

Observou-se ainda a intervenção posterior da população, que passou a realizar plantios sem orientação técnica, incluindo espécies incompatíveis com a infraestrutura, como exemplares de grande porte, a exemplo da *Terminalia catappa.* Esse processo evidencia que a participação comunitária, quando dissociada de processos contínuos de educação ambiental e acompanhamento técnico, tende a reproduzir práticas inadequadas, comprometendo o planejamento inicial.

Destaca-se ainda que a arborização urbana, quando integrada a políticas públicas e ações educativas, contribui diretamente para estratégias de adaptação climática, fortalecendo a resiliência das cidades frente aos impactos das mudanças ambientais. A incorporação dessa perspectiva amplia o papel da arborização, que passa a ser compreendida não apenas como elemento paisagístico, mas como componente essencial da sustentabilidade urbana.

Sob a ótica de Edgar Morin, a arborização urbana não pode ser compreendida de forma isolada, uma vez que envolve interações entre fatores ecológicos, sociais e institucionais. A persistência de escolhas inadequadas reflete, nesse sentido, uma racionalidade ambiental limitada, conforme discutido por Enrique Leff, evidenciando a dissociação entre conhecimento técnico e práticas sociais. De forma complementar, a abordagem sistêmica de Fritjof Capra reforça que a sustentabilidade da arborização depende da qualidade dessas interações, e não apenas de intervenções pontuais.

Assim, a experiência analisada demonstrou que a educação ambiental deve ser compreendida como processo contínuo e estruturante, sendo fundamental para a manutenção e consolidação das ações de planejamento urbano.

Considerações Finais

A análise realizada evidencia que a arborização viária de Campina da Lagoa apresenta limitações decorrentes da ausência de planejamento integrado e da insuficiente incorporação da educação ambiental nas políticas públicas. Embora o marco regulatório de 2018 represente um avanço significativo, sua efetividade depende da articulação entre conhecimento técnico, gestão pública e processos educativos contínuos.

A experiência analisada demonstra, de forma concreta, que a participação comunitária, embora essencial, não é suficiente quando não acompanhada de formação e acompanhamento técnico permanentes. O desenvolvimento adequado de espécies

compatíveis contrasta com a não permanência de espécies inadequadas e com a introdução espontânea de árvores incompatíveis pela população, evidenciando a fragilidade das intervenções quando não sustentadas por uma base educativa consistente.

Destaca-se ainda que a experiência analisada evidencia a importância do monitoramento contínuo das ações de arborização urbana, bem como da implementação de estratégias educativas permanentes. A ausência desses elementos tende a comprometer a continuidade e a efetividade das intervenções propostas, reforçando a necessidade de políticas públicas integradas.

Conclui-se que a arborização urbana deve ser compreendida como sistema socioambiental complexo, no qual decisões técnicas, práticas sociais e políticas públicas se inter-relacionam. Nesse contexto, a educação ambiental assume papel estratégico ao possibilitar a construção de uma racionalidade ambiental integrada e de práticas sociais mais conscientes e compatíveis com o ambiente urbano.

Agradecimentos

Agradecimento ao Programa de Pós Graduação em Desenvolvimento Rural Sustentável (UNIOESTE), à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado concedida e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela Bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora - DT.

Referências Bibliográficas

BIONDI, D.; ALTHAUS, M. *Arborização urbana: planejamento e manejo*. Curitiba: UFPR, 2005.

BRASIL. Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. *Estatuto da Cidade*. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 11 jul. 2001.

BRASIL. Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999. *Dispõe sobre a educação ambiental e institui a Política Nacional de Educação Ambiental*. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 28 abr. 1999.

BRASIL. Decreto nº 4.281, de 25 de junho de 2002. *Regulamenta a Lei nº 9.795/1999*. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 26 jun. 2002.

CAMPINA DA LAGOA. Lei Municipal nº 017/2018. Dispõe sobre a arborização urbana no município de Campina da Lagoa. Campina da Lagoa, PR, 2018.

CAPRA, Fritjof. *A teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos*. São Paulo: Cultrix, 1996.

CANSIAN, Danielli Casarin Vilela. *Análise da arborização viária a partir de levantamento qualiquantitativo em Campina da Lagoa/PR*. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2013.

IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

JACOBI, Pedro. Educação ambiental, cidadania e sustentabilidade. *Cadernos de Pesquisa*, São Paulo, n. 118, p. 189–206, 2003.

LEFF, Enrique. *Epistemologia ambiental*. São Paulo: Cortez, 2001.

LOUREIRO, Carlos Frederico Bernardo. *Trajetória e fundamentos da educação ambiental*. São Paulo: Cortez, 2004.

MILANO, Miguel Serediuk; DALCIN, Edison. *Arborização urbana*. Porto Alegre: UFRGS, 2000.

MORIN, Edgar. *Introdução ao pensamento complexo*. Porto Alegre: Sulina, 2005.

SANTAMOUR, Frank S. Trees for urban planting: diversity, uniformity, and common sense. In: *PROCEEDINGS OF THE METROPOLITAN TREE IMPROVEMENT ALLIANCE (METRIA)*. 7., 1990. Proceedings [...]. Washington, DC: USDA Forest Service, 1990. p. 57–65.

ECOLAZER RESORT FLUTUANTE: EDUCAÇÃO AMBIENTAL, SUSTENTABILIDADE E EMPREENDEDORISMO NA AMAZÔNIA.

1 Alcilene Bezerra, 2 Maricélia Messias Cantanhêde dos Santos
[1] Ecolazer Resort Flutuante, e-mail: Ecolazer.ro@gmail.com; [2] Faculdade da Amazônia - UNAMA, e-mail: mariceliapvhro@gmail.com

Palavras-chave: Educação ambiental; Sustentabilidade; Empreendedorismo

Introdução

A Amazônia brasileira constitui um dos mais relevantes patrimônios naturais do planeta, desempenhando papel fundamental na regulação climática global, na manutenção da biodiversidade e na provisão de serviços ecossistêmicos essenciais. Entretanto, a região enfrenta desafios crescentes relacionados à exploração inadequada dos recursos naturais, ao desmatamento, à poluição e à desigualdade socioeconômica.

No estado de Rondônia, tais desafios são intensificados pela histórica expansão agropecuária, pela pressão sobre os recursos naturais e pela ainda incipiente estruturação do turismo ecológico como vetor de desenvolvimento sustentável. Apesar do elevado potencial natural, observa-se a ausência de políticas consolidadas de fomento ao ecoturismo, limitada qualificação profissional no setor, baixa visibilidade dos atrativos naturais e deficiência em infraestrutura adequada, fatores que restringem a consolidação de um turismo ambiental estruturado e economicamente relevante.

Nesse cenário, torna-se imprescindível a construção de modelos de desenvolvimento que conciliem crescimento econômico, inclusão social e preservação ambiental. A educação ambiental, associada a práticas sustentáveis e ao empreendedorismo responsável, apresenta-se como uma estratégia eficaz para a promoção de mudanças estruturais e comportamentais na sociedade.

O Ecolazer Resort Flutuante surge como uma iniciativa inovadora nesse contexto, ao integrar turismo sustentável, práticas ecológicas e ações educativas em um ambiente imersivo na Amazônia, localizado em Candeias do Jamari, Rondônia, promovendo experiências que articulam conhecimento, conscientização e geração de renda local. Este trabalho teve como objetivo analisar o programa de Educação Ambiental e Sustentabilidade do Ecolazer Resort Flutuante como modelo de empreendimento sustentável, potencial educativo e impacto socioeconômico, avaliando suas práticas ambientais, estratégias de educação ambiental e contribuição para o desenvolvimento local no município de Candeias do Jamari.

Materiais e Métodos

A pesquisa caracterizou-se como qualitativa, de natureza exploratória e descritiva com abordagem analítico-interpretativa, tendo como objeto de estudo o Ecolazer Resort Flutuante, localizado no município de Candeias do Jamari, estado de Rondônia. A escolha metodológica fundamenta-se na necessidade de compreender, em profundidade, as interações entre educação ambiental, práticas sustentáveis e empreendedorismo no contexto amazônico, considerando suas dimensões socioeconômicas e ambientais.

O delineamento metodológico foi estruturado a partir de três eixos principais: revisão de literatura, análise documental e observação sistemática das práticas institucionais do empreendimento. A revisão bibliográfica contemplou obras clássicas e contemporâneas nas áreas de educação ambiental, desenvolvimento sustentável, economia verde e empreendedorismo sustentável, com ênfase em autores que discutem a relação entre sustentabilidade e desenvolvimento regional. Foram também considerados dispositivos legais e normativos, especialmente a Política Nacional de Educação Ambiental (Lei nº 9.795/1999), bem como documentos internacionais como a Agenda 2030 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que orientam práticas sustentáveis em escala global.

A análise documental envolveu o exame de registros institucionais, materiais informativos, protocolos operacionais e diretrizes organizacionais do empreendimento, permitindo identificar as estratégias adotadas em relação à gestão ambiental, à educação não formal e à inserção socioeconômica local. Complementarmente, realizou-se observação sistemática in loco, de caráter não participante, com foco nas rotinas operacionais, fluxos de atendimento aos visitantes, práticas de manejo ambiental e dinâmica de trabalho dos colaboradores. Essa etapa permitiu captar aspectos práticos da operacionalização do modelo sustentável adotado pelo Ecolazer Resort Flutuante.

Para a análise da dimensão socioeconômica, foram considerados indicadores qualitativos relacionados à geração de emprego, inclusão da mão de obra local, diversificação de atividades produtivas e impacto na economia do município de Candeias do Jamari. Avaliou-se, ainda, o papel do empreendimento na qualificação profissional e no fortalecimento de cadeias produtivas locais, especialmente no setor de serviços e turismo.

Os dados obtidos foram organizados e analisados por meio de técnica de análise de conteúdo, permitindo a categorização das informações em eixos temáticos previamente definidos: educação ambiental, práticas sustentáveis e empreendedorismo. Essa abordagem possibilitou a identificação de padrões, relações e contribuições do empreendimento para o desenvolvimento sustentável regional (BARDIN, 2011). Ressalta-se que a pesquisa respeitou princípios éticos, utilizando exclusivamente informações institucionais e observacionais, sem exposição de dados sensíveis ou identificação individual de colaboradores. A triangulação entre revisão teórica, análise documental e observação empírica conferiu ao estudo, garantia de consistência, validade interpretativa e confiabilidade dos resultados apresentados.

Resultados e Discussão

A análise dos dados obtidos evidenciou que o Ecolazer Resort Flutuante desempenha papel relevante como agente de integração entre educação ambiental, sustentabilidade e desenvolvimento socioeconômico no contexto amazônico no município de Candeias do Jamari.

O Ecolazer Resort Flutuante está localizado as margens serenas do Rio Preto, na zona rural de Candeias do Jamari, ergue-se ou melhor, flutua como uma expressão sensível de integração entre o ser humano e a natureza amazônica. O percurso fluvial de curta duração, já inaugura a experiência: um convite à contemplação da paisagem ribeirinha, onde a brisa, os sons naturais e o movimento das águas anunciam a transição do cotidiano para um espaço de reconexão.

Mais do que uma estrutura turística, o empreendimento configura-se como um ambiente simbólico e sensorial, concebido a partir de uma lógica que alia conforto, sustentabilidade e valorização do território amazônico. Distribuído em dois pavimentos, o espaço articula áreas de convivência, gastronomia e hospedagem de forma harmônica com o ambiente natural. No piso inferior, destacam-se o restaurante panorâmico, o espaço gourmet e as áreas de lazer integradas ao rio, enquanto o pavimento superior abriga ambientes de descanso e contemplação, incluindo suítes projetadas para oferecer acolhimento, privacidade e vista privilegiada da paisagem.

As acomodações, inspiradas em elementos da flora amazônica, refletem uma proposta estética e conceitual que resgata identidades regionais, ao mesmo tempo em que assegura conforto contemporâneo. O serviço de bar e restaurante valoriza a culinária local, transformando a alimentação em uma experiência cultural e sensorial. As atividades ofertadas — como banho de rio, passeios de caiaque e espaços lúdicos promovem a interação direta com o meio ambiente, estimulando práticas de lazer sustentáveis e educativas.

Nesse contexto, o Ecolazer Resort Flutuante transcende a ideia de hospedagem convencional, constituindo-se como um espaço de vivência ecológica, descanso e sensibilização ambiental que materializa, em sua concepção e funcionamento, a possibilidade de conciliar turismo, bem-estar e respeito à dinâmica natural da Amazônia, oferecendo ao visitante não apenas um destino, mas uma experiência imersiva marcada pela contemplação, pelo cuidado e pela reconexão com a essência da vida.

A partir da categorização dos dados nos três eixos temáticos: educação ambiental, práticas sustentáveis e empreendedorismo foi possível identificar padrões consistentes que demonstram a efetividade do modelo adotado pelo empreendimento.

No eixo da educação ambiental, verificou-se que o Ecolazer atua como um espaço não formal de ensino, promovendo experiências imersivas que favorecem a sensibilização ecológica dos visitantes. A vivência direta com o ambiente amazônico, associada a práticas orientadas de uso consciente dos recursos naturais, contribui para a construção de valores ambientais e para o desenvolvimento de uma consciência crítica em relação à preservação dos ecossistemas. Diferentemente de abordagens exclusivamente teóricas, a metodologia experiencial adotada pelo empreendimento amplia o potencial de internalização dos conceitos de sustentabilidade, tornando o processo educativo mais significativo e efetivo.

No que se refere às práticas sustentáveis, observou-se a implementação de estratégias voltadas à redução dos impactos ambientais, tais como o uso racional da água, o controle do consumo energético, o manejo adequado de resíduos sólidos e a organização de rotinas operacionais alinhadas à conservação ambiental. Essas práticas evidenciam a aplicação concreta dos princípios da sustentabilidade, demonstrando que é possível compatibilizar atividades econômicas com a preservação ambiental na Amazônia. Além disso, a operação flutuante do empreendimento representa uma alternativa adaptada às características regionais, reduzindo impactos estruturais sobre o solo e permitindo maior integração com o ambiente natural.

No eixo do empreendedorismo, os resultados indicam que o Ecolazer Resort Flutuante contribui significativamente para a geração de emprego e renda, especialmente por meio da inserção da mão de obra local nas atividades operacionais do empreendimento. Foram identificadas oportunidades de trabalho em diferentes áreas, incluindo transporte fluvial, recepção, alimentação, manutenção e suporte logístico, promovendo a inclusão produtiva e o fortalecimento da economia local. Essa dinâmica contribui para a redução da dependência de atividades econômicas tradicionais e para a diversificação das fontes de renda no município.

O empreendimento atua como catalisador do turismo ecológico em Rondônia, um setor ainda pouco estruturado, mas com elevado potencial de crescimento. Ao oferecer uma experiência turística diferenciada, baseada em princípios sustentáveis e educativos, o Ecolazer contribui para a valorização dos recursos naturais da região e para o aumento da visibilidade do município de Candeias do Jamari como destino turístico. Tal cenário reforça a importância de iniciativas privadas inovadoras na indução de novos arranjos produtivos locais.

A integração entre os três eixos analisados evidencia que o modelo do Ecolazer Resort Flutuante não apenas promove práticas sustentáveis isoladas, mas estrutura um sistema articulado de desenvolvimento, no qual educação, meio ambiente e economia se retroalimentam de forma positiva. Essa inter-relação potencializa os impactos do empreendimento, ampliando sua contribuição para o desenvolvimento sustentável regional.

Considerações Finais

Os resultados deste estudo permitiram concluir que o Ecolazer Resort Flutuante constitui uma iniciativa relevante e inovadora no contexto da Amazônia, ao integrar de forma articulada educação ambiental, práticas sustentáveis e empreendedorismo. O empreendimento demonstra que é possível desenvolver atividades econômicas viáveis e, ao mesmo tempo, promover a conservação ambiental e a inclusão social, configurando-se como um modelo de referência para o desenvolvimento sustentável na região.

No contexto específico de Rondônia, onde o turismo ecológico ainda apresenta limitações estruturais e baixa consolidação como atividade econômica estratégica, o Ecolazer destaca-se como um agente indutor de desenvolvimento socioeconômico. Sua atuação contribui para a geração de emprego e renda, para a valorização da mão de obra local e para a diversificação das atividades produtivas, aspectos fundamentais para o fortalecimento da economia de municípios como Candeias do Jamari, destacando o papel da educação ambiental como instrumento de transformação social, ao promover experiências que estimulam a conscientização e a mudança de comportamento em relação ao meio ambiente.

A integração entre teoria e prática, proporcionada pelo modelo experiencial adotado, amplia o alcance e a efetividade das ações educativas, contribuindo para a formação de cidadãos mais conscientes e comprometidos com a sustentabilidade.

Do ponto de vista científico e aplicado, o estudo evidencia o potencial de negócios sustentáveis como ferramentas estratégicas para o enfrentamento dos desafios ambientais contemporâneos, especialmente em regiões de alta sensibilidade ecológica como a Amazônia. A replicabilidade do modelo adotado pelo Ecolazer Resort Flutuante representa uma oportunidade para expansão de iniciativas semelhantes, capazes de gerar impactos positivos em diferentes contextos regionais.

Por fim, destaca-se a necessidade de fortalecimento de políticas públicas voltadas ao fomento do turismo sustentável, à qualificação profissional e ao incentivo ao empreendedorismo verde, de modo a potencializar iniciativas como o Ecolazer e ampliar seus impactos. Recomenda-se, ainda, a realização de estudos futuros com abordagem quantitativa, visando mensurar de forma mais precisa os impactos econômicos, sociais e ambientais do empreendimento, contribuindo para o aprimoramento de estratégias de desenvolvimento sustentável na Amazônia.

Referências Bibliográficas

BARDIN, Laurence. Análise de conteúdo. São Paulo: Edições 70, 2011.

BENI, Mário Carlos. Análise estrutural do turismo. 14. ed. São Paulo: SENAC, 2019.

BRASIL. Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999. Dispõe sobre a educação ambiental e institui a Política Nacional de Educação Ambiental. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 28 abr. 1999.

BRASIL. Ministério do Turismo. Ecoturismo: orientações básicas. Brasília: MTur, 2010.

DIAS, Reinaldo. Turismo sustentável e meio ambiente. São Paulo: Atlas, 2008.

ELKINGTON, John. Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st century business. Oxford: Capstone, 1997.

FREEMAN, R. Edward. Strategic management: a stakeholder approach. Boston: Pitman, 1984.

HONEY, Martha. Ecotourism and sustainable development: who owns paradise? 2. ed. Washington: Island Press, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Cidades e Estados: Candeias do Jamari – RO. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://www.ibge.gov.br
. Acesso em: 04 maio 2026.

LEFF, Enrique. Saber ambiental: sustentabilidade, racionalidade, complexidade, poder. Petrópolis: Vozes, 2001.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. Nova York: ONU, 2015.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DO TURISMO (OMT). Turismo sustentável para o desenvolvimento. Madrid: OMT, 2018.

PHILIPPI JR., Arlindo; PELICIONI, Maria Cecília Focesi (org.). Educação ambiental e sustentabilidade. Barueri: Manole, 2014.

RUSCHMANN, Doris. Turismo e planejamento sustentável: a proteção do meio ambiente. Campinas: Papirus, 2016.

SACHS, Ignacy. Caminhos para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: Garamond, 2009.

SEBRAE. Turismo sustentável: orientações para pequenos negócios. Brasília: SEBRAE, 2021.

VEIGA, José Eli da. Desenvolvimento sustentável: o desafio do século XXI. Rio de Janeiro: Garamond, 2010.

WEARING, Stephen; NEIL, John. Ecotourism: impacts, potentials and possibilities. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2009.

EDUCAÇÃO PARA REDUÇÃO DE RISCOS DE DESASTRES (ERRD): UMA ANÁLISE DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA RECENTE (2021–2026)

1Mayra Cristina Soares Menezes, 2Jéssica Alves Ferreira Silva
1 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: mayra.menezes@ufu.br; 2 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: jessicalves@ufu.br

Palavras-chave: Estado da arte; Gestão de riscos; Educação ambiental.

Introdução

Segundo Matsue (2022) a ocorrência de desastres no Brasil vem apresentando um aumento desde 1960. Ocorrências como secas, enxurradas, inundações, deslizamentos, entre outros fenômenos, têm sido cada vez mais frequentes. Grandes tragédias recentes, como as enchentes que atingiram o Rio Grande do Sul em 2024, vem chamando a atenção para a necessidade de intensificar as discussões sobre a Educação Redução de Riscos de Desastres (ERRD) no contexto brasileiro.

Dessa forma, a ERRD constitui um meio pelo qual os sujeitos recebem incentivos para compreender as causas e consequências dos desastres, de modo que possam agir preventivamente na mitigação e na resposta a situações de crise (Lucena et al. 2024). Essa prática se manifesta como uma busca por recursos que auxiliem a sociedade na troca de saberes diante da demanda por RRD (Motta et al., 2022).

Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi analisar a produção de artigos sobre a ERRD nas bases de dados Periódicos CAPES e *Open Access Scientific Information System* (Oasis), entre janeiro de 2021 e abril de 2026, buscando identificar as principais características e lacunas dos trabalhos publicados nos últimos cinco anos.

Metodologia

Os procedimentos metodológicos utilizados para a execução deste trabalho foram inspirados na pesquisa de estado da arte feita por Matsuo et al (2020), onde os autores analisaram uma série de artigos sobre Redução de Riscos de Desastres (RRD) entre os anos de 1981 e 2018. Segundo Ferreira (2002), as pesquisas de estado da arte possuem caráter bibliográfico e buscam mapear e discutir as produções acadêmicas de um determinado campo.

Para este trabalho, optou-se pela utilização do Periódicos CAPES e do *Open Access Scientific Information System* (Oasis) como bases de consulta, devido à quantidade de trabalhos disponíveis em ambas as plataformas. O levantamento foi realizado a partir de uma busca exata pela expressão "*educação para redução de riscos e desastres"*. Para garantir a sensibilidade do levantamento, realizou-se também o cruzamento dos descritores "educação" e "desastres". Após esse levantamento geral, foi feita uma filtragem dos artigos a partir da leitura dos resumos, resultando em 20 artigos selecionados. Nessa etapa, considerou-se apenas os trabalhos que tivessem relação direta com a ERRD, excluindo trabalhos que tratassem dos termos de forma isolada ou fora do contexto educativo. A partir disso, os artigos foram categorizados considerando aspectos como ano de publicação, tipo de instituição, eixo temático e tipos de desastres.

Resultados e discussão

Conforme exposto na Tabela 1, o Periódicos CAPES apresentou o maior número de publicações, com 13 artigos. Desses trabalhos, 10 foram publicados por pesquisadores de Instituições de Ensino Superior (IES) públicas, dois trabalhos foram publicados por Não IES, e apenas um por IES privada. Em relação à consulta feita no Oasis, foram encontrados sete artigos, todos publicados por autores de IES públicas. O parâmetro utilizado para definir esse critério foi a instituição à qual o primeiro autor pertence.

	Oasis	Periódicos CAPES	Total
IES Públicas	7	10	17
IES Privadas	0	1	1
Não IES	0	2	2

Tabela 01: Quantidade de artigos por tipo de instituição.
Fonte: Os autores (2026)

No que diz respeito ao ano de publicação, 2023 foi o ano com mais artigos publicados, com um total de 8. Dentro do recorte temporal estabelecido não houveram publicações encontradas em nenhum dos periódicos no ano de 2026, como indicado na Tabela 2.

Ano	Periódicos CAPES	Oasis	Total
2021	0	1	1
2022	3	1	4
2023	4	4	8
2024	5	1	6
2025	1	0	1
2026	**0**	**0**	**0**

Tabela 02: Número de artigos publicados em ambos os periódicos entre 2021-2026.
Fonte: Os autores (2026)

Quanto à natureza dos desastres, os trabalhos foram distribuídos em cinco categorias, sendo elas: hidrológicos, geológicos, climatológicos, hidrológicos e geológicos, e não especificados. Um total de nove estudos não indicaram o tipo de desastre, sendo então categorizados como não especificados. Quatro estudos entraram na categoria de desastres hidrológicos, três estudos em desastres geológicos e dois em ambas as categorias de desastre hidrológico e geológico, e climatológicos.
Os trabalhos foram agrupados em eixos temáticos, com o objetivo de mapear as principais tendências dentro do campo da ERRD nos últimos cinco anos. As categorias foram: Educação Ambiental e Gestão de Riscos, Percepção de Riscos, Programas de ERRD, Desenvolvimento de Metodologias de ERRD, Educação Inclusiva e Formação de Profissionais.

Eixos temáticos	Número de publicações	Artigos encontrados
Educação Ambiental e Gestão de Riscos	4	Gonzalez et al (2023); Leite, Filgueira e Iwama (2025); Kobiyama et al (2023); Lucena et al (2024)
Desenvolvimento de Metodologias de ERRD	5	Mendonça e Freitas (2021); Feitosa e Silva (2024); Lucena et al (2024); Silva e Araújo (2023); Zanin et al (2023)
Programas de ERRD	5	Camargo et al (2022); Gobbo e Abdala (2023); Santos e Castro (2022); Bizzotto, Kobiyama e Campagnolo (2023); Cavalcanti et al (2024)
Educação Inclusiva	1	Gomes, Trajber e Marchezini (2022)
Formação de Professores e Profissionais	2	Fonseca, Ferentz e Pinheiro (2023); Cruz, Freitas e Loureiro (2024)
Percepção de Riscos	3	Silva, Santos e Coltri (2024); Pereira et al (2022); Silva, Kobiyama e Panceri (2023)

Tabela 03: Categorização dos artigos em eixos temáticos.
Fonte: Os autores (2026)

A partir disso, é possível observar que os eixos temáticos “Educação Ambiental e Gestão de Riscos”, “Programas de ERRD” e “Desenvolvimento de Metodologias de ERRD” possuem uma concentração maior de artigos. Esse resultado evidencia uma concentração da produção acadêmica nesses três eixos na centralidade das discussões sobre ERRD, principalmente no que diz respeito a implementação de programas voltados para a ERRD. Contudo, isso também revela uma distribuição desigual entre as temáticas, indicando a existência de lacunas em outros aspectos ainda pouco explorados pela literatura, como a formação de profissionais e professores, e a educação inclusiva dentro dos estudos de ERRD.

Considerações finais

Com base na análise realizada, observa-se que a produção científica sobre ERRD, no recorte investigado, concentra-se sobretudo em temas relacionados à Educação Ambiental e Gestão de Riscos, aos Programas de ERRD e Desenvolvimento de Metodologias de ERRD. Esse padrão sugere que o campo vem se consolidando em torno de estratégias de implementação e de organização pedagógica, mas ainda apresenta distribuição desigual entre as temáticas abordadas. Tal assimetria indica a necessidade de ampliar investigações em dimensões ainda pouco exploradas, especialmente na formação continuada de professores, na educação inclusiva e na interface entre ERRD e práticas escolares territorializadas.

Nesse sentido, a escola permanece como espaço estratégico de mediação entre conhecimento científico, formação cidadã e atuação comunitária, sobretudo por seu potencial de prevenção articular, sensibilização e construção de cultura de

redução de riscos. Além disso, a inclusão de pessoas com deficiência nos processos educativos voltados para o ERRD deve ser compreendida como requisito para uma abordagem social, democrática e cidadã, e não apenas como um aspecto complementar da agenda educacional. Assim, o fortalecimento da ERRD depende não apenas da ampliação de estudos, mas também da qualificação das práticas formativas e da incorporação de perspectivas inclusivas, interdisciplinares e socialmente comprometidas.

Agradecimentos

As autoras gostariam de agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e a Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

CAMARGO, A. C. de; KILLIAN, M. S.; ABREU, N. A. P. de; SOUZA, T. S. J. A educação como ferramenta para redução de vulnerabilidades de desastres: oportunidades de ações dos engenheiros sem fronteiras. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 8, n. 6, p. 48481–48492, 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n6-383. Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/49790 . Acesso em: 2 maio 2026.

CAVALCANTI, E. R.; SUASSUNA, C.; PEDROSA, F.; LIMA FILHO, M. Áreas de morros da cidade do Recife (Pernambuco, Brasil): a importância da governança adaptativa diante dos riscos geológicos. **Territorium**, [S. l.], n. 31, p. 37–53, 2024. DOI: 10.14195/1647-7723_31-2_3. Acesso em: 2 maio 2026.
CRUZ, Marina Alves Novaes e; FREITAS, Leonardo Esteves de; LOUREIRO, Carlos Frederico Bernardo. A educação diferenciada e a formação de professores que atuam em comunidades caiçaras: ação fundamental para a redução de riscos e desastres. **Territorium**, [S. l.], n. esp. 31, p. 25–43, 2024. DOI: 10.14195/1647-7723_31-extra1_2. Disponível em: https://territorium.riscos.pt/numeros-publicados/. Acesso em: 2 maio 2026.

FEITOSA, I. C. E. SILVA; SILVA, I. H. C. Pedagogical proposal for natural disaster prevention: teaching landforms through spatial analysis of watersheds/Proposta pedagogica para a prevenção de desastres naturais: ensino do relevo a partir da análise espacial por bacias hidrográficas. William Morris Davis - **Revista de Geomorfologia,** [S. l.], v. 5, n. 3, p. 219–236, 2024. DOI: 10.48025/ISSN2675-6900.v5n3.2024.671. Disponível em: //williammorrisdavis.uvanet.br/index.php/revistageomorfologia/article/view/338. Acesso em: 2 maio. 2026.
FERREIRA, N. S. A. As pesquisas denominadas “Estado da Arte”. **Educação & Sociedade**, v.23, n.79, p.257-272, ago. 2002.

FONSECA, M. N.; GARCIAS, C. M. Os desafios da comunicação na redução do risco de inundação. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 22, n. 81, p. 1–14, 2021. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/55089. Acesso em: 2 maio 2026.
FONSECA, Murilo Noli da; FERENTZ, Larissa Maria da Silva; PINHEIRO, Eduardo Gomes. Desenvolvimento de capacidades para redução de risco de desastres no Paraná, Brasil. **Estudos Geográficos**, [S. l.], v. 20, n. 3, 2022.

GOMES, Francisco Bizzotto; KOBIYAMA, Masato; CAMPAGNOLO, Karla. Programa de educação ambiental para redução do risco de desastres em barragens de mineração com foco no estudo de caso de Brumadinho/MG. **Revista Geonorte**, [S. l.], v. 14, n. 46, p. 64–89, 2023. DOI: 10.21170/geonorte.2023.v.14.n.46.64.89. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/252334. Acesso em: 2 maio 2026.
GOMES, Giselly Rodrigues das Neves Silva; TRAJBER, Rachel; MARCHEZINI, Victor. Clima, desastres e a ciência cidadã na convivência entre o ver e o não ver. **Ambiente & Educação: Revista de Educação Ambiental**, *[S. l.]*, v. 27, n. 2, p. 1–24, 2022. DOI: 10.14295/ambeduc.v27i2.14735. Disponível em: https://periodicos.furg.br/ambeduc/article/view/14735. Acesso em: 2 maio. 2026.

GONZALEZ, Aline Costa; PEREIRA, Vilmar Alves; CARNIATTO, Irene; DALLA VALLE, Ana Carolina. Impacto dos desastres naturais em uma população do Sul do Brasil e a importância da Educação Ambiental para redução dos riscos. **REMEA - Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental**, [S. l.], v. 40, n. 1, p. 53–73, 2023. DOI: 10.14295/remea.v40i1.13935. Disponível em: https://periodicos.furg.br/remea/article/view/13935. Acesso em: 2 maio 2026.
Kobiyama, M. Maciel, J.G.F. Ruoso, E. G. Franck, A.G. Fagundes, M.R. Lições aprendidas com grandes desastres recentes causados por eventos hidrológicos extremos no Brasil. **Revista Geonorte,** V.14, N.46, p.115-142, 2023.

LEITE, Ana Paula Ribeiro de Hollanda; FILGUEIRA, Hamilcar José Almeida; IWAMA, Allan Yu. A importância da educação ambiental nas escolas para gestão de resíduos sólidos e redução de riscos de desastres. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, [S. l.], v. 20, n. 2, p. 249–274, 2025. DOI: 10.34024/revbea.2025.v20.19555. Disponível em: https://periodicos.unifesp.br/index.php/revbea/article/view/19555. Acesso em: 2 maio 2026.

LUCENA, R.; ALBUQUERQUE, D. L. de; ARAGÃO JÚNIOR, W. R.; SOUZA NETO, D. P. de; OLIVEIRA, M. S. de. Educação para a redução de riscos e desastres (ERRD): o papel da educação formal e não formal na sensibilização para

formação da consciência cidadã. **Revista Contemporânea**, [S. l.], v. 4, n. 7, p. e5224, 2024. DOI: 10.56083/RCV4N7-195. Disponível em: https://ojs.revistacontemporanea.com/ojs/index.php/home/article/view/5224. Acesso em: 2 maio 2026.
LUCENA, R.; COUTINHO, R. Q.; SILVA, B. Q. da; OLIVEIRA, M. S. de; SOUZA NETO, D. P. de; ARAGÃO JUNIOR, W. R.; HENRIQUE, H. M. Práticas educativas para redução de riscos de desastres. **Caderno Pedagógico,** [S. l.], v. 21, n. 6, p. e5058, 2024. DOI: 10.54033/cadpedv21n6-187. Disponível em: https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/5058. Acesso em: 2 maio. 2026.

MATSUO, Patricia Mie. **Práticas escolares de educação em redução de riscos e desastres socioambientais.** 2022. Tese (Doutorado em Ensino de Biologia) - Interunidades em Ensino de Ciências, University of São Paulo, São Paulo, 2022. doi:10.11606/T.81.2022.tde-07042025-110546. Acesso em: 2 maio 2026.
MATSUO, Patrícia Mie; SOUZA, Sandra Aparecida de Oliveira; SILVA, Rosana Louro Ferreira; TRAJBER, Rachel. Redução de risco de desastres na produção sobre educação ambiental: um panorama das pesquisas no Brasil. **Revista pesquisa em educação ambiental,** v. 14, n. 2, p. 57-71, 14 fev. 2019. Disponível em:https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/pesquisa/article/view/14275/11338. Acesso em: 2 maio 2026.

MENDONÇA, Marcos Barreto de; FREITAS, Alessandra Conde. Uma experiência de concepção de jogos pedagógicos para redução de riscos de desastres. **Revista Vértices**, *[S. l.]*, v. 23, n. 1, p. 299–314, 2021. DOI: 10.19180/1809-2667.v23n12021p299-314. Disponível em: https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/vertices/article/view/15896. Acesso em: 2 maio 2026. V

PEREIRA, Rafael da Silva Damasceno; SATO, Danilo Pereira; FERREIRA LUNA, Beatriz; DE SOUZA ALVES, Victoria Caroline; MATSUO, Patrícia Mie; IWAMA, Allan Yu; RAIMUNDO, Sidnei. Prevenir ou morrer na praia? Compartilhando a visão de docentes sobre a redução de riscos e desastres no litoral norte paulista. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, *[S. l.]*, v. 17, n. 6, p. 151–169, 2022. DOI: 10.34024/revbea.2022.v17.13510. Disponível em: https://periodicos.unifesp.br/index.php/revbea/article/view/13510. Acesso em: 2 maio. 2026.

SANTOS, Jaqueline dos; CASTRO, Kleber Silveira de. IMPLANTAÇÃO DO PROJETO DE DEFESA CIVIL "NAC-NUDEC": Proposta de prevenção em áreas de risco pelo CBMMG. **Vigiles**, Belo Horizonte, Brasil, v. 5, n. 1, p. 74–97, 2022. DOI: 10.56914/revistavigiles-2595-4229-v5n1-4. Disponível em: https://vigiles.bombeiros.mg.gov.br/index.php/cbmmg/article/view/60. Acesso em: 2 maio. 2026.

SILVA, A.R.C.; KOBIYAMA, M.; PANCERI, R. "Programa defesa civil na escola" nos municípios de Imbituba e Lauro Müller/SC: avaliação com alunos e professores. **Revista de Geografia** (Recife), v.38, n.3, p.154-179, 2021. DOI: 10.51359/2238- 6211.2021.248819. Disponível em: http://hdl.handle.net/10183/262846. Acesso em: 2 maio 2026.

SILVA, Ananda Ramos da; SANTOS, Vânia Maria Nunes dos; COLTRI, Priscila Pereira. Percepção de riscos de desastres entre alunos de escola pública: contribuições à Ciência Cidadã e à aprendizagem social. **Pro-Posições,** Campinas, SP, v. 35, p. e20240805BR, 2024. Disponível em: https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/proposic/article/view/8678487. Acesso em: 2 maio 2026.

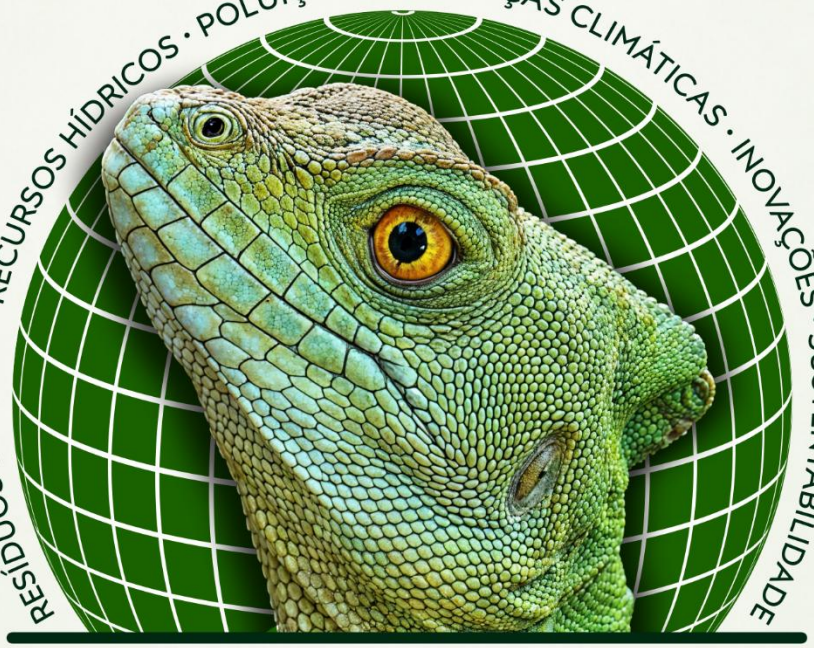
SILVA, Natanael José da; ARAÚJO, Maria Julieta Batista da Silva Gomes de. **O papel da educação geográfica na sensibilização dos riscos socioambientais urbanos no município de Jacuípe, Alagoas**. 2023. 20 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Geografia) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, [S. l.], 2023. Disponível em: https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/handle/123456789/1731. Acesso em: 2 maio 2026.

TORRES DO PRADO GOBBO, Marcela Regina; ABDALA, Rachel Duarte. Prevenção de deslizamentos se aprende na escola: análise dos resultados do Projeto CEMADEN para a redução de riscos de desastres. **Perspectivas em Diálogo: Revista de Educação e Sociedade**, *[S. l.]*, v. 10, n. 25, p. 200–222, 2023. DOI: 10.55028/pdres.v10i25.18807. Disponível em: https://periodicos.ufms.br/index.php/persdia/article/view/18807. Acesso em: 2 maio 2026.

ZANIN, Gustavo Domingos; MARINHO, Cláudio; GIAROLA, Lucas Luan; SILVA, Rafael. Espaço geográfico digital (GEODIGI): tecnologias educacionais de aprendizagem e educação para redução de riscos de desastre. **Revista Geoinga**, [S. l.], v. 15, n. 2, 2023. DOI: 10.4025/geoinga.v15i2.65544. Disponível em: https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/Geoinga/article/view/65544. Acesso em: 2 maio 2026.

ÁREA TEMÁTICA 8

ENERGIAS RENOVÁVEIS



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE
ENGENHARIA AMBIENTAL

HARMONIZED LIFE CYCLE ASSESSMENT OF COMBUSTION AND GASIFICATION PATHWAYS FOR BIOELECTRICITY FROM SUGARCANE BAGASSE

1 Fabiana de Oliveira Ramos, 2 Artur Jorge de Jesus Gonçalves, 2 Laís Fabiana Serafini, 3 José Ramón Copa Rey, 4 Mylena Kellyn de Paula Rosetti, 4 Helton José Alves, 1 Ronney Arismel Mancebo Boloy

1 Federal Center for Technological Education Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), Rio de Janeiro, Brazil ,e-mail: fabiana.ramos@aluno.cefet-rj.br, ronney.boloy@cefet-rj.br; 2 CIMO, LA SusTEC, Polytechnic Institute of Bragança (IPB), Bragança, Portugal, e-mail:ajg@ipb.pt, lais.serafini@ipb.pt; 3 VALORIZA – Research Center for Endogenous Resource Valorization, Portalegre Polytechnic University (IPP), Portalegre, Portugal , e-mail: jose.rey@ipportalegre.pt; 4 Department of Engineering and Exact Sciences, Federal University of Parana (UFPR), Paraná, Brazil, e-mail: mylenarosetti@ufpr.br, helton.alves@ufpr.br.

Palavras-chave: Bioelectricity; Life Cycle Assessment; Sugarcane Bagasse; Gasification.

Introduction

The global transition toward a low-carbon energy matrix has reinforced the strategic role of the sugar-energy sector, particularly in countries such as Brazil, where sugarcane biorefineries enable the integrated production of biofuels, electricity, and high-value products (FREITAS et al., 2021; VANDENBERGHE et al., 2022). In this context, bioelectricity generation from sugarcane bagasse contributes to the renewable energy supply, reduces greenhouse gas emissions, and improves resource efficiency (KABEYI; OLANREWAJU, 2022; MEGÍA et al., 2021).

Despite these advantages, conventional cogeneration systems based on direct bagasse combustion still face significant thermodynamic and environmental limitations, including low electrical efficiency, high internal energy demand, and emissions of nitrogen oxides and particulate matter (BAHADORI et al., 2014; FIORANELLI; BIZZO, 2023; PARASCANU et al., 2021). These constraints reduce the overall environmental performance of bioenergy systems and limit their potential to contribute to low-carbon energy transitions.

In this scenario, biomass gasification has emerged as a promising alternative, offering higher energy efficiency, greater process flexibility, and improved integration with advanced power cycles, thereby increasing electricity generation and potential environmental benefits (LI et al., 2023; BRESSANIN et al., 2021). However, evaluating these technological improvements requires a systemic approach that captures indirect impacts and trade-offs across the entire production system.

Life Cycle Assessment (LCA) provides a framework for comprehensively evaluating the environmental impacts associated with different technological pathways (FINKBEINER et al., 2006). Nevertheless, previous comparative studies often present methodological inconsistencies in system boundaries, functional units, and background data, which can significantly influence results and limit the reliability of conclusions.

Therefore, this study aims to conduct a harmonized, process-consistent LCA to compare conventional combustion and gasification-based systems for bioelectricity generation from sugarcane bagasse, using consistent system boundaries, functional units, and inventory data representative of the Brazilian context.

Material and Methods

This study uses a process-based Life Cycle Assessment (LCA) to compare the environmental performance of two technological configurations for bioelectricity generation from sugarcane bagasse: a conventional cogeneration system based on direct combustion and an advanced biomass integrated gasification combined cycle (BIG-GT). The analysis follows ISO (International organization for Standardization) 14040 and ISO 14044 and is structured to ensure methodological consistency across all stages of the assessment (FINKBEINER et al., 2006; ISO, 2006).

A key contribution of this study is the implementation of a harmonized, process-consistent LCA framework in which system boundaries, functional units, and inventory datasets are aligned across both configurations. This approach minimizes methodological inconsistencies commonly observed in comparative studies and enables a more robust evaluation of technological performance.

The system boundaries are defined using a gate-to-gate approach, encompassing all processes from the availability of sugarcane bagasse at the industrial facility through electricity generation and export to the grid. This includes thermochemical conversion, steam generation, electricity production, and auxiliary operations. A gate-to-gate boundary is particularly suitable for isolating technological differences at the industrial conversion stage, where the main performance variations occur (FERDOUS et al., 2023; GAFFEY et al., 2024).

The functional unit is defined as 1 MJ of net electricity exported to the grid, ensuring comparability across systems by focusing on the useful energy delivered beyond internal consumption (AGHBASHLO et al., 2022; ESQUIAQUI et al., 2023).

The life cycle inventory (LCI) is based on primary data from detailed techno-operational studies representative of the Brazilian sugar-energy sector, specifically Fiomari (2004) for the conventional system and Rey (2018) for the gasification

configuration. These data are integrated with background datasets from Ecoinvent (WERNET et al., 2016) and LCA for Experts (SPHERA, 2023) to ensure consistency and completeness.

The life cycle impact assessment (LCIA) is conducted using the ReCiPe 2016 Midpoint (H) method, with key impact categories including climate change (GWP, excluding biogenic carbon), fine particulate matter formation (PMF), terrestrial acidification (TA), photochemical ozone formation for ecosystems (POF-ECO), photochemical ozone formation for human health (POF-HH), and freshwater consumption (FWC) (HUIJBREGTS et al., 2017; ARCENTALES-BASTIDAS et al., 2022).

To address multifunctionality, a system expansion approach with substitution is used, in which exported electricity is assumed to displace the average grid electricity mix. This methodological choice is central to the results, as environmental credits from avoided electricity production significantly influence overall impact values (ISO, 2006).

Additionally, a deterministic one-at-a-time (OAT) sensitivity analysis is conducted by varying electrical efficiency across ±10%, ±20%, and ±30%, enabling identification of key drivers of environmental performance and assessment of system robustness (GROEN et al., 2014; BEAGLE; BELMONT, 2019).

Results and Discussion

The results indicate that both technological configurations yield net environmental benefits, as evidenced by negative values across all impact categories. These outcomes are primarily driven by substituting conventional grid electricity, confirming that avoided electricity production plays a dominant role in shaping life cycle results in bioenergy systems that export surplus electricity (PARASCANU et al., 2021; BRESSANIN et al., 2021).

The gasification-based configuration consistently outperforms the conventional system across all evaluated impact categories, though the magnitude of improvement is modest. The largest reductions occur in POF-ECO and POF-HH, ranging from approximately 9% to 11%. Smaller improvements (around 2–3%) are observed for GWP, PMF, and TA, while FWC remains essentially unchanged between the two configurations. As shown in Figure 01, these results indicate that environmental performance is primarily governed by electricity export efficiency rather than intrinsic differences in direct process emissions, reinforcing findings reported in previous studies (BATLLE et al., 2022; REINA-GUZMÁN et al., 2025).

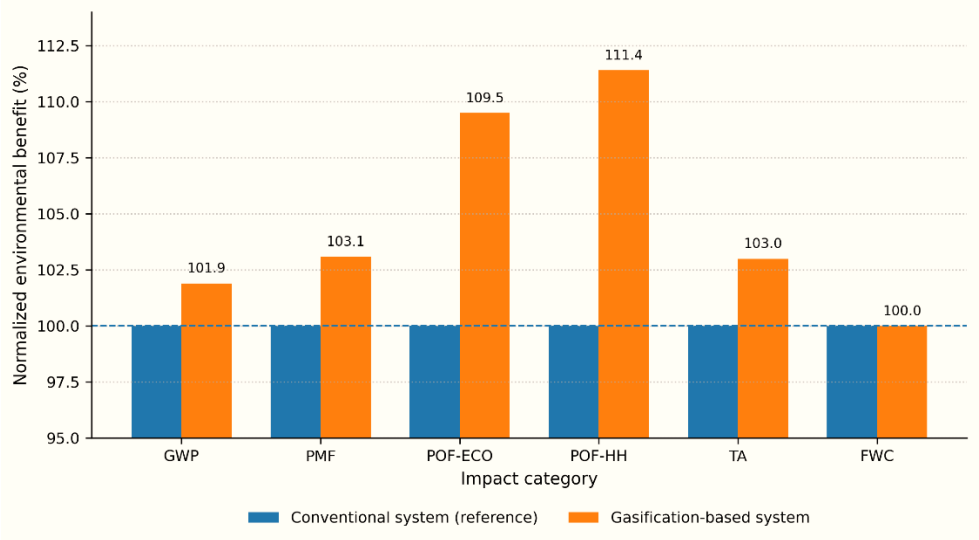


Figura 01: Normalized environmental impacts of the gasification-based configuration compared with the conventional system (reference = 100%).
Source: Elaborated by the authors based on the study data (2026).

The gasification system's superior performance is directly linked to its higher electrical efficiency (23.4% compared with 13.2% for the conventional system), which reduces biomass demand and internal energy consumption while increasing net electricity export. Consequently, environmental credits from electricity substitution are amplified, driving the observed differences between configurations (BRESSANIN et al., 2021; GARCIA; ENSINAS, 2024).

However, the results also show that improvements in thermodynamic efficiency do not necessarily translate into proportional reductions in environmental impacts. Instead, environmental burdens are redistributed across process units, shifting contributions from core conversion stages to auxiliary operations such as biomass drying, gas cleaning, and compression. This pattern reflects the growing structural complexity of advanced thermochemical systems and aligns with the concept of environmental burden shifting reported in the literature (OSMAN et al., 2021; PANDEY; SHARMA, 2024).

The contribution analysis reveals clear structural differences between the two configurations. In the conventional system, environmental impacts are highly concentrated in the combustion stage, confirming that direct biomass combustion is the dominant source of emissions, particularly nitrogen oxides and particulate matter (PARASCANU et al., 2021). In contrast,

the gasification system shows a more distributed impact profile, with multiple interconnected processes contributing to overall environmental performance, indicating a more complex and integrated system structure.

The sensitivity analysis further supports these findings, showing that the conventional system is significantly more sensitive to operational variations, whereas the gasification system is more robust. This behavior is associated with the gasification configuration's higher efficiency and distributed process structure, which reduce dependence on a single critical unit and enhance overall system stability (GUNAWAN et al., 2019).

Overall, these results highlight that environmental performance in bioenergy systems is strongly influenced by system-level modeling choices, particularly electricity substitution, rather than by intrinsic technological characteristics alone.

Final considerations

The results of this study demonstrate that both technological pathways for bioelectricity generation from sugarcane bagasse yield net environmental benefits when assessed from a life cycle perspective.

The gasification-based configuration offers consistent, though moderate, environmental advantages, primarily driven by its higher electrical efficiency and greater electricity export capacity. However, the findings show that environmental performance is strongly influenced by system-level modeling choices, particularly the electricity substitution assumption, which dominates the overall life cycle results.

In this context, the study shows that improvements in thermodynamic efficiency do not necessarily translate into proportional environmental gains but instead redistribute environmental burdens across process units, increasing system complexity.

A key contribution of this work is the implementation of a harmonized and process-consistent LCA framework that enables more robust, unbiased comparisons among technological configurations by minimizing methodological inconsistencies.

From a practical perspective, the results suggest that adopting advanced thermochemical technologies, such as gasification, can enhance environmental performance. However, their benefits should be interpreted with caution because they depend on modeling assumptions and system configuration.

Overall, these findings reinforce that environmental performance in bioenergy systems is primarily governed by system-level assumptions rather than by intrinsic technological differences. Future research should examine the effects of alternative system boundaries and electricity substitution scenarios to further assess the robustness of these results.

Acknowledgements

The authors acknowledge financial support from the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) and the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) in Brazil, as well as institutional support from the Federal Center for Technological Education of Rio de Janeiro (CEFET/RJ) in Brazil and the Polytechnic Institute of Bragança in Portugal. The authors also gratefully acknowledge additional support from the Foundation for Science and Technology (FCT) in Portugal.

References

AGHBASHLO, M.; HOSSEINZADEH-BANDBAFHA, H.; SHAHBEIK, H.; TABATABAEI, M. The role of sustainability assessment tools in realizing bioenergy and bioproduct systems. **Biofuel Research Journal**, v. 9, p. 1697–1706, 2022. https://doi.org/10.18331/BRJ2022.9.3.5

ARCENTALES-BASTIDAS, D.; SILVA, C.; RAMIREZ, A. The environmental profile of ethanol derived from sugarcane in Ecuador: a life cycle assessment including the effect of cogeneration of electricity in a sugar industrial complex. **Energies**, v. 15, p. 5421, 2022. https://doi.org/10.3390/en15155421

BAHADORI, A. et al. Estimation of the effect of biomass moisture content on the direct combustion of sugarcane bagasse in boilers. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 33, n. 2, p. 349–356, 2014. https://doi.org/10.1080/14786451.2012.748766

BATLLE, E. A. O. et al. Brazilian integrated oilpalm-sugarcane biorefinery: an energetic, exergetic, economic, and environmental (4E) assessment. **Energy Conversion and Management**, v. 268, p. 116066, 2022. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2022.116066

BEAGLE, E.; BELMONT, E. Comparative life cycle assessment of biomass utilization for electricity generation in the European Union and the United States. **Energy Policy**, v. 128, p. 267–275, 2019. https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2019.01.006

BRESSANIN, J. M. et al. Advanced technologies for electricity production in the sugarcane value chain are a strategic option in a carbon reward policy context. **Energy Policy**, v. 159, p. 112637, 2021. https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2021.112637

ESQUIAQUI, L.; SANTOS, S. D. F. de O. M.; UGAYA, C. M. L. A systematic review of densified biomass products life

cycle assessments. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 20, p. 9311–9334, 2023. https://doi.org/10.1007/s13762-022-04752-1

FERDOUS, J.; BENSEBAA, F.; PELLETIER, N. Integration of LCA, TEA, process simulation and optimization: a systematic review of current practices and scope to propose a framework for pulse processing pathways. **Journal of Cleaner Production**, v. 402, p. 136804, 2023. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.136804

FINKBEINER, M. et al. The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The International* **Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11, n. 2, p. 80–85, 2006. https://doi.org/10.1065/lca2006.02.002

FIOMARI, M. C. *Análise energética e exergética de uma usina sucroalcooleira do oeste paulista com sistema de cogeração de energia em expansão*. 2004. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", São Paulo, 2004.

FIORANELLI, A.; BIZZO, W. A. Generation of surplus electricity in sugarcane mills from sugarcane bagasse and straw: challenges, failures and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 186, p. 113647, 2023. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2023.113647

FREITAS, J. V. et al. Sugarcane biorefineries: potential opportunities towards shifting from wastes to products. **Industrial Crops and Products**, v. 172, p. 114057, 2021. https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2021.114057

GAFFEY, J.; COLLINS, M. N.; STYLES, D. Review of methodological decisions in life cycle assessment (LCA) of biorefinery systems across feedstock categories. **Journal of Environmental Management**, v. 358, p. 120813, 2024. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.120813

GARCIA, V. F.; ENSINAS, A. V. Simultaneous optimization and integration of multiple process heat cascade and site utility selection for the design of a new generation of sugarcane biorefinery. **Entropy**, v. 26, p. 501, 2024. https://doi.org/10.3390/e26060501

GROEN, Evelyne A. et al. Sensitivity analysis in life cycle assessment. In: **Proceedings of the 9th international conference on life cycle assessment in the agri-food sector**. Vashon, WA, USA: ACLCA, 2014. p. 8-10.

GUNAWAN; BANTACUT, T.; ROMLI, M.; NOOR, E. Life cycle assessment of cane-sugar in Indonesian sugar mill: energy use and GHG emissions. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 536, p. 012059, 2019. https://doi.org/10.1088/1757-899X/536/1/012059

HUIJBREGTS, M. A. J. et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, p. 138–147, 2017. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y

ISO. *ISO 14040:2006: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. Geneva: International Organization for Standardization, 2006. ISO 14040:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework

ISO. *ISO 14044:2006: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. Geneva: International Organization for Standardization, 2006. ISO 14044:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines

KABEYI, M. J. B.; OLANREWAJU, O. A. Sustainable energy transition for renewable and low carbon grid electricity generation and supply. **Frontiers in Energy Research**, v. 9, 2022. https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.743114

LI, T. et al. Performance analysis of an integrated biomass-to-energy system based on gasification and pyrolysis. **Energy Conversion and Management**, v. 287, p. 117085, 2023. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117085

MEGÍA, P. J.; VIZCAÍNO, A. J.; CALLES, J. A.; CARRERO, A. Hydrogen production technologies: from fossil fuels toward renewable sources. A mini review. **Energy & Fuels**, v. 35, n. 20, p. 16403–16415, 2021. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02501

OSMAN, A. I. et al. Conversion of biomass to biofuels and life cycle assessment: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 19, p. 4075–4118, 2021. https://doi.org/10.1007/s10311-021-01273-0

PANDEY, A.; SHARMA, Y. C. Advancements in biomass valorization in integrated biorefinery systems. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining,** v. 18, p. 2078–2090, 2024. https://doi.org/10.1002/bbb.2670

PARASCANU, M. M. et al. Life cycle assessment of electricity generation from combustion and gasification of biomass in Mexico. **Sustainable Production and Consumption**, v. 27, p. 72–85, 2021. https://doi.org/10.1016/J.SPC.2020.10.021

REINA-GUZMÁN, S. et al. Thermochemical conversion of biomass: Aspen Plus® modeling of sugarcane bagasse gasification for syngas integration. **Processes**, v. 13, p. 3037, 2025. https://doi.org/10.3390/pr13103037

REY, J. R. C. *Avaliação técnico-econômica da incorporação de ciclos combinados associados à gaseificadores de leito fluidizado circulante no setor sucroalcooleiro*. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2018.

SPHERA SOLUTIONS GMBH. *Sphera LCA for Experts (formerly GaBi) and Managed LCA Content*. Version 2023.1, 2023. LCA For Experts | Sphera

VANDENBERGHE, L. P. S. et al. Beyond sugar and ethanol: the future of sugarcane biorefineries in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 167, p. 112721, 2022. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112721

WERNET, G. et al. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, p. 1218–1230, 2016. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8

ROTA INTEGRADA PARA PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO A PARTIR DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS VIA FERMENTAÇÃO LÁCTICA SEQUENCIADA

1,2 Brenda Teixeira Scardini Marinho, 3 Juan Pablo Cardona Montes, 4 Idania Valdez Vazquez, 4 Julián Carrillo Reyes*

[1]Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento, Laboratório de Caracterização Física, Química e Microbiológica, Rua Eliezer Batista, S/N, Cariacica, Espírito Santo 29140-500, Brasil; [2]Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Ambiental, Av. Fernando Ferrari, N 514, Vitória, Espírito Santo 29075-910, Brasil; 3Universidade Tecnológica do Sudoeste de Guanajuato, Divisão de Agricultura Sustentável e Processos Alimentares Protegidos, Rodovia Valle-Huanimaro, Km 1,2, Valle de Santiago, Guanajuato 38400, México; 4Laboratório de Processos Avançados de Tratamento de Águas, Unidade Acadêmica Juriquilla, Instituto de Engenharia, Universidade Nacional Autônoma do México, Blvd. Juriquilla, N 3001, Querétaro 76230, México. Autor correspondente: jcarrillor@iingen.unam.mx*

Palavras-chave: Biomassa lignocelulósica; Fermentação em duas etapas; Sabugo de milho.

Introdução

A busca por matrizes energéticas sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias para a produção de biocombustíveis a partir de resíduos agroindustriais, com destaque para o biohidrogênio obtido por fermentação anaeróbia. O sabugo de milho destaca-se como uma biomassa lignocelulósica promissora devido à sua alta disponibilidade e elevado teor de carboidratos estruturais. No entanto, a lignina dificulta o aproveitamento dos açúcares, exigindo pré-tratamentos para permitir a hidrólise e a conversão biológica dessa biomassa (Zhao, *et al.* 2022). Nesse contexto, abordagens integradas em duas etapas têm sido propostas para otimizar a eficiência do processo (García-depraect, *et al.* 2021). A fermentação lática inicial, é conhecida por sua capacidade hidrolítica, sendo capaz de promover a estabilização do sistema e a conversão parcial dos açúcares em metabólitos intermediários, como o lactato, gerando um efluente mais assimilável (Yankov, 2022). Na etapa subsequente, a fermentação escura utiliza esses compostos gerados como substrato, favorecendo rotas metabólicas mais eficientes para a produção de hidrogênio. Essa separação de fases permite um maior controle das condições operacionais e melhor desempenho dos consórcios microbianos.

Fatores como tempo de retenção hidráulica (TRH), uso das frações sólida e líquida após a fermentação lática e o tipo de inóculo exercem influência direta na dinâmica metabólica e na eficiência da produção de hidrogênio. A fração líquida, por exemplo, tende a concentrar compostos solúveis prontamente fermentáveis, enquanto a fração sólida pode apresentar limitações relacionadas à acessibilidade do substrato. Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade e o desempenho de um sistema integrado de fermentação escura impulsionada por lactato para a produção de biohidrogênio a partir de sabugo de milho. Para isso, foram analisados formação de ácido lático na primeira etapa, utilizando a microbiota nativa do resíduo, seguidos pela geração de hidrogênio na segunda etapa, considerando diferentes TRHs, frações (líquida e sólida) e tipos de inóculo (nativo e/ou com adição de lodo anaeróbico tratado termicamente). Adicionalmente, foi realizada uma comparação do uso de sabugo de milho *in natura* e pré-tratado com hidróxido de cálcio, visando avaliar a influência do pré-tratamento na microbiota, e consequentemente na eficiência geral do processo integrado.

Material e Métodos

Preparação do resíduo

O resíduo lignocelulósico (sabugo de milho) foi obtido de uma indústria *pozolera* localizada em Guanajuato, México. Após a coleta, o material foi seco naturalmente e triturado em um triturador/picador de biomassa (California Machinery, modelo 1800).

Estratégia experimental

Conforme a Figura 01, o estudo foi conduzido em duas etapas. A primeira consistiu em uma fermentação lática em sistema semicontínuo, com recirculação de 36,8 mL/min, utilizando a microbiota nativa do sabugo, sob três tempos de retenção hidráulica (TRH), todas com tempo de retenção de sólidos (TRS) de 5 dias. A segunda etapa envolveu ensaios em batelada, utilizando o sistema AMPTS II (Automatic Methane Potential Test II, Bioprocess Control, Sweden), com o objetivo de avaliar o potencial de produção de hidrogênio por fermentação escura. Nessa fase, foram avaliados os inóculo: microbiota nativa e lodo anaeróbio tratado termicamente (para selecionar microrganismos produtores de esporos com capacidade de geração de hidrogênio).

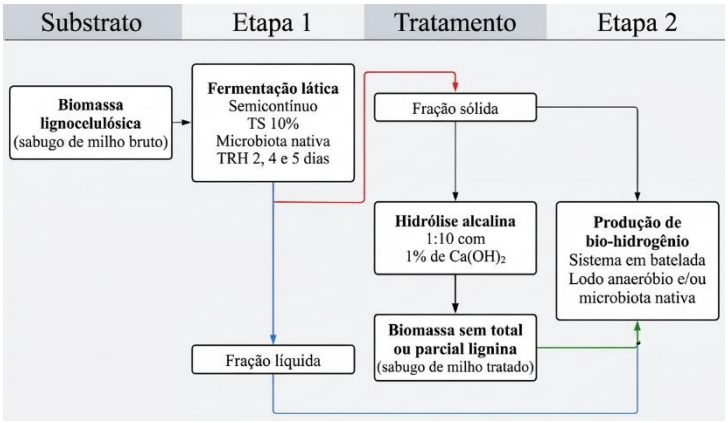


Figura 01: Fluxograma da metodologia realizada.

Ao final de cada ciclo de TRS do reator semicontínuo, a biomassa era extraída e armazenada sob congelamento, assim como a fração líquida coletada diariamente, visando sua posterior caracterização e utilização em etapas subsequentes.

Detalhamento das etapas

Na etapa 1, o reator foi inicialmente operado com pH ajustado para 6,5, contendo 10% de sólidos totais do substrato e suplementado com 10% de meio mineral composto por ureia (1018 mg), KH_2PO_4 (109 mg) e $CaCl_2$ (411 mg). Já na etapa 2, os ensaios foram iniciados com pH 6,5 e meio mineral contendo NH_4Cl (2600 mg), K_2HPO_4 (250 mg), $MgCl_2{\cdot}6H_2O$ (267 mg), $FeSO_4{\cdot}7H_2O$ (100 mg), $CoCl_2{\cdot}6H_2O$ (2,5 mg), $MnCl_2{\cdot}4H_2O$ (2,5 mg), $NiCl_2{\cdot}6H_2O$ (0,5 mg), $ZnSO_4{\cdot}7H_2O$ (1,055 mg) e KH_2PO_4 (62,5 mg). No ensaio (i) da etapa 2, os reatores foram alimentados exclusivamente com a fração líquida, com concentrações iniciais de 4,3; 5,9 e 6,0 g DQO/L para os TRHs de 2, 4 e 5 dias, respectivamente. Nos ensaios (ii) e (iii), os reatores foram operados com 18 g de SV por reator, utilizando, respectivamente, o substrato fermentado e o substrato fermentado tratado.

Na etapa de produção de hidrogênio, foram utilizados três tipos de substratos: (i) mescla de toda a fração líquida extraída da fermentação lática, composta pelos metabólitos gerados no processo; (ii) a fração sólida previamente fermentada dos últimos 3 ciclos de TRS; e (iii) a fração sólida fermentada dos 3 últimos ciclos de TRS submetida ao tratamento alcalino com hidróxido de cálcio. O tratamento alcalino teve como objetivo promover a desestruturação da matriz lignocelulósica recalcitrante do sabugo de milho, por meio da remoção parcial da lignina, aumentando assim a biodisponibilidade dos carboidratos fermentáveis. Para isso, o material foi submetido a uma relação sólido:líquido de 1:10 em solução de 1% de $Ca(OH)_2$, sob agitação de 160 rpm, por 24 horas, à temperatura de 25 ºC.

Descrição das análises de caracterização do resíduo e quantificação dos metabólitos

A caracterização do sabugo de milho, bem como a fração sólida proveniente da etapa 1, quanto aos teores de sólidos totais (ST), fixos (SF) e voláteis (SV) foi realizada conforme o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017), e a análise granulométrica seguindo os procedimentos da ASTM C117-95 e ASTM C136-01 (APHA, 2003).

A fração líquida foi analisada quanto à demanda química de oxigênio (DQO), utilizando o kit comercial (Hach COD method (Method 8000), teor de carboidratos (Dubois *et al*., 1956). A quantificação dos ácidos graxos voláteis (AGVs) foi realizada por cromatografia gasosa utilizando um cromatógrafo (Agilent Technologies, EUA, modelo 7890B) equipado com detector de ionização em chama (FID) e coluna capilar DB-FFAP (15 m × 530 µm × 1 µm). Os demais metabólitos solúveis foram determinados por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) utilizando sistema Agilent 1200 (Agilent Technologies, EUA), equipado com detectores DAD e RID, e coluna Hi-Plex H (300 × 7,7 mm).

Resultados e Discussão

O resultado de caracterização do sabugo de milho indicou que as partículas mais grosseiras (> 4,75mm), representam cerca de 46,9% do substrato, seguida por frações intermediárias e menor quantidade de material fino (2,1% no fundo), indicando uma distribuição granulométrica heterogênea. O elevado teor de sólidos totais (94,0%) e sólidos voláteis (91,4%) confirma o alto potencial do substrato como fonte de matéria orgânica para processos fermentativos.

Os resultados obtidos na etapa 1 (Quadro 01) demonstraram a forte influência do tempo de retenção hidráulica sobre a produção de lactato e gás.

	Dois últimos ciclos		
	Lático (mg DQO/L)	**Gas (mL)**	**Relação H_2/CO_2**
TRH 2 dias	1.206,4	250	41% de H_2 / 59% de CO_2
TRH 4 dias	2.043,0	2.765	73 % de H_2 / 27% de CO_2
TRH 5 dias	1.419,9	210	36% de H_2 / 64% de CO_2

Quadro 01: Produção média dos últimos dois ciclos, de lactato e gás na etapa 1.
TRH de 2 dias, 4 dias e 5 dias, operaram por 3, 7 e 7 ciclos de TRS, respectivamente.

No TRH de 2 dias, observou-se produção média de lactato de 1.206,4 mg DQO/L, associada a um volume médio de gás de 250 mL por ciclo, com composição de 41% de H_2 e 59% de CO_2. No TRH de 4 dias, foi verificado o melhor desempenho, com produção média de lactato de 2.043,0 mg DQO/L e volume médio de gás de 2.765 mL por ciclo, com predominância de hidrogênio (73%). Esse resultado indica uma condição mais favorável ao equilíbrio metabólico do consórcio microbiano, refletindo maior eficiência na conversão de substratos em produtos gasosos, embora o lactato ainda se mantenha como metabólito relevante. Em contrapartida, no TRH de 5 dias, observou-se redução na fração de hidrogênio (36%) e aumento na proporção de CO_2 (64%), com volume médio de gás de 210 mL por ciclo e produção média de lactato de 1.419,9 mg DQO/L. Esse comportamento sugere uma possível mudança no metabolismo microbiano ao longo do tempo de retenção, possivelmente associada ao consumo de hidrogênio por microrganismos homoacetogênicos.

A produção de láctico foi considerado estável após os ciclos 2, 6 e 6, nos tempos de retenção hidráulica de 2, 4 e 5 dias, respectivamente, conforme apresenta o Quadro 02.

	Dois últimos ciclos		
	Média (mg DQO/L)	**Desvio padrão**	**Coeficiente de Variação (%)**
TRH 2 dias	1.206,4	260,7	21,6
TRH 4 dias	2.043,0	96,0	4,7
TRH 5 dias	1.419,9	366,0	25,8

Quadro 02: Estabilidade na produção lática.

A análise da estabilidade da produção de lactato indica que, TRH de 5 dias apresenta um coeficiente de variação relativamente elevado (25,8%), sugerindo maior variabilidade entre os ciclos, no entanto, essa condição não se traduziu em maior eficiência na produção de hidrogênio. Por outro lado, o TRH de 4 dias apresentou alta estabilidade (CV de 4,7%) e associada a elevados valores de produção, evidenciando um melhor equilíbrio entre condição operacional e desempenho metabólico. Já o TRH de 2 dias apresentou maior dispersão dos dados (CV de 21,6%), indicando menor estabilidade do processo.

Considerando que tanto a fração líquida quanto a sólida são provenientes da etapa 1 (fermentação láctica), sendo a fração líquida correspondente ao efluente gerado e a fração sólida ao material residual dos 3 últimos ciclos desse processo, os resultados da etapa 2 evidenciam uma forte influência da origem do substrato, bem como do inóculo utilizado, sobre a produção de biohidrogênio. O resumo dos resultados obtidos na etapa 2 é apresentado no Quadro 03.

Para a microbiota nativa, a fração líquida hidrolisada apresentou o melhor desempenho na produção de biohidrogênio quando proveniente dos TRHs de 4 e 5 dias, com TPH de 10,0 e 9,9 mL/L.h e produção acumulada de 223,8 e 265,3 mL/L, respectivamente. Ambas associadas à predominância da rota acética/butírica ou butírica/acética, considerada as mais favoráveis à produção de H_2. Em contraste, a fração sólida tratada apresentou desempenho bastante reduzido, com ausência de produção nos TRHs de 2 e 4 dias e, apenas 43,1 mL/L de H_2 acumulado no TRH de 5 dias (TPH de 1,1 mL/L.h), indicando que o tratamento alcalino pode ter reduzido a disponibilidade de compostos fermentescíveis ou gerado condições menos favoráveis para a microbiota nativa. Por outro lado, a fração sólida sem tratamento apresentou seu melhor desempenho no TRH de 4 dias, alcançando TPH de 6,6 mL/L.h e 307,2 mL/L de H_2 acumulado, superior ao obtido com a fração sólida tratada, sugerindo que o pré-tratamento alcalino não promoveu benefícios para essa fração e pode ter afetado negativamente seu potencial hidrogenogênico.

Para o consórcio contendo ambos os inóculos, observou-se comportamento distinto, no qual a fração líquida apresentou produção moderada de H_2, sem evidência clara de mudança de rota metabólica (predominantemente acética), enquanto as frações sólidas apresentaram produção desprezível de hidrogênio. Esse resultado sugere possível competição microbiana ou consumo de H_2, limitando a eficiência do processo.

Considerações finais

De forma geral, o estudo demonstrou que a fração líquida, proveniente da etapa 1, concentra compostos mais prontamente assimiláveis, favorecendo a produção de hidrogênio. Observou-se ainda que a microbiota nativa apresentou melhor adaptação e desempenho em comparação ao lodo anaeróbio, possivelmente por já estar previamente selecionada às condições do sistema. Considerando o processo integrado, os melhores resultados foram obtidos para a fração líquida proveniente do TRH de 4 dias, especialmente na presença da microbiota nativa. Em contrapartida, o uso das frações sólidas apresentou desempenho inferior nas condições avaliadas.

			TPH (mL/L.h)		**Produção de H2 acumulada (mL/L)**		**Rota metabólica principal**
Tipo	**Origem**	**Inóculo**	**Média**	**Desvio Padrão**	**Média**	**Desvio Padrão**	
Líquido hidrolisado (i)	TRH 2 dias	Microbiota nativa	3,6	0,4	154,4	-	Butírica, Acética
	TRH 4 dias		10,0	1,2	223,8	14,3	Acética, Butírica

	TRH 5 dias		9,9	1,0	265,3	42,8	Butírica, Acética
Sólido hidrolisado e tratado (iii)	TRH 2 dias		0,0	-	0,0	-	Acética
	TRH 4 dias		0,0	-	0,0	-	Acética
	TRH 5 dias		1,1	-	43,1	9,0	Acética
Sólido hidrolisado (ii)	TRH 2 dias		1,2	0,2	49,4	18,1	Acética
	TRH 4 dias		6,6	1,8	307,2	124,5	Butírica, Acética
	TRH 5 dias		0,0	-	0,0	-	Acética
Líquido hidrolisado (i)	TRH 2 dias	Lodo anaeróbico termicamente tratado	7,4	1,4	77,8	0,0	Acética
	TRH 4 dias		8,3	5,1	108,1	92,7	Acética
	TRH 5 dias		7,5	-	116,3	53,6	Acética
Sólido hidrolisado e tratado (iii)	TRH 2 dias		0,3	0,4	12,4	17,5	Acética
	TRH 4 dias		0,0	-	0,0	-	Acética
	TRH 5 dias		1,0	0,1	36,7	-	Acética

Quadro 03: Produção de hidrogênio e via metabólica.
TPH representa a Taxa de Produção de Hidrogênio

Agradecimentos

Os Autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa do Programa de Doutorado-Sanduíche no Exterior (PDSE) a autora Brenda T. S. Marinho (processo nº 88881.127057/2025-01), bem como ao corpo docente e técnico da UNAM. Esta investigação foi financiada pela DGAPA-UNAM através do projecto PAPIIT IN104825, e do "projecto Grupos Interdisciplinarios de Investigación" do Instituto de Engenharia UNAM.

Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C117-95: Standard test method for materials finer than 75-µm (No. 200) sieve in mineral aggregates by washing. In: ASTM Standards, v. 04.02. West Conshohocken, 2003 a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C136-01: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. In: ASTM Standards, v. 04.02. West Conshohocken, 2003 b.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23. ed. Washington, DC: APHA, 2017.

DUBOIS, M.; GILLES, K. A.; HAMILTON, J. K.; REBERS, P. A.; SMITH, F. **Colorimetric method for determination of sugars and related substances.** Analytical Chemistry, v. 28, n. 3, p. 350–356, 1956. DOI: 10.1021/ac60111a017

GARCÍA-DEPRAECT, O.; MUÑOZ, R.; RODRÍGUEZ, E.; RENE, E. R.; LEÓN-BECERRIL, E.. **Microbial ecology of a lactate-driven dark fermentation process producing hydrogen under carbohydrate-limiting conditions.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 46, n. 20, p. 11284–11296, 2021. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.209
YANKOV, D. **Fermentative Lactic Acid Production From Lignocellulosic Feedstocks:** From Source to Purified Product. Front. Chem, v 10, p. 823005, 2022. DOI: 10.3389/fchem.2022.823005

ZHAO, L.; SUN, Z. F.; ZHANG, C. C.; NAN, J.; REN, N. Q.; LEE, D. J.; CHEN, C. **Advances in pretreatment of lignocellulosic biomass for bioenergy production:** challenges and perspectives. Bioresource Technology, v. 343, p. 126123, 2022. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126123

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL POR TRANSESTERIFICAÇÃO DIRETA EM DIFERENTES CONDIÇÕES AMBIENTAIS

1 Larissa dos Santos Amarilha, 2 Leila Cristina Konradt Moraes

1 Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), e-mail: larissa.amarilha123@gmail.com; 2 Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Centro de Estudos em Saneamento Ambiental (CESAM), e-mail: leilackm@uems.br

Palavras-chave: bioenergia; perfil lipídico; qualidade da água.

Introdução

A crescente demanda energética global, associada ao aumento populacional e ao desenvolvimento industrial, tem intensificado a dependência de combustíveis fósseis, resultando em impactos ambientais significativos, especialmente no que se refere às emissões de gases de efeito estufa e ao agravamento das mudanças climáticas (Duarte et al., 2022). Nesse contexto, a busca por fontes alternativas e renováveis de energia tem se tornado uma prioridade estratégica em nível mundial.

Entre essas alternativas, o biodiesel destaca-se como uma opção viável, por apresentar características como biodegradabilidade, baixa toxicidade, ausência ou baixo teor de compostos sulfurados e potencial de redução das emissões atmosféricas (Al Zuhair, 2007). No Brasil, sua produção tem sido incentivada como estratégia de diversificação da matriz energética, contribuindo para a redução da dependência de fontes não renováveis (Brasil, 2023).

Tradicionalmente, a produção de biodiesel está associada ao uso de óleos vegetais, como soja e palma, além de gorduras animais. No entanto, essas matérias-primas apresentam limitações importantes, como a competição com a produção de alimentos e os impactos ambientais associados ao uso intensivo do solo (Módenes et al., 2009). Diante dessas limitações, torna-se necessário o desenvolvimento de fontes alternativas que não comprometam a segurança alimentar e apresentem menor impacto ambiental.

Nesse cenário, as macrófitas aquáticas emergem como alternativa promissora, devido à elevada taxa de crescimento, ampla distribuição geográfica e significativa capacidade de adaptação a ambientes eutrofizados (Camargo; Henry-Silva; Pezzato, 2003). Essas plantas também apresentam capacidade de bioacumulação de nutrientes e metais, refletindo diretamente as condições ambientais dos corpos hídricos em que se desenvolvem (Hongjie et al., 2016).

Espécies como *Eichhornia crassipes, Pistia stratiotes* e *Salvinia sp*. têm sido investigadas quanto ao seu potencial para produção de biodiesel por transesterificação direta, por possibilitarem o aproveitamento de biomassa proveniente de ambientes aquáticos impactados (Pacheco et al., 2018; Silva et al., 2020). Estudos recentes do grupo também demonstraram que o local de coleta, o tipo de álcool utilizado e as características da biomassa influenciam o rendimento e a composição do biodiesel produzido a partir de macrófitas aquáticas (Correia et al., 2024a; Correia et al., 2024b; Leite et al., 2024). Em *Eichhornia crassipes*, por exemplo, Leite et al. (2024) verificaram que o local de coleta foi mais determinante para a composição do biodiesel do que o tipo de álcool utilizado na transesterificação, reforçando a relevância das condições ambientais na avaliação dessa matéria-prima.

Apesar dos avanços, ainda são necessários estudos que integrem a caracterização ambiental dos corpos hídricos, a composição química da biomassa e o perfil lipídico do biodiesel produzido, especialmente quando diferentes espécies e locais de coleta são avaliados conjuntamente. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar o potencial de produção de biodiesel a partir de macrófitas aquáticas coletadas em diferentes condições ambientais, por meio da técnica de transesterificação direta, considerando a influência das características da água e da biomassa no perfil lipídico do biocombustível produzido.

Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido a partir da coleta de macrófitas aquáticas em sete pontos localizados nos municípios de Dourados, Naviraí e Fátima do Sul, no estado de Mato Grosso do Sul, selecionados de modo a representar diferentes condições ambientais e níveis de influência antrópica. Foram analisadas as espécies *Eichhornia crassipes, Pistia stratiotes* e *Salvinia sp*., escolhidas em função de sua ocorrência em ambientes aquáticos regionais e de seu potencial para aplicação em processos de conversão energética.

O material vegetal coletado foi submetido à limpeza para remoção de impurezas, seguido de secagem em estufa a 60 ± 1 °C até massa constante, trituração em moinho de facas e armazenamento em recipientes herméticos até a realização dos experimentos. Paralelamente, foram coletadas amostras de água nos mesmos pontos de coleta, sendo realizadas análises de cor aparente e turbidez, em triplicata, conforme metodologia descrita no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2001), permitindo a caracterização das condições ambientais dos corpos hídricos.

A produção de biodiesel foi realizada por transesterificação direta da biomassa seca, seguindo metodologia adaptada de Johnson e Wen (2009). Para cada ponto de coleta, foram realizados dez experimentos independentes, com o objetivo de garantir reprodutibilidade operacional e obtenção de massa suficiente para as análises posteriores. Em cada ensaio, foram utilizados 2,5 g de biomassa seca, aos quais foram adicionados 10,65 mL de metanol, 12,50 mL de hexano e 1,90 mL de ácido sulfúrico concentrado como catalisador.

As amostras foram inicialmente submetidas a banho ultrassônico por 5 minutos e, em seguida, conduzidas sob sistema de refluxo a 90 ± 1 °C, com agitação magnética constante, durante 60 minutos. Após o término da reação, o conteúdo foi transferido para funil de separação, sendo realizada lavagem com 25 mL de hexano e 50 mL de água destilada, seguida de decantação por 1 hora para separação das fases.

O sobrenadante contendo os ésteres de ácidos graxos foi coletado e submetido à evaporação dos solventes em estufa a 60 ± 1 °C até massa constante. O rendimento do biodiesel foi calculado com base na relação entre a massa final do produto obtido e a massa inicial da biomassa utilizada. Posteriormente, os ésteres de ácidos graxos foram reunidos por ponto de coleta e analisados quanto ao perfil lipídico, permitindo avaliar a composição do biocombustível produzido e sua relação com as condições ambientais de origem da biomassa.

Resultados e Discussão

As macrófitas aquáticas coletadas nos sete pontos apresentaram elevado teor de umidade, com valores médios variando entre 88,9% e 92,7%, corroborando dados da literatura para espécies como *Eichhornia crassipes, Pistia stratiotes* e *Salvinia sp*. (Henry-Silva; Camargo, 2002). Esse elevado teor hídrico representa um fator crítico no processamento da biomassa, pois influencia diretamente as etapas de secagem, armazenamento e conversão lipídica. Resultados semelhantes foram observados por Correia et al. (2024a), que verificaram elevado teor de umidade em *Salvinia molesta* e *Pistia stratiotes*, destacando esse parâmetro como um dos principais desafios para a viabilidade do uso de macrófitas na produção de biodiesel.

A caracterização dos corpos hídricos evidenciou variabilidade nos parâmetros de cor aparente e turbidez entre os pontos de coleta, refletindo diferentes condições ambientais. Valores reduzidos desses parâmetros foram observados em ambientes com menor influência antrópica, enquanto locais com maior aporte de matéria orgânica apresentaram turbidez elevada, com destaque para valores superiores a 1000 NTU, indicativos de elevada concentração de sólidos suspensos. Esses resultados estão em consonância com estudos que apontam a sensibilidade das macrófitas às condições ambientais e sua aplicação como bioindicadoras (Mitchell, 1974; Hongjie et al., 2016).

A análise da composição química das macrófitas revelou variação nos teores de macro e micronutrientes, com maiores concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio associadas a ambientes mais impactados, sugerindo influência de aportes de matéria orgânica e efluentes. Também foram observadas concentrações expressivas de ferro, manganês e alumínio, reforçando o potencial dessas plantas para bioacumulação. A presença de elementos potencialmente tóxicos, como chumbo e cromo, evidencia a influência antrópica sobre os corpos hídricos e confirma a relação entre qualidade da água e composição da biomassa, conforme relatado por Camargo, Henry-Silva e Pezzato (2003) e Hongjie et al. (2016).

No que se refere à produção de biodiesel, o perfil de ácidos graxos obtido revelou predominância de compostos insaturados, com destaque para os ácidos oleico (C18:1), linoleico (C18:2) e linolênico (C18:3). Esses compostos são relevantes para a qualidade do biodiesel, pois interferem em propriedades como fluidez, viscosidade, estabilidade oxidativa e comportamento em baixas temperaturas. Entre os ácidos graxos saturados, destacou-se o ácido palmítico (C16:0), que contribui para o equilíbrio das propriedades físico-químicas do combustível.

A predominância dos ácidos oleico, linoleico, linolênico e palmítico está alinhada ao perfil observado em outros estudos com macrófitas aquáticas. Leite et al. (2024) demonstraram, em biodiesel produzido a partir de *Eichhornia crassipes*, que a composição de ésteres de ácidos graxos variou em função do local de coleta, sendo o ambiente de origem um fator relevante para a composição final do biocombustível. Correia et al. (2024b), ao avaliarem biodiesel produzido com *Salvinia molesta*, também observaram predominância de compostos associados à qualidade do biodiesel e diferenças em relação à amostra comercial analisada.

Adicionalmente, foram identificados ácidos graxos de cadeia longa, como araquídico (C20:0), behênico (C22:0) e erúcico (C24:0), os quais não são frequentemente reportados em estudos similares, sugerindo influência das condições ambientais e da variabilidade das espécies analisadas. Esse resultado reforça que a composição lipídica da biomassa não deve ser interpretada apenas como uma característica intrínseca da espécie, mas também como reflexo das condições ambientais de crescimento, especialmente em corpos hídricos sujeitos a diferentes níveis de impacto antrópico.

Os resultados indicam potencial de aplicação das macrófitas aquáticas como matéria-prima alternativa para produção de biodiesel. Entretanto, é importante destacar que, neste estudo, a avaliação foi baseada no rendimento e no perfil lipídico do produto obtido, não tendo sido realizada a determinação completa de todos os parâmetros físico-químicos exigidos pela Resolução ANP nº 920/2023, como massa específica, viscosidade cinemática, teor de água, teor de éster, índice de acidez, estabilidade à oxidação e ponto de fulgor (ANP, 2023). Dessa forma, os dados permitem indicar potencial de uso energético, mas não autorizam afirmar plena conformidade normativa do biodiesel produzido.

De maneira geral, a qualidade da água exerceu influência direta tanto na composição química das macrófitas quanto no perfil lipídico do biodiesel produzido. Ambientes mais impactados tenderam a gerar biomassa com maior acúmulo de nutrientes e metais, o que pode refletir em alterações no rendimento e nas propriedades do biocombustível. Assim, a variabilidade ambiental deve ser considerada como fator determinante na avaliação do potencial energético dessas espécies, especialmente quando se busca integrar manejo de biomassa aquática, monitoramento ambiental e produção de energia renovável.

Considerações Finais

Os resultados obtidos demonstram que as macrófitas aquáticas avaliadas apresentam potencial como matéria-prima alternativa para a produção de biodiesel por transesterificação direta, destacando-se pela disponibilidade em ambientes aquáticos

impactados, pela capacidade de adaptação a diferentes condições ambientais e pelo perfil lipídico favorável à produção de biocombustíveis.

A caracterização dos corpos hídricos indicou que os parâmetros de qualidade da água influenciam a composição química da biomassa, especialmente quanto ao acúmulo de nutrientes e metais. Essa relação reforça a importância de considerar o ambiente de coleta como variável relevante na avaliação do potencial energético de macrófitas aquáticas.

O perfil de ácidos graxos obtido, com predominância de compostos insaturados e presença de ácido palmítico entre os saturados, indica características promissoras para o produto produzido. No entanto, como não foram avaliados todos os parâmetros físico-químicos exigidos pela legislação vigente, recomenda-se que estudos futuros incluam análises complementares de qualidade do combustível, especialmente massa específica, viscosidade, índice de acidez, teor de éster, teor de água e estabilidade à oxidação.

Dessa forma, o aproveitamento de macrófitas aquáticas pode contribuir para o desenvolvimento de soluções sustentáveis, articulando manejo ambiental, monitoramento da qualidade da água e produção de energia renovável, em alinhamento com os princípios da economia circular e da mitigação de impactos ambientais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS) pelo suporte institucional e pela infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento da pesquisa. A primeira autora agradece o apoio financeiro recebido por meio da bolsa concedida para a realização deste trabalho, bem como os ensinamentos, o acompanhamento e o apoio da orientadora ao longo da execução da pesquisa.

Referências Bibliográficas

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução ANP nº 920, de 4 de abril de 2023. Estabelece a especificação do biodiesel e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializem o produto em território nacional. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 5 abr. 2023.

Al Zuhair, S. Production of biodiesel: possibilities and challenges. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 1, n. 1, p. 57-66, 2007.

APHA; AWWA; WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2001.

Brasil. Ministério da Agricultura e Pecuária. CNPE aprova aumento para 12% da mistura de biodiesel ao diesel a partir de abril. Brasília, DF: Ministério da Agricultura e Pecuária, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura. Acesso em: 8 abr. 2024.

Camargo, A. F. M.; Henry-Silva, G. G.; Pezzato, M. M. Crescimento e produção primária de macrófitas aquáticas em zonas litorâneas. In: Henry, R. (org.). *Ecótonos nas interfaces dos ecossistemas aquáticos*. São Carlos: Rima, 2003. p. 213-232.

Correia, J. P. A. et al. Biodiesel production with macrophytes collected in eutrophicated sites. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 18, n. 8, e03288, 2024a. DOI: https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n8-039.

Correia, J. P. A. et al. Chemical composition of biodiesel produced in situ with *Salvinia molesta* by ethylic and methylic route. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 46, e66010, 2024b. DOI: https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v46i1.66010.

Duarte, V. H. et al. Biocombustíveis: uma revisão sobre o panorama histórico, produção e aplicações do biogás. *Revista Ambientale*, Arapiraca, v. 14, n. 2, p. 22-34, 2022.

Henry-Silva, G. G.; Camargo, A. F. M. Valor nutritivo de macrófitas aquáticas flutuantes (*Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes* e *Salvinia molesta*) utilizadas no tratamento de efluentes de aquicultura. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, v. 24, n. 2, p. 519-526, 2002.

Hongjie, Q. et al. Site test of phytoremediation of an open pond contaminated with domestic sewage using water hyacinth and water lettuce. *Ecological Engineering*, v. 95, p. 753-762, 2016.

Johnson, M. B.; Wen, Z. Production of biodiesel fuel from the microalga *Schizochytrium limacinum* by direct transesterification of algal biomass. *Energy & Fuels*, v. 23, n. 10, p. 5179-5183, 2009. DOI: https://doi.org/10.1021/ef900704h.

Leite, A. A. S. et al. Biodiesel production potential of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms: comparison of collection sites and different alcohol transesterifications. *Scientific Reports*, v. 14, 1586, 2024. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-51913-y.

Mitchell, D. S. *Aquatic vegetation and its use and control*. Paris: UNESCO, 1974.

Módenes, A. N. et al. Produção de biodiesel a partir de plantas aquáticas: uma revisão. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 2, n. 4, p. 150-165, 2009.

Pacheco, F. S. et al. Biodiesel production from different plant parts of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms by direct transesterification. *Fuel*, v. 223, p. 57-62, 2018.

Silva, D. R. et al. Biodiesel production from *Eichhornia crassipes* seed oil by direct transesterification. *Energy Reports*, v. 6, p. 431-436, 2020.

MELHORIA DA EFICIÊNCIA DE COLETORES FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO SISTEMA DE RESFRIAMENTO

1 Abrão Junio de Oliveira, 2 Ricardo Carrasco Carpio
1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Minas Gerais Campus Bambuí, e-mail: solar.eng@hotmail.com

Palavras-chave: Energia Solar; Radiação; Sustentabilidade.

Introdução

O aumento da demanda mundial por energia, aliado às preocupações ambientais e às mudanças climáticas, tem intensificado a busca por fontes renováveis capazes de substituir progressivamente os combustíveis fósseis (Paula, 2024). Nesse contexto, o Brasil destaca-se por apresentar uma matriz energética com elevada participação de fontes renováveis, como biomassa, energia hidráulica, eólica e solar, além de uma matriz elétrica majoritariamente baseada em fontes limpas, reforçando o perfil de baixa emissão de carbono do país (BEN, 2025).

As condições geográficas brasileiras, caracterizadas pela localização intertropical e pela elevada incidência de radiação solar, favorecem o aproveitamento da energia solar fotovoltaica em praticamente todo o território nacional (INPE, 2017). Esse potencial natural, associado ao avanço tecnológico dos sistemas fotovoltaicos, tem contribuído para a expansão dessa fonte em diferentes escalas de aplicação (Paula, 2024).

Apesar desse cenário favorável, a eficiência dos sistemas fotovoltaicos ainda é limitada pelo aquecimento dos módulos, uma vez que parte significativa da radiação solar incidente é convertida em calor, o que reduz o desempenho elétrico. Esse calor residual representa uma perda energética relevante, mas também uma oportunidade de reaproveitamento para melhoria da eficiência global dos sistemas (Mello, 2021).

Nesse contexto, os sistemas híbridos fotovoltaico-térmicos (PV/T) surgem como uma alternativa promissora, ao permitirem a geração simultânea de energia elétrica e térmica a partir do mesmo módulo. Essa integração possibilita maior aproveitamento da radiação solar incidente e contribui para o aumento da eficiência energética dos sistemas (Machado, 2022). Além disso, o aproveitamento do calor residual amplia as possibilidades de aplicação da energia solar em setores como o industrial, residencial e agrícola, favorecendo a redução de custos e o uso mais racional da energia (Santos, 2017).

Material e Métodos

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e quantitativa, de caráter exploratório e descritivo. A investigação foi desenvolvida a partir de três etapas complementares: revisão bibliográfica, modelagem teórica e análise de desempenho de sistemas fotovoltaico-térmicos.

Inicialmente, realizou-se uma revisão sistemática da literatura, com base em artigos científicos, dissertações, relatórios técnicos e documentos institucionais publicados em bases de dados nacionais e internacionais. Essa etapa teve como objetivo fundamentar os aspectos conceituais relacionados à conversão fotovoltaica, aos efeitos térmicos nos módulos solares e às tecnologias de aproveitamento de calor residual, com ênfase em sistemas híbridos fotovoltaico-térmicos (PV/T).

Na segunda etapa, foi desenvolvido um modelo teórico acoplado, contemplando o comportamento elétrico e térmico de módulos fotovoltaicos sob diferentes condições operacionais. A modelagem considerou variáveis como irradiância solar, temperatura ambiente, temperatura de operação das células e coeficientes térmicos dos módulos, permitindo analisar a influência do aquecimento no desempenho elétrico do sistema. Para isso, foram utilizados dados secundários provenientes da literatura e de bases consolidadas, bem como equações clássicas de balanço energético e transferência de calor.

Complementarmente, foram realizadas simulações numéricas com o objetivo de avaliar o impacto da aplicação de estratégias de resfriamento na eficiência dos módulos fotovoltaicos. As simulações permitiram comparar cenários com e sem controle térmico, bem como estimar o potencial de aproveitamento do calor residual gerado durante a operação.

Por fim, quando aplicável, foi proposta a implementação de um protótipo em escala reduzida de um sistema fotovoltaico-térmico, destinado à validação dos resultados obtidos no modelo teórico. A análise comparativa entre dados simulados e experimentais possibilitou verificar a consistência do modelo e avaliar os ganhos de eficiência energética associados à recuperação térmica.

Os resultados foram analisados de forma integrada, considerando indicadores de desempenho elétrico, térmico e global, bem como aspectos técnicos, econômicos e ambientais relacionados à adoção de sistemas híbridos PV/T.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos a partir da análise bibliográfica indicam que o desempenho dos sistemas fotovoltaicos está diretamente relacionado às condições térmicas de operação dos módulos. Observa-se, de forma recorrente na literatura, que o aumento da temperatura das células fotovoltaicas provoca redução na eficiência de conversão elétrica, impactando a potência gerada pelos sistemas. Esse comportamento é atribuído às características dos materiais semicondutores, que apresentam sensibilidade às variações térmicas durante o funcionamento. Segundo Chenche (2020), a temperatura de operação das células fotovoltaicas tende a ser superior à temperatura ambiente, com diferenças típicas entre 20 °C e 30 °C em condições sem concentração solar. Embora esse aumento térmico reduza a eficiência, geralmente não se utilizam sistemas de

resfriamento, contudo, em situações de maior aquecimento, as perdas se tornam mais acentuadas, podendo levar à degradação térmica dos módulos

Em condições de elevada irradiância solar, associadas à baixa dissipação de calor, ocorre um aumento progressivo da temperatura dos módulos, o que intensifica as perdas elétricas. Esse cenário evidencia uma limitação importante dos sistemas fotovoltaicos convencionais, nos quais a energia excedente não convertida em eletricidade é predominantemente dissipada na forma de calor. Nesse contexto, de acordo com Carrera et al. (2025), o desempenho dos sistemas de energia solar depende de uma combinação complexa de fatores que ultrapassa as características básicas dos módulos fotovoltaicos. Os autores ressaltam que a conversão da radiação solar em eletricidade é influenciada pelas condições ambientais, pela configuração do sistema e pelos parâmetros de instalação, o que evidencia que a energia solar, embora abundante, requer planejamento técnico rigoroso para alcançar níveis elevados de eficiência.

A partir da análise dos estudos revisados, verifica-se que a adoção de estratégias de controle térmico pode contribuir significativamente para a melhoria do desempenho dos sistemas fotovoltaicos. A redução da temperatura de operação tende a favorecer o aumento da eficiência elétrica, uma vez que diminui os efeitos negativos associados ao aquecimento das células. Nesse contexto, os sistemas híbridos fotovoltaico-térmicos (PV/T) se destacam como uma alternativa promissora, pois permitem o aproveitamento simultâneo da energia elétrica e térmica. Ao incorporar mecanismos de extração de calor, esses sistemas não apenas reduzem a temperatura dos módulos, como também possibilitam o uso do calor residual em outras aplicações, ampliando o aproveitamento energético da radiação solar incidente.

A literatura analisada aponta que essa integração entre geração elétrica e térmica pode resultar em ganhos na eficiência global do sistema, quando comparada aos sistemas fotovoltaicos convencionais. Além disso, o aproveitamento do calor residual contribui para a redução de perdas energéticas e para o aumento da versatilidade das aplicações da energia solar. Entretanto, apesar das vantagens técnicas observadas, ainda existem desafios relacionados à implementação em larga escala dessas tecnologias, especialmente no que se refere à viabilidade econômica, complexidade dos sistemas e adaptação às diferentes condições de operação. Esses fatores indicam que, embora os sistemas PV/T apresentem potencial relevante, seu desenvolvimento ainda depende de avanços tecnológicos e otimizações de projeto.

Por fim, os resultados evidenciam que o aproveitamento do calor gerado em sistemas fotovoltaicos representa uma estratégia relevante para o aumento da eficiência energética e para a melhoria do desempenho global dos sistemas solares, contribuindo para o fortalecimento de soluções mais sustentáveis no contexto da transição energética.

Considerações Finais

Os resultados evidenciam que a temperatura de operação exerce influência significativa no desempenho dos sistemas fotovoltaicos, afetando diretamente a eficiência de conversão elétrica. O aquecimento dos módulos, decorrente da parcela da radiação solar não convertida em eletricidade, configura uma limitação relevante, ao mesmo tempo em que representa uma possibilidade de aproveitamento energético.

Nesse sentido, observa-se que estratégias de controle térmico e o uso de sistemas híbridos fotovoltaico-térmicos constituem alternativas promissoras para a melhoria do desempenho dos sistemas, ao permitirem a redução das perdas térmicas e o aproveitamento do calor residual. Essa integração contribui para o aumento da eficiência energética global e amplia as possibilidades de aplicação da energia solar.

Entretanto, a adoção dessas tecnologias ainda enfrenta desafios relacionados à viabilidade econômica, ao dimensionamento adequado e às condições de operação. Assim, destaca-se a importância do desenvolvimento de soluções que conciliem eficiência, aplicabilidade e sustentabilidade no contexto da geração de energia solar.

Referências Bibliográficas

CARRERA, Luis Angel Iturralde et al. Efficiency and Sustainability in Solar Photovoltaic Systems: A Review of Key Factors and Innovative Technologies. **Eng**, v. 6, n. 3, p. 1316-1335, 2025. DOI: 10.3390/eng6030075. Disponível em: https://www.mdpi.com/2673-4117/6/3/50. Acesso em: 25 abr. 2026.

CHENCHE, Luz Elena Peñaranda. **Estudo experimental dos métodos ativo e passivo para arrefecimento de painéis fotovoltaicos de alta concentração**. 2020. 182 f. Tese (Pós Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/29028. Acesso em: 24 abr. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2025:** ano base 2024. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025. Acesso em: 20 abr. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. (2017). **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE. Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em: 18 abr. 2026.

MACHADO, Pedro Leineker Ochoski. **Sistema híbrido fotovoltaico-térmico para geração de energia elétrica e aquecimento de água utilizando termossifões**. 2022. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade

Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2022. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/28982/1/sistemahibridofotovoltaicotermico.pdf. Acesso em: 21 abr. 2026.

MELLO, Gabriel Ozorio Linhares de. **Estudo da influência da temperatura na produção de energia gerada por placas fotovoltaicas**. 2021. 53 f. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2021. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://posgraduacao.ufms.br/portal/trabalho-arquivos/download/9568?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 23 abr. 2026.

PAULA, Luan Lenke de. **Análise técnica e econômica das rotas de aproveitamento da energia solar para atender a demanda do IFES campus São Mateus**. 2024. 46 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Mecânica). Instituto Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2024. Disponível em: https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/4360. Acesso em: 28 abr. 2026.

SANTOS, Lucas Di Paula Gama dos; DUARTE, Francisco Ricardo; SANTOS, Vivianni Marques Leite dos. Viabilidade técnico-econômica da utilização de energia solar na UNIVASF- Campus Juazeiro (BA). **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 12, n. 4, p. 1227-1249, out./dez. 2019. Disponível em: https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/6108/3554. Acesso em: 19 abr. 2026.

DESALINATION ALLIED TO RENEWABLE ENERGY - POTENTIAL COMBINATION IN BRAZILIAN NORTHEAST AREA

1 Reinaldo del Bigio Junior, 2 José Gilberto Dalfré Filho, 3 Patricia Dalsoglio Garcia, 4 Andre Luis Sotero Salustiano Martim

1 Universidade Estadual de Campinas, e-mail: r.dbigio@hotmail.com; 2 Universidade Estadual de Campinas, e-mail: dalfre@unicamp.br; 3 Universidade Estadual de Campinas, e-mail: pdgarcia@unicamp.br; 4 Universidade Estadual de Campinas, e-mail: asmartim@unicamp.br

Keywords: Desalination, Renewable Energy, Potable Water

Introduction

There is a combined scenario of challenges faced in the Brazilian northeast region that, for some years now, has been the subject of discussions not only environmentally, but also politically. The first challenge is the anthropological impact that the São Francisco river faces, resulting in significant flow reduction (Holanda, Rocha and Oliveira, 2008; Melo, 2022) and other polluted rivers (Nascimento, 2003). The second challenge is the lack of broad access to potable water in several cities, in Pernambuco for example, 20% of the population does not have access to potable water (IBGE, 2024), combined with extensive dry seasons (Zhang *et al*. 2019). The absence of water also encourages residents to adopt the drilling of artisanal wells (individual or community, commonly accompanied by artisanal septic tanks), practices that are also aggressive to the environment and the water table (groundwater), in addition to the risk of contamination. Another unique scenario is faced: more electrical energy is generated from solar and wind sources than the distribution network itself has the capacity to absorb and consume, generating approximately 84 TWh/year in eolic energy and 7 TWh/year in solar energy, or 7 TWh/month and 0.58 TWh/month, respectively, in 2023 (EPE, 2025). Whether for reasons of distance or lack of demand for excess energy, most people end up adhering to the energy credit model. A reverse osmosis desalination plant (ROD) would be a potential option to be studied, as it could reduce impacts on the potable water scenario and also provide a destination for the use of surplus energy. The author's proposal in this publication is to direct surplus generated renewable electrical energy (solar and eolic) to power the equipment in the ROD process.

Materials and Methods

The ROD process, as it is cheaper than the thermal procedure, is a fundamental option for obtaining potable water in many countries (i.e. Saudi Arabia, Israel, Kuwait etc.) and others in North Africa and the Middle East (Ghaffour, 2009). Figure 01 expresses a model of what a combined operation between clean energy generation, sea water capture, desalination, treatment and distribution to the local population would look like.

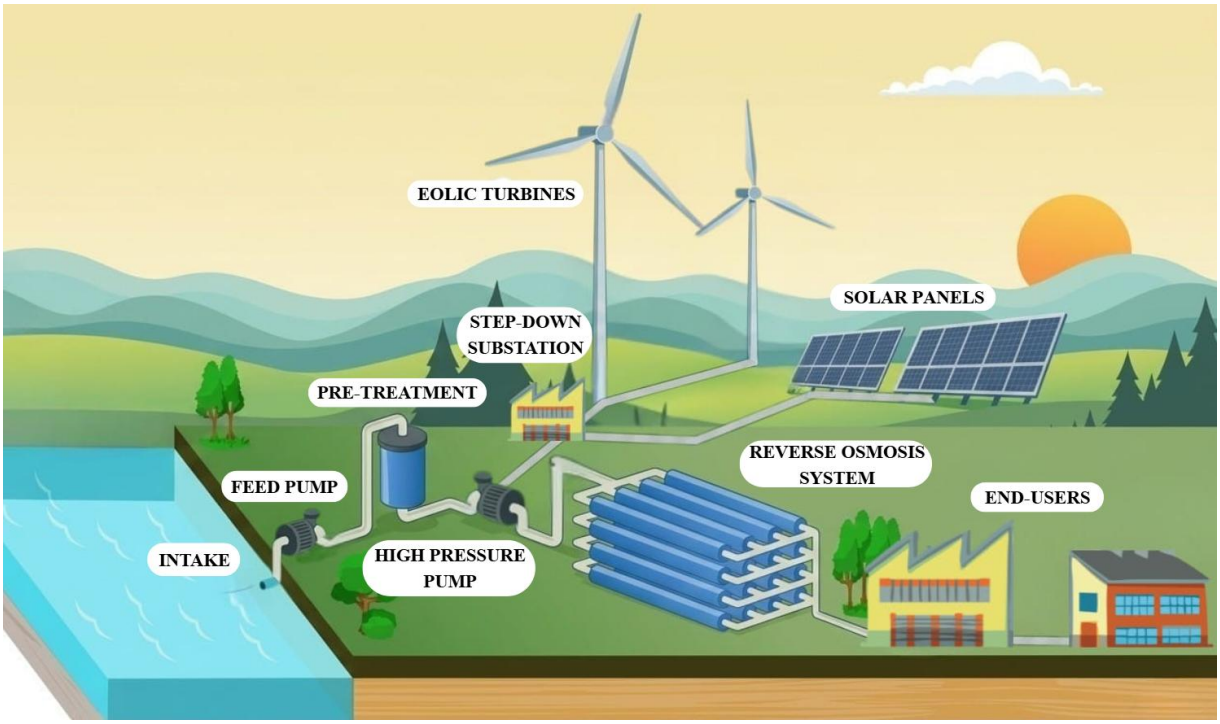


Figure 01: Example of DRO plant fed with renewable energy sources.

For purposes of comparing values, the average energy consumption per volume generated will be 4 kWh/m³ based on the history presented by data from studies by Feo-García et al. (2024) referencing 3 ROD plants. Furthermore, based on the same publication, average costs and consumption will be adopted for projection as presented in Table 01. The conversion into Brazilian local currency will be considered from R$ 6.00 to € 1.00 (consulted by the author in Mar/2026).

Staff	Maintenance	Reagents	Membranes	Total
0.258	0.414	0.120	0.060	0.852

Table 01: Summary of each cost in R$/m³ (Brazilian currency), based on average costs from Feo-Garcia (2024)

The city of Recife (PE/Brazil), with more than 1.5 million inhabitants (IBGE, 2025) and an annual consumption of 134 million m³ of potable water (SINISA, 2025), will be the protagonist in receiving the projection of this hypothetical ROD plant, as it is the third largest city in the northeast region (IBGE, 2025), being supplied by the São Francisco river, as well as being a reference in northeastern tourism. The project plans to serve 10% of Recife's total population, 150,000 inhabitants. For analysis, the following values will also be considered: Average tariff (Group A3 High Voltage - Ponta) in Recife of 0.49389 R$/kWh (ANEEL, 2025) and average water consumption per citizen of 0.1327 m³/day (3.981 m³/month) (SINISA, 2025). Using mathematical analysis to equate the expected operating cost for implementing the ROD plant, it is proposed to stipulate the following calculations based on simplified formulas:

$$DE = P.CC.CD$$

DE represents the total energy demand (kWh/day), P is the sample population (adimensional), CC is the average daily water consumption (m³/day) and CD is the average energy consumption per volume of water generated (kWh/m³).DE is equal to 79,620 kWh/day (~2.39 GWh/month and ~29.06 GWh/year). It is identified that compared to solar energy generation values, for example, 7 TWh per year, this consumption value of 29.06 GWh by the ROD plant represents a fraction close to 0.4% of the total production of the solar sector.A small demand and close to the sector's total generation power (which makes part of the energy consumption viable with a large margin). It is now possible to assume the operating costs added to the energy consumption scenario with the following formula:

$$CT = DE.TM + P.CC.(CM + \mathrm{MO} + \mathrm{MA} + \mathrm{RE})$$

CT represents the total daily cost (R$/day), TM is the average tariff rate (R$/kWh), CM is the average cost of membranes (R$/m³), MO is the average labor cost (R$/m³), MA is the average maintenance cost (R$/m³), RE is the average cost of reagents (R$/m³). After calculations, CT value is equal to 56,283.38 R$/day (~1.69 million R$/month and ~20.54 million R$/year). Dividing the CT by the 150 thousand inhabitants, there is a cost per inhabitant of 0.38 R$/day (~11.40 R$/month). This value is within the parameters regarding the cost of potable water spent on average by the citizen of Pernambuco, with the minimum consumption tariff for up to 10 m³/month being 61.77 R$/month (COMPESA, 2025).

Results and Discussions

The energy demand of 29.06 GWh/year from a ROD plant for a sample of 150,000 inhabitants is relatively small compared to the annual solar energy generation potential combined with eolic power of 91 TWh/year, for the entire northeast. Proving that, in this criterion, a bigger number of ROD plants can be added. A limiting factor would be the location and connection to the dealership's distribution network. The operating cost (CO) of R$11.26/month, which would be passed on to the end consumer, is not included in the profit margin of the concessionaire responsible for the operation and the company responsible for the ROD plant. Furthermore, it does not cover the cost of building the ROD station, which involves a complex analysis of political and industrial agreements, not included in this publication.

However, the CO passed on to the end consumer has a significant margin, as it represents 18.22% of the current average value of R$61.77/month already paid by citizens. It means that there is a potential yet to be defined and cushioned with joint projects as investments by city halls, state and federal governments, which also can even absorb a fraction of the construction cost, in parallel promoting tax incentives for companies and concessionaires that operate ROD plants, for example.

The overall positive environmental impact of this set of efforts and projects is large. Not only by reducing dependence on extracting abundant daily volumes from the São Francisco river, relieving and returning part of its natural flow, but also preventing potential new artesian wells (and septic tanks) from being created, which also results in relief in the general hydrology of the water table in the entire affected region and reduces the chances of contamination.

Conclusions

Based on the presented numerical analysis, a desalination plant is a viable option. By using the clean energy produced by the northeastern region and serving a fraction of the population of Recife promoting potable water. Also, uncovers new lines of analysis to verify how many plants would be needed to serve at least 50% of the local population, even the entirety of it. Subsequently, the location for construction of these plants would be stipulated after complex regional analyses, as they must be as close as possible to the state's seafront and, to the eolic and solar farms, even if these are located in neighboring states, if possible.

It is also concluded that the environmental impact of the project's consequences would be very welcoming for local inhabitants and the state itself. The local biodiversity would also be impacted, by giving back the natural flow of the São Francisco river, which also creates space for research on what kinds of wildlife could be positively affected. This study may also bring extra incentive to this project.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP for the support and access to data.

References

COMPESA - Companhia Pernambucana de Saneamento. Nota Técnica nº 3/2025: Instituição da "Tarifa Social". Recife: Compesa, 2025.

FEO-GARCÍA, J.; PULIDO-ALONSO, A.; FLORIDO-BETANCOR, A.; FLORIDO-SUÁREZ, N.R. Cost Studies of Reverse Osmosis Desalination Plants in the Range of 23,000–33,000 m3/day. Water 2024, 16, 910. 2024. Doi: https://doi.org/10.3390/w16060910

GHAFFOUR, N. The challenge of capacity-building strategies and perspectives for desalination for sustainable water use in MENA. Desalin. Water Treat. 5, 48–53. 2009.

HOLANDA, F.S.R.; ROCHA, I.P.; OLIVEIRA, V.S. Estabilização de taludes marginais com técnicas de bioengenharia de solos no baixo São Francisco. Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient., Campina Grande, v. 12, n. 6, Dec. 2008.

MELO, L.S. Avaliação das alterações de vazões na bacia hidrográfica do rio são francisco entre 1985 e 2019: análise de tendências e relações com variáveis climáticas e antrópicas. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. Belo Horizonte. 2022.

NASCIMENTO, B.B. Vulnerabilidade do sistema de abastecimento de água potável da região metropolitana do recife: intermitência e poluição. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. Recife, Pernambuco. 2003.

SINISA - Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico. Painel de Indicadores de 2024 - Água. 2025

ZHANG, X.; DONG, Q.; COSTA, V.; WANG, X. A hierarchical Bayesian model for decomposing the impacts of human activities and climate change on water resources in China. Science of The Total Environment, v. 665, p. 836-847, 2019.

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS EM ATERROS SANITÁRIOS

1 Amanda Camargo Rodrigues, 2 Rafael Matias Feltrin
1 Universidade Federal do Pampa - Unipampa, e-mail: amandacamargo.aluno@unipampa.edu.br, 2 Universidade Federal do Pampa, e-mail: rafaelfeltrin@unipampa.edu.br

Palavras-chave: Aterros Sanitários; Resíduos Sólidos; Biodigestão Anaeróbica.

Resumo

A busca por alternativas energéticas capazes de reduzir as emissões de gases de efeito estufa tem aumentado o interesse por fontes renováveis, especialmente pelo biogás que é produzido a partir de resíduos sólidos urbanos. Esse gás gerado naturalmente nos aterros sanitários por meio da decomposição anaeróbia da fração orgânica, apresenta composição rica em metano, o que lhe confere elevado potencial energético. Além de contribuir para a diversificação da matriz elétrica, o biogás promove benefícios ambientais ao reduzir emissões de metano, minimizar impactos associados à disposição inadequada de resíduos e favorecer o uso mais sustentável dos aterros sanitários. Assim, o presente trabalho apresenta uma revisão sobre a geração de biogás em aterros, sua produção e potencial energético e relevância no cenário energético nacional, destacando sua importância como uma alternativa limpa, renovável e alinhada às diretrizes de sustentabilidade.

Introdução

A elevação da temperatura média global é uma das principais adversidades ambientais desta época, intensificada pela emissão de gases que intensificam o efeito estufa (GEE). Entre esses elementos gasosos, o dióxido de carbono (CO2) e o metano (CH4), em conjunto com outros gases, são os principais catalisadores desse fenômeno (OLIVEIRA; HIGARASHI, 2006). Diante deste cenário, diversas iniciativas voltadas à redução das temperaturas globais têm influenciado diretamente o setor energético, especialmente na busca por matrizes com menores emissões de carbono (VIEIRA; SILVA, 2018).

No contexto, o Biogás destaca-se como uma alternativa promissora para a produção de eletricidade limpa. Sua composição é formada, em grande parte, por metano e dióxido de carbono. Esse gás é extraído através da decomposição (na ausência de ar) de materiais orgânicos descartados, incluindo lixo residencial, sobras de colheitas, estercos de criação de animais, lodo de estações de tratamento de água e entre outros (COELHO, 2016).

Dentro do atual cenário mundial, que busca a consolidação de fontes energéticas renováveis e de baixo impacto ambiental, esse potencial ganha contornos estratégicos. Nesse contexto, o Brasil se sobressai na produção de biogás, impulsionado pela vasta disponibilidade de matéria orgânica e pela infraestrutura crescente de gestão de resíduos, posicionando-se como um protagonista na transição energética global (LANDIM, 2008).

No que diz respeito às fontes de energias limpas, a economia circular visa conquistar aquelas que são capazes de se renovar, como é o caso do biogás. É possível também utilizar, por exemplo, o material orgânico que sobra do tratamento de esgoto para produção simultânea de energia elétrica e calor, além de combustíveis e outras finalidades. Assim, isso se torna uma opção viável para reforçar a geração de energias já estabelecidas, como as usinas que queimam combustíveis em momentos de escassez de chuva, em primeiro momento (BORSCHIVER, 2018).

Desenvolvimento

Fonte de energias renováveis

As energias renováveis aparecem como uma alternativa para equilibrar a relação entre economia e meio ambiente. Elas também se destacam como opção para substituir as fontes de energia que dependem do carbono, auxiliando no crescimento econômico e trazendo novas possibilidades para o desenvolvimento social e ambiental ao mesmo (GIDENNS, 2010).

Por volta de 2008, no Brasil, percebeu-se que a matriz energética começou a se tornar mais diversificada. Na geração de eletricidade, destacaram-se as fontes que passaram a receber mais atenção e incentivo de programas governamentais, como energia eólica, solar, biogás e biomassa (WALISIEWICZ, 2008).

O biogás passou a receber mais atenção como alternativa para substituir os combustíveis fósseis na geração de energia elétrica. Ao comparar suas vantagens e desvantagens, fica claro que ele causa menos impactos ambientais e é muito utilizado em áreas rurais, especialmente em biodigestores que usam dejetos de animais. Nessas regiões, o biogás contribui para geração de renda e empregos (WALISIEWICZ, 2008).

Com cerca de 50% da sua matriz energética composta por fontes renováveis, o Brasil se destaca pela predominância da geração hidrelétrica, embora o cenário tenha começado a se diversificar significativamente a partir de 2010 com a ascensão das fontes solar e eólica. Conforme diretrizes do Ministério de Minas e Energia (MME), a meta é sustentar uma participação renovável superior a 80% até 2030, impulsionada pelo crescimento conjunto da biomassa e das fontes variáveis, sob o suporte de políticas públicas estruturadas (BRASIL, 2021b).

A ANEEL registrou que, em 2023, o Brasil possuía 26 usinas termelétricas em operação que utilizam biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos (RSU) para geração de energia elétrica, evidenciando o avanço na recuperação

energética no setor de saneamento. Dentre essas unidades, três estão localizadas no estado do Rio Grande do Sul (QUADRO 1). (ANEEL, 2023).

Usina Termelétrica	Município	Aterro / Origem do RSU	Potência (MW)	Produção de Biogás	Início de Operação	Situação (2025)
UTE Minas do Leão (CRVR)	Minas do Leão	Aterro Sanitário	8-10 MW	66.000 Nm3/dia	2022 - 2025	Em operação / Expansão
UTE São Leopoldo (CRVR)	São Leopoldo	Aterro Sanitário	4-6 MW	30.000 - 34.000 Nm³/dia	2023	Em operação
UTE Giruá / Central RSU (biogás)	Giruá	Resíduos Urbanos Municipais	1-2 MW	Pequena Escala	2019 - 2021	Em operação

Tabela 1 - Usinas a Biogás de Resíduos Sólidos Urbanos no Rio Grande do Sul. ANEEL (2023)
Fonte: Autora, 2026.

Esse cenário se insere em um contexto mais amplo de expansão do setor de biogás no País. De acordo com o levantamento do CIBiogás (Centro Internacional de Energias Renováveis), apresentado no Panorama do Biogás no Brasil 2025, a produção nacional atingiu 4,96 bilhões de Nm³/ano em 2025, representando um crescimento expressivo em relação aos anos anteriores. Esse avanço tem sido impulsionado pela ampliação do número de plantas em operação, especialmente nos segmentos do agronegócio e os aterros sanitários, que concentram o maior potencial de geração. (CIBIOGÁS, 2025).

Resíduos sólidos e aterros sanitários no Brasil

Segundo a Norma Brasileira (NBR) 10004 da ABNT (2004), resíduos sólidos são materiais em estado sólido ou semissólido gerados por atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e de limpeza urbana. Também entram nessa definição os lodos produzidos em sistemas de tratamento de água, os resíduos gerados por equipamentos de controle de poluição e certos líquidos que, por suas características, não podem ser descartados na rede de esgoto ou em corpos d'água sem soluções técnicas ou econômicas complexas.

Os aterros sanitários (Figura 1) são a principal forma de destinação final de resíduos sólidos urbanos (RSU) no mundo. Eles são considerados uma técnica adequada para o manejo desses resíduos, pois contam com estruturas como impermeabilização do solo, sistemas de coleta e tratamento de chorume, além de poços e tubulações para captar e queimar os gases gerados (THEMELIS; ULLOA, 2007).

No entanto, os aterros também possuem desvantagens, como vida útil limitada. Quando essa vida útil chega ao fim, a área precisa passar por avaliação devido à atividade microbiana ainda presente no local. Assim, é necessário manter o monitoramento das águas subterrâneas e dos gases liberados pelo sistema de drenagem (BARROS, 2012).

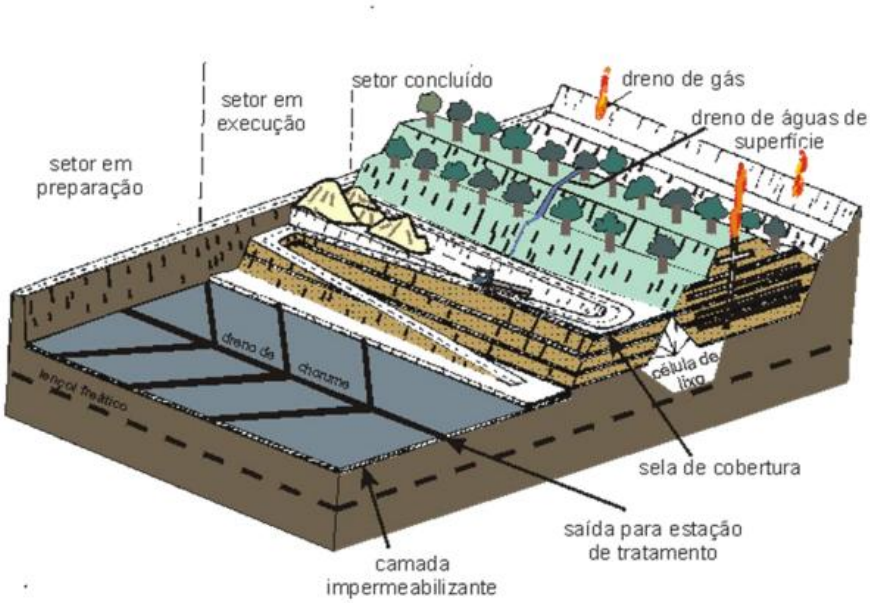


Figura 1 - Esquema típico de um Aterro Sanitário.
Fonte: Ribeiro 2017

Biogás de aterros sanitários

Após o descarte dos resíduos orgânicos nos aterros sanitários, a digestão anaeróbia ocorre de forma natural (PAVI, 2016). Por conta da grande diversidade de materiais depositados, também existe uma ampla variedade de microrganismos convivendo naquele ambiente. Esses microrganismos atuam em conjunto, fazendo com que os resíduos orgânicos passem por diferentes etapas de decomposição. (CASTILHOS JR et al.,2003).

O processo de produção do biogás (Figura 2) começa com a decomposição anaeróbia dos resíduos orgânicos, que produz metano (CH4) e dióxido de carbono (CO2) em quantidades que variam ao longo do tempo, conforme a idade do aterro e o tipo de resíduo depositado. O biogás é formado justamente pela combinação desses gases gerados pela ação biológica (LIPOR, 2008).

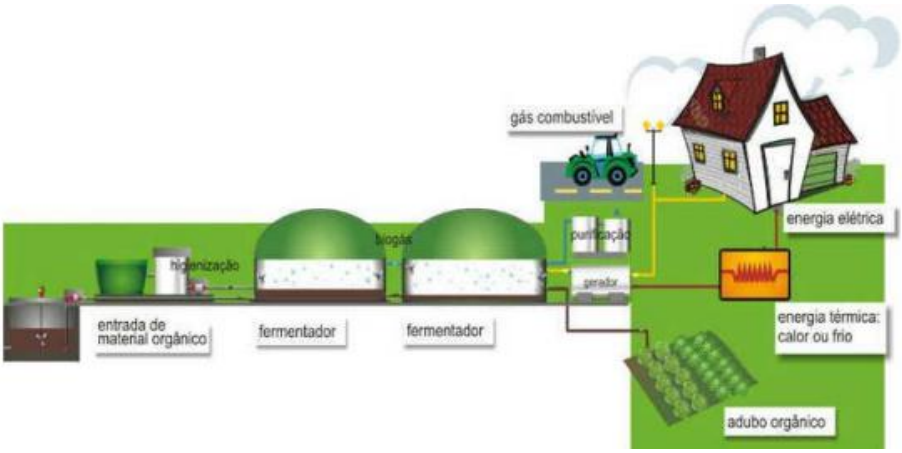


Figura 2 - Etapas do processo de Produção do Biogás.
Fonte: Porter (2009).

Segundo Farquhar e Rovers (1973, apud BARROS, 2012), a produção de biogás em aterros sanitários ocorre em quatro fases, conforme citado a seguir é apresentado na Figura 3.

Fase I: Aeróbia: Quando os resíduos são colocados no aterro, a parte biodegradável começa a se decompor na presença de oxigênio. Essa fase dura pouco tempo, até que o resíduos seja coberto e o oxigênio diminui. Aqui são gerados dióxido de carbono, água e calor.
Fase II: Anaeróbia não metanogênica: Com a falta de oxigênio, inicia-se a fase anaeróbia. Os microrganismos começam a transformar o material orgânico em ácidos graxos, o que reduz o pH do chorume. Nessa etapa ocorre a produção de ácidos e gás hidrogênio.
Fase III: Anaeróbia metanogênica instável: Nesta fase, o metano começa a aumentar. A produção de dióxido de carbono diminui, pois o processo passa de aeróbio para anaeróbio. Também são produzidos calor, água e metano, mas ainda de forma instável.
Fase IV: Anaeróbia metanogênica estável: Os microrganismos anaeróbios convertem ácido acético e o gás hidrogênio em metano e dióxido de carbono. A formação de ácidos diminui, o pH do chorume aumenta e há redução de compostos inorgânicos, inclusive metais pesados.

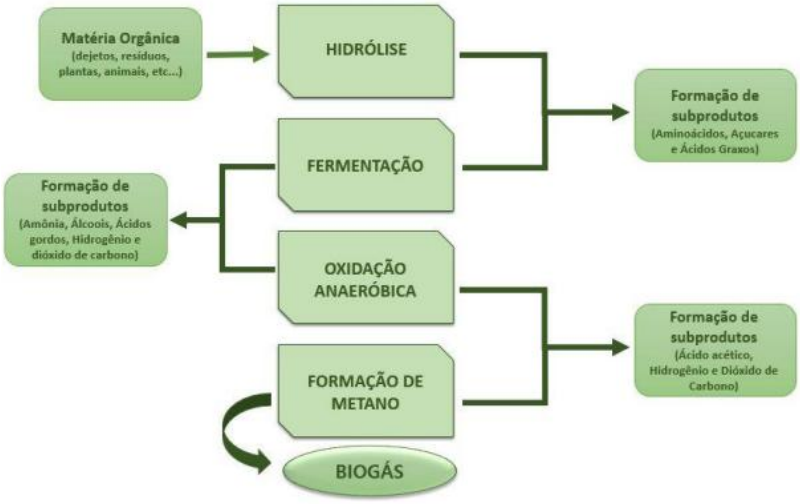


Figura 3 - Fases da produção de Biogás.
Fonte: Porter (2009).

Considerações Finais

Com base nos estudos realizados, fica evidente que a produção de biogás em aterros sanitários representa uma oportunidade estratégica para o Brasil, unindo gestão adequada de resíduos e geração de energias renováveis. O processo de formação de biogás é bem compreendido e ocorre de maneira contínua ao longo da vida útil do aterro, permitindo a instalação de sistemas de captação e conversão energética eficientes.

Apesar disso, o País ainda explora apenas uma fração do seu potencial, o que demonstra a necessidade de maior incentivo governamental, investimentos em tecnologias e políticas públicas que estimulem a implementação de usinas e a valorização energética dos resíduos.

Em um contexto global de transição energética e busca pela descarbonização, a utilização do biogás em aterros sanitários se destaca como solução viável, sustentável e economicamente promissora, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para o fortalecimento da matriz energética nacional.

Para atingir um futuro sustentável, é fundamental priorizar fontes renováveis como a energia solar, eólica e, especialmente, o biogás, que apresenta menor impacto ambiental. Embora a energia hidrelétrica ainda predomine na matriz brasileira devido à sua alta geração, sua implantação causa impactos significativos, como a degradação de ecossistemas, reforçando a importância de diversificar a matriz com alternativas mais energéticas.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Dados abertos – Quantidade de usinas termelétricas por tipo. 2023. Disponível em: https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/usinas-termeletricas-por-tipo.

BORSCHIVER, Suzana; TAVARES, Aline. Economia circular e o setor energético. Boletim Energético, Botafogo (RJ), jun. 2018. Disponível em: https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/26049/coluna_opiniao_ junho_suzana_e_aline.pdf.

CASTILHOS JUNIOR, Armando Borges et al. Principais processos de degradação de resíduos sólidos urbanos. In: ABES; RIMA (org.). Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades. Rio de Janeiro: ABES; Rima, 2003. p. 19-50. Disponível em: http://livroaberto.ibict.br/handle/1/529.

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS – CIBIOGÁS. Panorama do biogás no Brasil. São Paulo, 2021. Disponível em: https://materiais.cibiogas.org/panorama-do-biogas-2025-download-lp

COELHO, Willian Leonardo Vieira. Análise do potencial de geração de energia elétrica a partir dos resíduos do setor sucroenergético no estado de Mato Grosso em diferentes cenários produtivos. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 5,n. 2, p. 332-351, 2016.

GIDDENS, Anthony. A política da mudança climática. Rio de Janeiro: Zahar, 2010. Disponível em:https://www.epublicacoes.uerj.br/index.php/intersecoes/article/view/5776.

LANDIM, Ana Luiza Pinto Ferreira; AZEVEDO, Lizandra Prado de. O aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários: unindo o inútil ao sustentável. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, Rio de Janeiro, n. 27, p. 59-100, mar. 2008. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2433/1/BS%2027%20O%20aproveitamento%20energ%C3%A9rtico%20do%20biog%C3%A1s_P.pdf.

OLIVEIRA, P. A. V.; HIGARASHI, Martha Mayumi. Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos. Projeto de Controle da Degradação Ambiental Decorrente da Suinocultura em Santa Catarina, Concórdia, n. 115, p. 8-12, jun. 2006. Disponível em:https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/856124/1/doc115. pdf.

PORTER, M. Vantagem competitiva. Rio de Janeiro: Campus, 2009. RESÍDUOS NO BRASIL. Disponível em: https://pergamum.cjf.jus.br/pesquisa_geral?q=%20Porter,%20Michael%20E&for=AUTOR

RIBEIRO, B. M. B. Desenvolvimento de incinerador catalítico para redução de emissão de compostos orgânicos voláteis para a atmosfera. 2017. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

THEMELIS, Nickolas J.; ULLOA, Priscilla A. Geração de metano em aterros sanitários. Renewable Energy, v. 32, n. 7, p. 1243-1257, 2007. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148106001091.

VIEIRA, Nathália Duarte Braz; DA SILVA WALTER, Arnaldo César; SANTOS SILVA, Ivan Felipe. Avaliação de cenários para a descarbonização da geração elétrica no Brasil a partir do uso de biomassa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, XI, 2018.

SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA BASEADO EM REGRAS PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM ARMAZENAMENTO

1 Francisco Pereira da Silva, 2 Thamires Costa de Lima, 3 Kleber Carneiro de Oliveira
1 Universidade Federal da Paraíba, e-mail: francisco.silva@estudante.cear.ufpb.br; 2 Universidade Federal da Paraíba, e-mail: thamires.lima@cear.ufpb.br; 3 Universidade Federal da Paraíba, e-mail: kleber@cear.ufpb.br

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos; Armazenamento em Baterias; EMS Baseado em Regras

Introdução

Pela síntese do crescimento da demanda por energia elétrica, aliado à necessidade de redução dos impactos ambientais, percebe-se a expansão da geração distribuída baseada em sistemas fotovoltaicos. No Brasil, a elevada disponibilidade de recursos solares favorece a adoção dessa tecnologia. Todavia, a variabilidade inerente à geração fotovoltaica impõe desafios operacionais relacionados ao desbalanceamento entre oferta e demanda ao longo do dia, comprometendo o aproveitamento energético e a eficiência do sistema.

Nesse contexto, a integração de sistemas de armazenamento em baterias (Battery Energy Storage Systems – BESS) tem se destacado como uma alternativa capaz de aumentar a flexibilidade operacional, permitindo o armazenamento do excedente energético e sua utilização em períodos de maior demanda. No entanto, a simples inserção de sistemas de armazenamento não é suficiente para garantir melhorias significativas no desempenho energético e econômico, fazendo-se necessário a adoção de estratégias eficientes de gerenciamento.

Dessa maneira, os Sistemas de Gerenciamento de Energia (*Energy Management Systems* – EMS) desempenham papel fundamental na coordenação entre geração, consumo e armazenamento, objetivando otimizar o fluxo energético e maximizar o autoconsumo da energia gerada. Estratégias convencionais, como o *Peak Shaving*, são amplamente utilizadas com o objetivo de reduzir picos de demanda da rede elétrica. Nesse viés, tais abordagens apresentam limitações por atuarem de forma pontual e reativa, geralmente condicionadas apenas à ocorrência de picos de carga, sem explorar de maneira contínua o potencial do sistema de armazenamento. À vista disso, este trabalho propõe o desenvolvimento e a aplicação de um SEM baseado em regras, no qual a operação do sistema é definida a partir de condições lógicas que relacionam a geração fotovoltaica, a demanda da carga e o estado de carga da bateria (*State of Charge* – SoC). Diferentemente das abordagens convencionais, a estratégia proposta incorpora um mecanismo auxiliar de decisão baseado em um índice energético, responsável por avaliar continuamente o estado operacional do sistema e orientar as ações de carga e descarga da bateria.

Sob somática, são consideradas restrições operacionais que visam reduzir comutações frequentes entre os modos de operação, contribuindo para maior estabilidade do sistema e preservação da vida útil do armazenamento. A metodologia é pressuposta por meio de modelagem computacional, considerando perfis horários de geração e consumo, com o objetivo de analisar os impactos da estratégia na redução da dependência da rede elétrica, no aumento do autoconsumo e na melhoria da performance energética de sistemas fotovoltaicos com armazenamento.

Material e Métodos

De forma metodológica, o presente estudo foi desenvolvido a partir da modelagem computacional de um sistema fotovoltaico integrado a um sistema de armazenamento em baterias, com o intuito de avaliar o desempenho de um Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS) baseado em regras. A análise considerou dados horários de consumo e geração ao longo de um período anual, totalizando 8.760 intervalos de simulação. O perfil de consumo considerado representa uma unidade consumidora residencial do grupo B1, com demanda média de aproximadamente 400 kWh/mês. A geração fotovoltaica foi dimensionada para suprir integralmente essa demanda, enquanto o sistema de armazenamento foi definido com capacidade energética compatível com o excedente médio de geração e a demanda nos horários de maior consumo. O estado de carga da bateria (*State of Charge* – SoC) foi limitado entre o valor mínimo de 20% e valor máximo de 100%, garantindo a operação segura e a preservação da vida útil do sistema. A modelagem foi implementada em linguagem Python, utilizando bibliotecas voltadas à manipulação e análise de dados, permitindo a simulação do comportamento energético horário do sistema. Nessa lógica, o balanço energético (Equação 1) foi formulado de modo a garantir a conservação de energia em cada intervalo de tempo, considerando a interação entre geração fotovoltaica, consumo, armazenamento e energia trocada com a rede elétrica.

$$\text{Consumo} + \text{Geração} + \text{Rede} + \Delta\text{SoC} = 0$$

Onde as seguintes variáveis são categorizadas no dataframe como:

Consumo: corresponde à energia demandada pela carga ao longo do intervalo de análise, sendo sempre representado por valores positivos, por caracterizar uma retirada de energia do sistema.

Geração: refere-se à energia produzida pelo sistema fotovoltaico no período considerado para suprimento energético da carga. Por convenção, assume valores negativos, indicando uma injeção de energia no sistema.

Rede: representa a energia trocada com a rede elétrica, podendo ser positiva (importação) ou negativa (exportação).

ΔSoC: corresponde à variação do estado de carga da bateria no intervalo analisado. Valores positivos indicam aumento do nível de energia armazenada (carregamento), enquanto valores negativos representam a redução do estado de carga (descarga).

Inerentemente, a estratégia de gerenciamento proposta baseia-se em um conjunto de regras condicionais que determinam o regime de operação da bateria a partir da relação entre geração, demanda e estado de carga. Em condições de excedente de geração fotovoltaica, a energia disponível é direcionada prioritariamente para o carregamento da bateria, respeitando o limite máximo de SoC. Caso esse limite seja atingido, o excedente é exportado para a rede elétrica. Em situações de déficit energético, caracterizadas por uma demanda superior à geração disponível, a bateria é acionada para suprir a carga, desde que o SoC esteja acima do limite mínimo, sendo a rede utilizada apenas de forma complementar. Como contribuição adicional, foi incorporado ao EMS um índice auxiliar de decisão energética, responsável por avaliar continuamente o estado operacional do sistema. Esse índice é definido em função da diferença entre geração e consumo, normalizada pelo consumo máximo, e ponderada pelo estado de carga da bateria, conforme apresentado a seguir:

$$\mathrm{IDE}(t) = \frac{G(t) - C(t)}{C_{max}} + \alpha \cdot \mathrm{SoC}(t) \qquad (1)$$

Em que $G(t)$ representa a geração fotovoltaica, $C(t)$ o consumo, C_{max} o consumo máximo observado e α um coeficiente de ponderação associado ao estado de carga da bateria. A partir desse índice, são estabelecidos limiares de decisão que orientam o carregamento, a descarga ou a manutenção do estado da bateria, promovendo uma atuação mais contínua e adaptativa do sistema. Em adição, foram implementadas restrições operacionais com o objetivo de reduzir comutações frequentes entre os modos de operação, incluindo limites de histerese para acionamento da bateria; margens mínimas entre geração e demanda; e limites de potência de carga e descarga. Essas medidas contribuem para maior estabilidade operacional e para a redução do desgaste do sistema de armazenamento. Em finalização, a análise do desempenho da estratégia foi realizada por meio de indicadores energéticos e operacionais, incluindo o balanço energético do sistema, a energia importada e exportada da rede, o número de ciclos da bateria e o nível de autoconsumo da geração fotovoltaica. Esses parâmetros permitem analisar de forma integrada a eficácia do EMS na otimização do fluxo energético e na melhoria do desempenho do sistema.

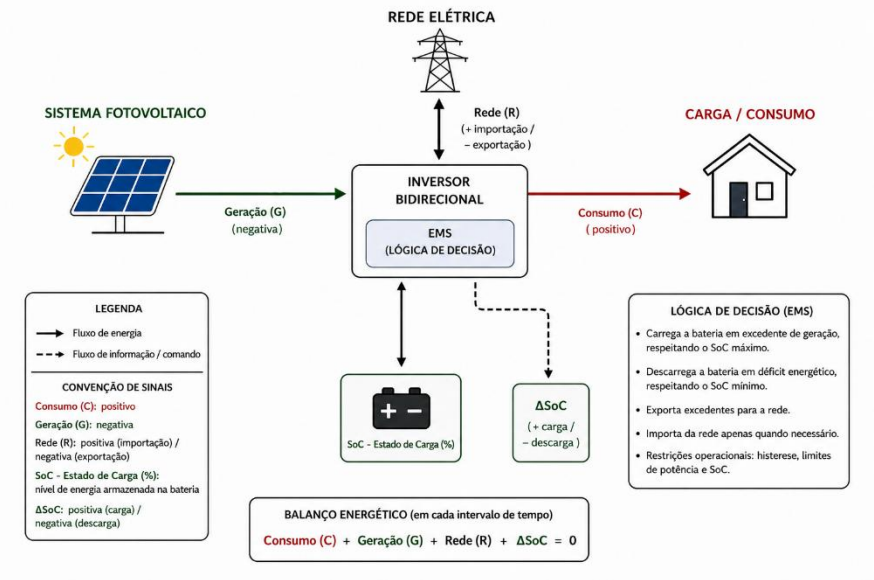


Figura 01: Fluxograma simplificado do EMS baseado em regras
Fonte: Elaboração Autoral (2026)

Resultados e Discussão

De forma quantitativa, a aplicação do Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS) baseado em regras permitiu avaliar de forma consistente o comportamento energético do sistema fotovoltaico com armazenamento ao longo do período simulado. A validação do modelo indicou erro acumulado desprezível no balanço energético ($3{,}36 \times 10^{-15}$), confirmando a coerência da modelagem e a correta representação das interações entre geração, consumo, armazenamento e rede elétrica. Em termos energéticos, o sistema apresentou geração fotovoltaica total de 5475,00 kWh, dos quais 3397,51 kWh foram diretamente

aproveitados pela carga, resultando em uma taxa de autoconsumo de 62,05%. Esse valor indica um bom aproveitamento da energia gerada localmente, evidenciando a eficácia do EMS em priorizar o uso interno da energia fotovoltaica.

A energia exportada para a rede totalizou 2077,49 kWh, enquanto a energia importada foi de 1403,29 kWh. Esse comportamento demonstra que, embora ainda exista dependência da rede elétrica, o sistema apresenta um balanço favorável à geração local com significativa redução da necessidade de importação. Logicamente, a atuação do EMS foi determinante nesse resultado, ao direcionar o excedente de geração para o armazenamento sempre que possível, reduzindo perdas por exportação imediata.

Subsequentemente, o sistema de armazenamento apresentou energia carregada de 723,22 kWh e descarregada de 722,42 kWh, resultando em uma eficiência global de 99,89%. Esse valor elevado está associado ao fato de que as perdas inerentes ao processo de carga e descarga da bateria não foram explicitamente consideradas na modelagem adotada. Ainda assim, a proximidade entre os valores de energia carregada e descarregada evidencia a consistência do modelo e a correta implementação do balanço energético, sem acúmulo significativo de erro ao longo da simulação.

A estratégia baseada em regras demonstrou atuação contínua ao longo do dia, permitindo adaptação dinâmica às variações de geração e consumo. A incorporação do índice auxiliar de decisão energética contribuiu para refinar o controle, promovendo transições mais suaves entre os modos de operação da bateria. Como resultado, observou-se redução de comutações desnecessárias e maior estabilidade operacional, aspectos fundamentais para a preservação da vida útil do sistema de armazenamento. Do ponto de vista funcional, verificou-se que, em períodos de excedente de geração, a bateria foi utilizada de forma eficiente para armazenamento de energia, enquanto, em situações de déficit energético, atuou no suprimento da carga, reduzindo a necessidade de importação da rede. Esse comportamento evidencia a efetividade da estratégia de deslocamento temporal da energia, na qual o excedente gerado é armazenado para uso em momentos mais oportunos.

Em somática, o aumento do autoconsumo aliado à redução da importação da rede indica potencial melhoria no desempenho econômico do sistema, especialmente em cenários com diferenciação tarifária. Embora não tenha sido realizada uma análise financeira detalhada, os resultados energéticos obtidos sugerem ganhos relevantes quando comparados a estratégias menos adaptativas. De forma geral, os resultados demonstram que o EMS baseado em regras, aliado ao mecanismo de decisão energética proposto, é capaz de promover uma operação eficiente, estável e adaptativa. A abordagem adotada maximiza o aproveitamento da geração fotovoltaica, reduz a dependência da rede elétrica e assegura um desempenho consistente do sistema de armazenamento, consolidando-se como uma solução robusta para o gerenciamento energético em sistemas fotovoltaicos com baterias.

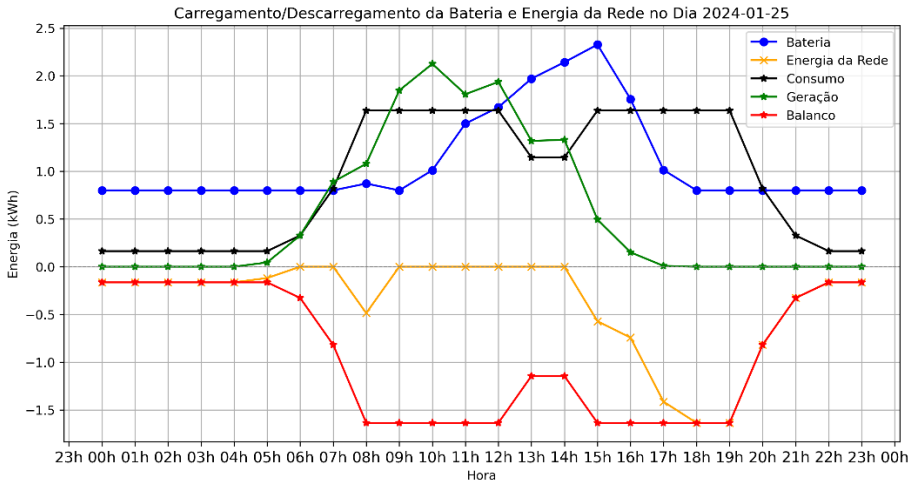


Figura 02: Perfil do comportamento energético do sistema de um dia representativo.
Fonte: Elaboração Autoral (2026)

Considerações Finais

Portanto, os resultados obtidos evidenciam que a estratégia de gerenciamento de energia baseada em regras foi eficaz na coordenação entre geração fotovoltaica, consumo e armazenamento, promovendo maior aproveitamento da energia gerada localmente e redução da dependência da rede elétrica. A atuação do EMS possibilitou o deslocamento temporal da energia, armazenando excedentes e disponibilizando-os em momentos de maior demanda, contribuindo para um perfil operacional mais eficiente. Nesse viés, a incorporação do índice auxiliar de decisão energética mostrou-se relevante para o aprimoramento do controle, proporcionando uma resposta mais adaptativa às variações do sistema. Como consequência, observou-se maior estabilidade operacional, com redução de comutações desnecessárias e melhor utilização do sistema de armazenamento.

Ademais, o modelo apresentou comportamento consistente ao longo de toda a simulação, mantendo o equilíbrio energético e respeitando as restrições operacionais estabelecidas. Embora as perdas associadas ao sistema de armazenamento não tenham sido explicitamente consideradas, os resultados obtidos evidenciam a robustez da abordagem proposta como ferramenta de análise e suporte ao gerenciamento energético. Como continuidade do trabalho, pode-se mencionar a incorporação de modelos mais detalhados do sistema de armazenamento, contemplando perdas e efeitos de degradação, bem como a integração de estratégias preditivas e a avaliação sob diferentes estruturas tarifárias. Ademais, a inclusão de uma análise de viabilidade

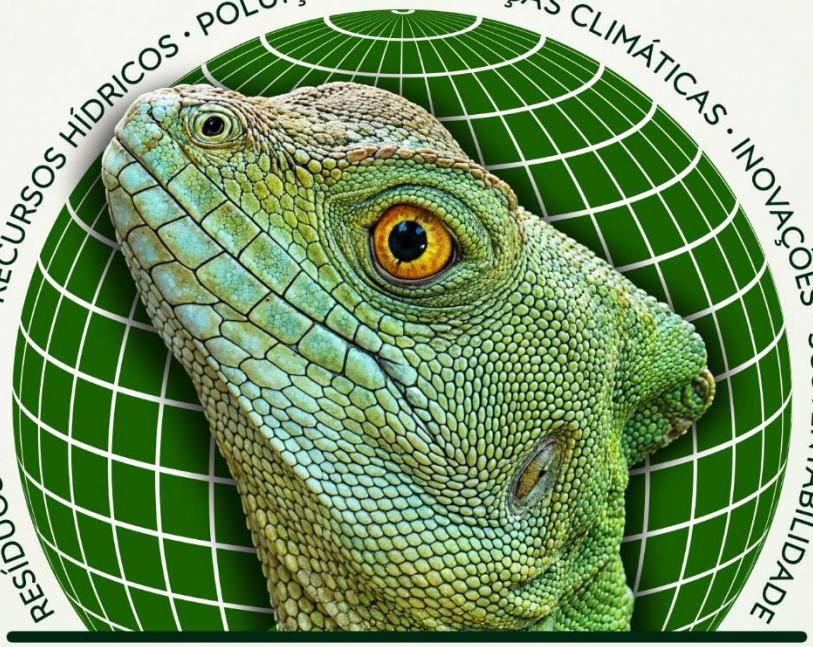
econômica pode ampliar a compreensão dos impactos da estratégia, contribuindo para uma avaliação mais abrangente do desempenho técnico e financeiro do sistema.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-ANP), gerido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por meio de bolsa de graduação (Processo nº 2025/19510-6). Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do PRH-ANP 35/UFPB – Transição Energética (Processo nº 2025/03815-2), contribuindo para a formação de recursos humanos qualificados para o setor energético no contexto da transição energética e da transformação ecológica.

ÁREA TEMÁTICA 9

ESG E COMPLIANCE AMBIENTAL



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

A INTEGRAÇÃO DAS DIMENSÕES ESG NA INOVAÇÃO INDUSTRIAL

1 Mariana Bini Leite, 2 Claudiney Peretti, 3 Oscar Rubem Klegues Montedo, 4 Ciro Antonio Fernandes, 5 Gustavo Cristiano Sampaio

1 Universidade da Região de Joinville, e-mail: mariana.leite25@univille.br; 2 Universidade do Contestado, e-mail: claudiney.peretti@unc.br; 3 Universidade do Extremo Sul Catarinense, e-mail: okm@unesc.net; 4 Universidade do Planalto Catarinense, e-mail: prof.ciro@uniplaclages.edu.br; 5 Universidade do Contestado, e-mail: gustavo.sampaio@professor.unc.br.

Palavras-chave: Indústria 5.0; sustentabilidade industrial; inovação industrial

Introdução

A dinâmica industrial contemporânea tem sido marcada pela transição da Indústria 4.0 para a Indústria 5.0, movimento que transcende a digitalização e a automação dos processos produtivos, incorporando dimensões de sustentabilidade, resiliência e centralidade humana (European Commission, 2021). Essa mudança reflete uma evolução conceitual e prática no campo da inovação industrial, que passa a ser orientada não apenas por ganhos de eficiência, mas também por propósitos sociais e ambientais.

A Indústria 4.0, consolidada a partir da quarta revolução industrial, baseou-se na aplicação intensiva de tecnologias como inteligência artificial, internet das coisas (em inglês, Internet of Things - IoT), análise de grandes dados (big data analytics) e robótica autônoma, com o objetivo de otimizar custos e aumentar a produtividade (Kamble et al., 2021). Contudo, o predomínio de uma visão tecnicista revelou limitações quanto à inclusão do fator humano e à sustentabilidade dos processos produtivos, abrindo espaço para um novo paradigma: a Indústria 5.0.

O conceito, proposto oficialmente pela Comissão Europeia (2021), redefine o papel da tecnologia, que passa a ser meio para o desenvolvimento sustentável. A Indústria 5.0 propõe um modelo humanocentrado, no qual a colaboração homem-máquina, a ética digital e o compromisso ambiental tornam-se elementos estruturantes das estratégias corporativas. Assim, a inovação deixa de ter caráter exclusivamente tecnológico e assume função estratégica na criação de valor social e ambiental, contribuindo para a transição rumo a economias mais verdes e inclusivas (Nahavandi, 2019; Xu et al., 2023).

Nesse contexto, os princípios ESG (Environmental, Social and Governance ou Ambiental, Social e Governança) surgem como instrumento integrador entre a inovação e a sustentabilidade. A literatura recente indica que a incorporação de critérios ESG na indústria fortalece a governança corporativa, melhora o desempenho ambiental e amplia a legitimidade das organizações perante investidores e sociedade (Carayannis & Morawska-Jancelewicz, 2022; Demir et al., 2024). Entretanto, apesar do crescente número de estudos sobre Indústria 5.0 e ESG, observa-se fragmentação teórica e escassez de análises integrativas que consolida o estado da arte dessa convergência. Diante desse cenário, a questão que orienta esta pesquisa é: como as dimensões ESG têm sido integradas aos modelos de inovação industrial no contexto da Indústria 5.0, e quais tendências emergem dessa convergência nas publicações científicas recentes?

Material e Métodos

A pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão sistemática integrativa da literatura, cuja finalidade é reunir, avaliar criticamente e sintetizar resultados de estudos sobre um tema específico de forma ampla e estruturada. O método adotado segue as diretrizes do PRISMA e o modelo de Whittemore e Knafl (2005), que orienta a revisão integrativa em cinco etapas: identificação do problema, busca na literatura, avaliação dos dados, análise e síntese.

As bases de dados Scopus, Web of Science e Wiley Online Library foram selecionadas pela relevância e abrangência internacional de suas publicações científicas. A busca foi realizada no período de 2021 a 2025, devido à recente intensificação das discussões sobre ESG e Indústria 5.0, sobretudo após a consolidação das agendas globais de sustentabilidade e da retomada econômica pós-pandemia.

Para garantir abrangência e precisão, aplicaram-se operadores booleanos e descritores combinados de pesquisa:

– Scopus: TITLE-ABS-KEY (“Industry 5.0” OR “sustainable industry” OR “human-centric manufacturing” OR “sustainable digitalization”) AND (“ESG” OR “environmental social governance” OR “sustainability”) AND (“innovation” OR “technological innovation” OR “eco-innovation”) AND (“industrial systems” OR “manufacturing” OR “production systems”) AND PUBYEAR > 2021 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (OA,"all")).

– Web of Science: ALL=((“Industry 5.0” OR “sustainable industry” OR “human-centric manufacturing” OR “sustainable digitalization”) AND (“ESG” OR “environmental social governance” OR “sustainability”) AND (“innovation” OR “technological innovation” OR “eco-innovation”) AND (“industrial systems” OR “manufacturing” OR “production systems”)).

– Wiley: (“Industry 5.0” OR “sustainable industry” OR “human-centric manufacturing” OR “sustainable digitalization”) AND (“ESG” OR “environmental social governance” OR “sustainability”) AND (“innovation” OR “technological innovation” OR “eco-innovation”) AND (“industrial systems” OR “manufacturing” OR “production systems”).

Os periódicos foram restringidos aos artigos publicados em revistas. A última busca foi realizada em outubro de 2025, limitada a periódicos e de acesso aberto (“open access”).

Os registros foram exportados em formato RIS e organizados na plataforma online Rayyan, utilizada para auxiliar a triagem sistemática. Após a remoção de duplicatas por título e DOI, procedeu-se à análise por título e resumo, seguida da leitura integral dos estudos elegíveis. As exclusões foram realizadas conforme os critérios EC1–EC5, que correspondem, respectivamente, a: fora do escopo temático, setor não industrial, fora do período definido (2021–2025), idioma diferente de português, inglês ou espanhol e registros duplicados.

Os dados foram extraídos em planilha estruturada com campos relativos ao checklist PRISMA. Essa organização permitiu identificar padrões e agrupar os estudos em quatro eixos temáticos principais: (a) integração ESG em modelos de inovação industrial; (b) tecnologias emergentes e digitalização sustentável; (c) inovação humanocentrada e colaborativa; e (d) governança e mensuração ESG.

A síntese dos dados foi realizada por meio de análise de conteúdo temática (Bardin, 2016), que possibilitou a categorização das evidências e a identificação de tendências, lacunas e desafios relacionados à integração entre inovação, sustentabilidade e governança no contexto industrial. O processo de categorização foi realizado de forma independente por dois revisores, com conferência cruzada dos resultados, assegurando confiabilidade e validade metodológica.

Resultados e Discussão

A pesquisa inicial resultou em um total de 789 registros. Após a remoção de duplicatas por DOI, permaneceram 461 artigos.

Os critérios de exclusão (EC1–EC5) foram definidos com base nas diretrizes do PRISMA 2020 (Page et al., 2021) e no método de Whittemore e Knafl (2005), assegurando transparência e reprodutibilidade no processo de seleção dos estudos. Foram excluídos: (EC1) artigos fora do escopo temático, que não abordavam a integração entre ESG, inovação e Indústria 5.0; (EC2) publicações referentes a setores não industriais, por não representarem o contexto produtivo analisado; (EC3) estudos fora do período de 2021 a 2025, correspondente à consolidação conceitual da Indústria 5.0; (EC4) documentos em idiomas diferentes do português, inglês ou espanhol; e (EC5) registros duplicados entre bases de dados consultadas. A Figura 01 apresenta os resultados dos critérios aplicados.

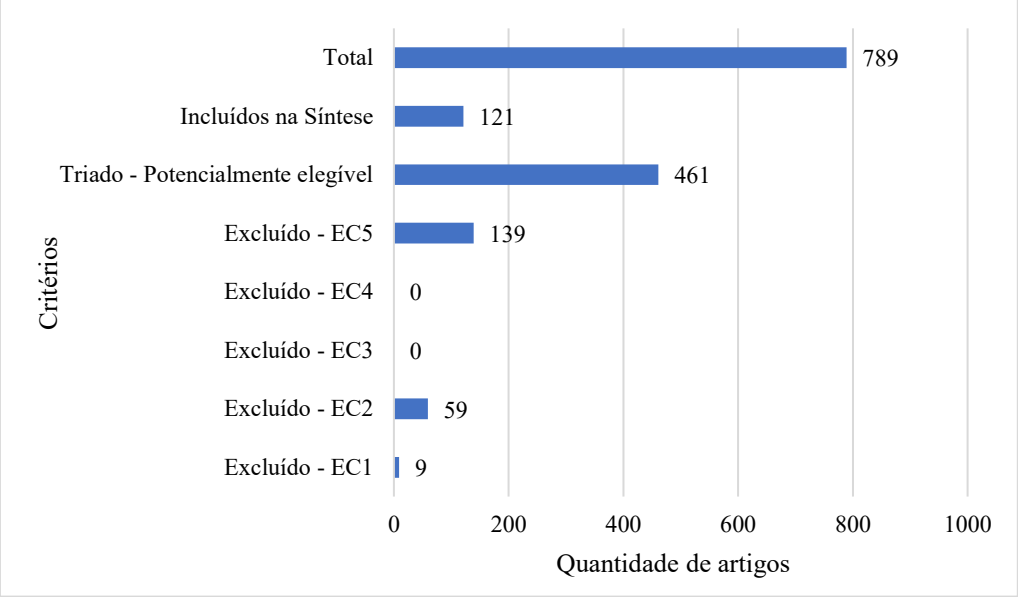


Figura 01: Fluxograma do processo de revisão conforme a metodologia PRISMA adaptado.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Após a triagem inicial de eliminação de duplicatas, estudos fora do período, idioma diverso ou escopo, os 461 artigos remanescentes foram submetidos à análise de coerência, relevância e representatividade conceitual, conforme metodologia PRISMA.

Essa etapa visou assegurar que apenas estudos com alinhamento entre objetivo, método e resultados fossem mantidos, observando os quatro eixos teóricos: (A) integração ESG em modelos de inovação industrial, (B) tecnologias emergentes e digitalização sustentável, (C) inovação humanocentrada e colaborativa e (D) governança e mensuração ESG. Foram excluídos artigos genéricos sobre sustentabilidade corporativa sem vínculo com o ambiente industrial, textos sem rigor metodológico (como editoriais ou revisões narrativas) e publicações redundantes entre bases indexadas. O resultado foi a consolidação de 121 estudos, que compõem a população final de análise.

A seguir, a Figura 02 apresenta a correlação dos artigos analisados e os eixos de categoria.

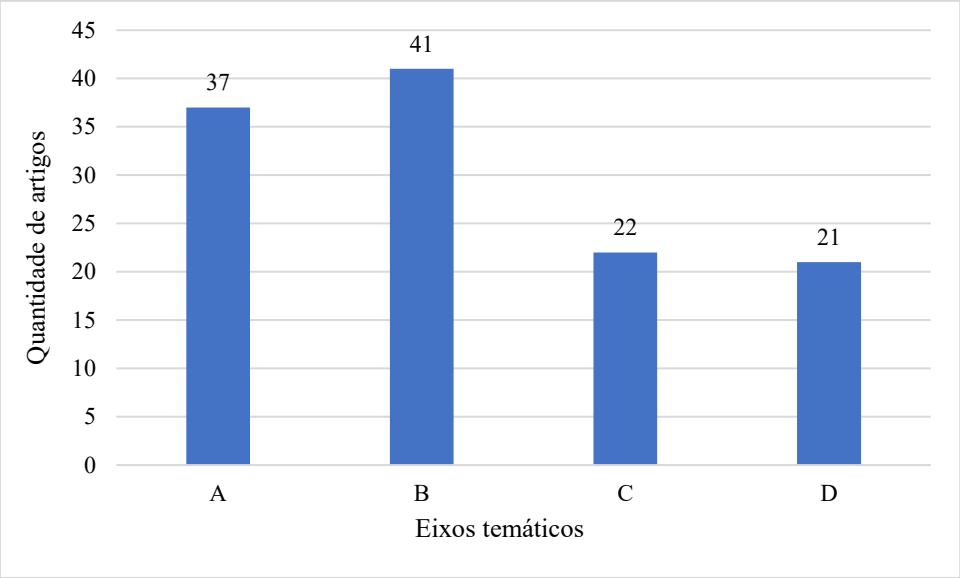


Figura 02: Categorização dos artigos analisados por eixos temáticos.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

O Eixo B – Tecnologias emergentes e digitalização sustentável apresentou a maior representatividade, com 33,9% dos estudos, refletindo o crescimento da literatura sobre a Indústria 5.0 e a transformação digital associada à sustentabilidade. O Eixo A – Integração ESG em modelos de inovação industrial correspondeu a 30,6% dos artigos, demonstrando a consolidação da governança ambiental e social como vetor de inovação nos sistemas produtivos. Em seguida, o Eixo C – Inovação humanocentrada e colaborativa representou 18,2%, destacando abordagens voltadas à centralidade humana, bem-estar e colaboração em ambientes industriais. Por fim, o Eixo D – Governança e mensuração ESG compreendeu 17,3%, evidenciando o avanço das discussões sobre indicadores e métricas de desempenho sustentáveis na gestão corporativa.

No Eixo A – Integração ESG em modelos de inovação industrial, os estudos revelam que a dimensão ambiental (E) predomina nas abordagens de inovação, com ênfase em eficiência energética, circularidade de materiais e redução de emissões. Essa predominância reflete o avanço das políticas de mitigação de impactos e a incorporação de métricas ambientais em sistemas produtivos (Silva et al., 2022; Mujtaba et al., 2023). Contudo, observa-se menor representação das dimensões social e de governança, o que demonstra lacunas na integração completa do tripé ESG.

Eixo B aborda sobre as tecnologias emergentes e digitalização sustentável, o qual a literatura evidencia que tecnologias como inteligência artificial, gêmeos digitais e cadeia de blocos (em inglês *blockchain*) verde têm se mostrado fundamentais para aprimorar a rastreabilidade e a transparência dos processos industriais. Essas soluções contribuem para a chamada digitalização sustentável, que busca equilibrar produtividade, eficiência energética e responsabilidade ambiental (Yao et al., 2023). Entretanto, poucos estudos apresentam métricas consolidadas sobre os impactos dessas tecnologias em termos de desempenho ESG, o que limita a avaliação empírica de seus benefícios reais.

No Eixo C (inovação humanocentrada e colaborativa) os estudos revelam que a transição para a Indústria 5.0 introduz o conceito de humanocentricidade, enfatizando a valorização do capital humano e a interação colaborativa entre pessoas e sistemas inteligentes. Os trabalhos analisados destacam que o protagonismo humano é essencial para o uso ético e inclusivo da tecnologia, mas ainda há escassez de pesquisas que explorem indicadores sociais e de bem-estar como parte das estratégias de inovação (Carayannis e Morawska-Jancelewicz, 2022; Xu et al., 2023).

Por fim, no Eixo D (governança e mensuração ESG) observou-se que a governança corporativa aplicada à inovação industrial permanece fragmentada. Muitos estudos mencionam frameworks como a GRI (Global Reporting Initiative, tradução para Iniciativa Global de Relatórios), a SASB (Sustainability Accounting Standards Board, Conselho de Padrões de Contabilidade para Sustentabilidade) e o ESRS (European Sustainability Reporting Standards, tradução para Padrões Europeus de Relato de Sustentabilidade), mas carecem de validação empírica e uniformidade de indicadores que permitam comparar diferentes setores e regiões. Essa ausência de padronização limita a consolidação de um modelo global de mensuração da sustentabilidade industrial (Demir et al., 2024).

Considerações Finais

O presente estudo analisou como as dimensões ambiental, social e de governança estão incorporadas aos modelos de inovação industrial no contexto da Indústria 5.0. Os resultados mostram uma transição conceitual e prática em direção a sistemas produtivos mais sustentáveis, digitais e voltados às pessoas.

A dimensão ambiental ainda prevalece nas discussões acadêmicas, entretanto se observa avanço gradual das dimensões social e de governança. Isso aponta para a necessidade de abordagens cada vez mais integradas, que unam inovação tecnológica, sustentabilidade e responsabilidade corporativa.

Conclui-se que o alinhamento entre inovação tecnológica e sustentabilidade pondera a competitividade industrial e contribui para a consolidação de práticas produtivas éticas e resilientes.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências Bibliográficas

BARDIN, L. **Análise de conteúdo.** Edição revista e atualizada. Lisboa: Edições 70, 2016.

CARAYANNIS, E. G.; MORAWSKA-JANCELEWICZ, J. The futures of Europe: Industry 5.0 as an accelerator of twin transition. **Journal of the Knowledge Economy**, v. 13, n. 5, p. 3089–3109, 2022. DOI: 10.1007/s13132-021-00854-2

DEMIR, E.; ARSLAN, A.; CEYLAN, A. Corporate governance and sustainability measurement in the Industry 5.0 era. **Journal of Cleaner Production**, v. 420, p. 140845, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140845

ECCLES, R. G.; KLIMENKO, S.; STROEHLE, J. C. The future of ESG reporting and the convergence of global standards. **Harvard Business Review**, Boston, v. 100, n. 3, p. 45–53, 2022.

EUROPEAN COMMISSION. **Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry.** Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. DOI: 10.2777/308407

MUJTABA, G.; YOUSAF, Z.; SHAHZAD, A. ESG-driven sustainable innovation in manufacturing firms: A pathway toward Industry 5.0. **Sustainability**, v. 15, n. 2, p. 1201, 2023. DOI: 10.3390/su15021201

PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, p. n71, 2021. DOI: 10.1136/bmj.n71

SILVA, R. F.; SANTOS, J. C.; LIMA, P. H. Integrating environmental performance and innovation in industrial sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 374, p. 133898, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133898

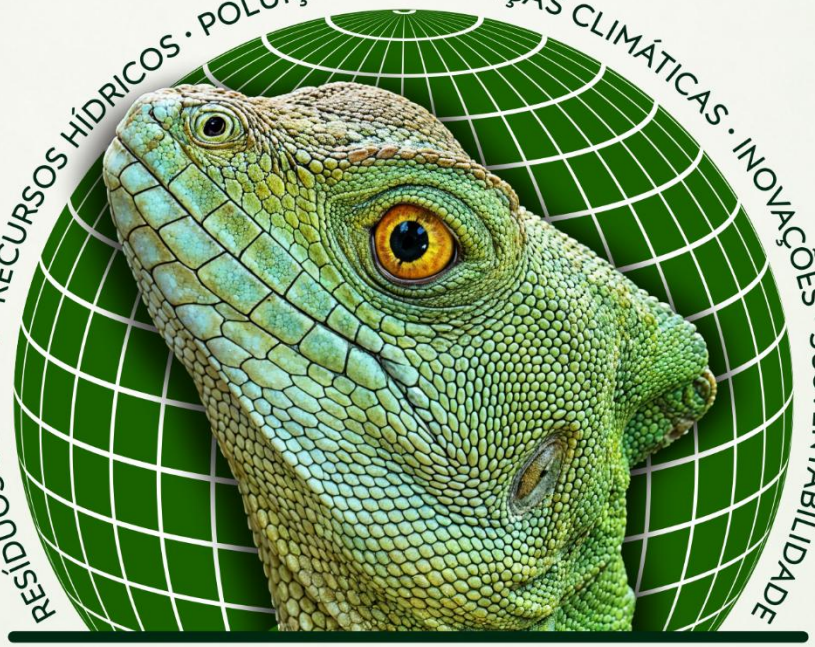
WHITTEMORE, R.; KNAFL, K. The integrative review: Updated methodology. **Journal of Advanced Nursing**, v. 52, n. 5, p. 546–553, 2005. DOI: 10.1111/j.1365-2648.2005.03621.x

XU, X.; LI, C.; CHEN, Y. Human-centric innovation and collaborative intelligence in Industry 5.0. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 191, p. 122537, 2023. DOI: 10.1016/j.techfore.2023.122537

YAO, L.; ZHANG, X.; WANG, Q. Sustainable digitalization and green blockchain applications in industrial ecosystems. **Journal of Industrial Ecology**, v. 27, n. 6, p. 1510–1524, 2023. DOI: 10.1111/jiec.13384

ÁREA TEMÁTICA 10

GEOTECNOLOGIAS E MONITORAMENTO AMBIENTAL



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

DESAFIOS AMBIENTAIS DA URBANIZAÇÃO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS URBANAS: ESTUDO DO CÓRREGO DA SERRA EM NOVA VENÉCIA (ES)

1 Guilherme Ferreira e Silva, 2 Ediu Carlos Lopes Lemos

1 Instituto Federal do espírito Santo, e-mail:guilhermefsgeologia@gmail.com; 2 Instituto Federal do espírito Santo, e-mail: ediulemos@gmail.com

Palavras-chave: Urbanização; Bacias hidrográficas; Impactos ambientais

Introdução

A urbanização constitui um dos principais fatores de transformação das paisagens naturais, promovendo alterações significativas na dinâmica das bacias hidrográficas. O crescimento urbano acelerado, frequentemente associado à ocupação desordenada do solo e à insuficiência de infraestrutura de saneamento, resulta em impactos ambientais que comprometem a qualidade dos recursos hídricos e a funcionalidade dos ecossistemas aquáticos (Tucci, 2017; Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2016).

As bacias hidrográficas urbanas configuram-se como unidades territoriais estratégicas para a compreensão dos processos ambientais, pois integram aspectos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos e socioeconômicos. Nesse contexto, a urbanização altera o regime hidrológico, intensifica processos erosivos, reduz a infiltração, promove o assoreamento e aumenta a carga de poluentes nos corpos hídricos (Allan, 2004; Silva, Santos & Galdino, 2016).

A literatura científica descreve esse conjunto de alterações como *Urban Stream Syndrome*, caracterizado por mudanças hidrológicas, químicas e biológicas recorrentes em cursos d'água urbanizados (Walsh et al., 2005; Booth, 2016). No Brasil, esses impactos são agravados pela ocupação irregular de Áreas de Preservação Permanente (APPs), pela supressão da vegetação ripária e pela fragilidade do planejamento urbano (Tucci, 2017).

O município de Nova Venécia, no estado do Espírito Santo, apresenta um quadro representativo dessa problemática. O Córrego da Serra, inserido em uma bacia hidrográfica urbana, tem sido impactado pela expansão da malha urbana, pela ocupação das margens e pelo lançamento de efluentes, configurando um cenário de degradação ambiental progressiva.

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar os desafios ambientais decorrentes da urbanização na bacia hidrográfica do Córrego da Serra, identificando os principais impactos ambientais e discutindo suas implicações para a gestão dos recursos hídricos e o planejamento urbano.

Material e Métodos

A área de estudo corresponde à bacia hidrográfica do Córrego da Serra, localizada no município de Nova Venécia (ES). O curso d'água possui aproximadamente 11 km de extensão, atravessando áreas rurais e urbanas até desaguar no rio Cricaré. A região apresenta clima tropical, com verões chuvosos e invernos mais secos, e vegetação original de Mata Atlântica, atualmente fragmentada em função das atividades antrópicas.

A metodologia adotada baseou-se em uma abordagem integrada, combinando técnicas de sensoriamento remoto, geoprocessamento e diagnóstico ambiental em campo. Inicialmente, realizou-se revisão bibliográfica sobre urbanização, bacias hidrográficas urbanas e impactos ambientais em corpos hídricos.

Foram utilizadas imagens de satélite do Google Earth referentes aos anos de 1985, 2004, 2014 e 2024, bem como imagens do satélite CBERS-4A, processadas no software QGIS, para análise da expansão urbana e do uso e ocupação do solo. A cobertura vegetal ao longo do córrego foi avaliada por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), permitindo a identificação de padrões espaciais de vegetação ripária.

Com base nos resultados do NDVI, o curso do córrego foi dividido em três trechos, considerando diferentes níveis de preservação ambiental. Complementarmente, realizou-se trabalho de campo com levantamento fotográfico e observação direta dos impactos ambientais. Para o diagnóstico ambiental, foi aplicado o Protocolo de Avaliação Rápida (PAR), adaptado de Callisto et al. (2002), considerando parâmetros como ocupação das margens, assoreamento, alteração do canal, impactos antrópicos, estabilidade das margens e extensão da mata ciliar.

Resultados e Discussão

A análise temporal evidenciou que a expansão urbana de Nova Venécia ocorreu de forma significativa ao longo das últimas décadas, especialmente nas proximidades do Córrego da Serra. Observou-se que o crescimento da mancha urbana avançou sobre áreas adjacentes ao curso d'água, intensificando a ocupação das margens e a impermeabilização do solo (Figura 1).

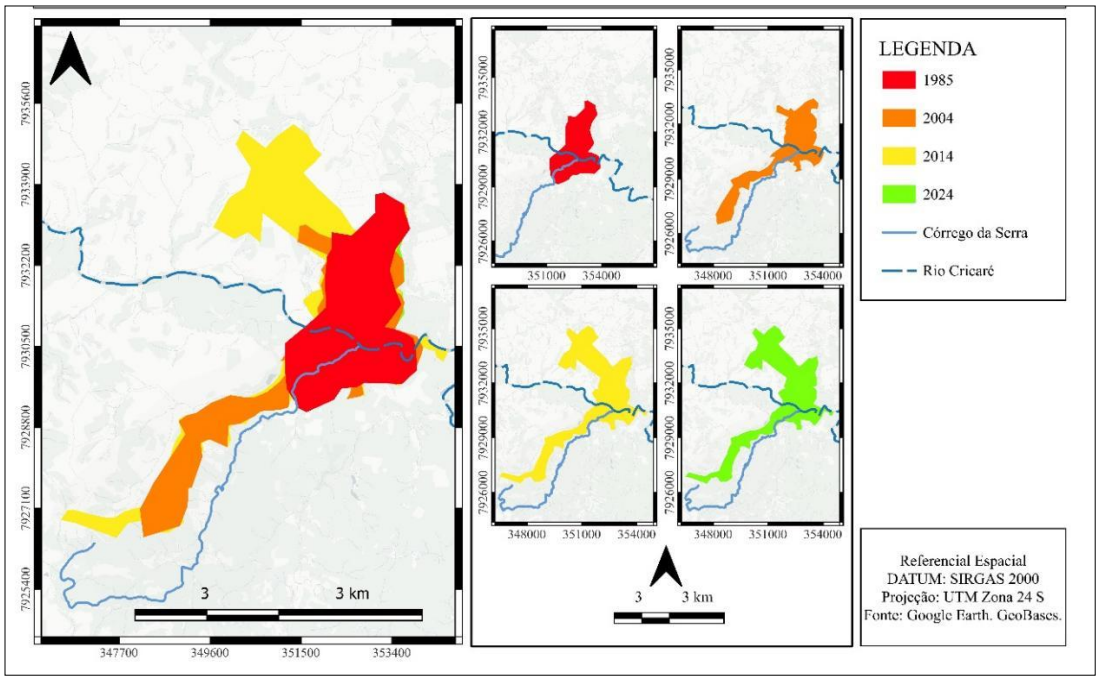


Figura 01: Crescimento da Zona Urbana da cidade de Nova Venécia-ES
Fonte: AUTOR (2025)

Os resultados do NDVI indicaram um gradiente espacial de degradação ambiental ao longo da bacia hidrográfica. No Trecho 1, localizado em área menos urbanizada, constatou-se maior presença de vegetação ripária, embora já existam impactos associados à pecuária e à mineração (Figura 2). Esse padrão confirma a relevância da vegetação ciliar na proteção dos cursos d'água contra processos erosivos e assoreamento (Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2016; Almeida, 2016).

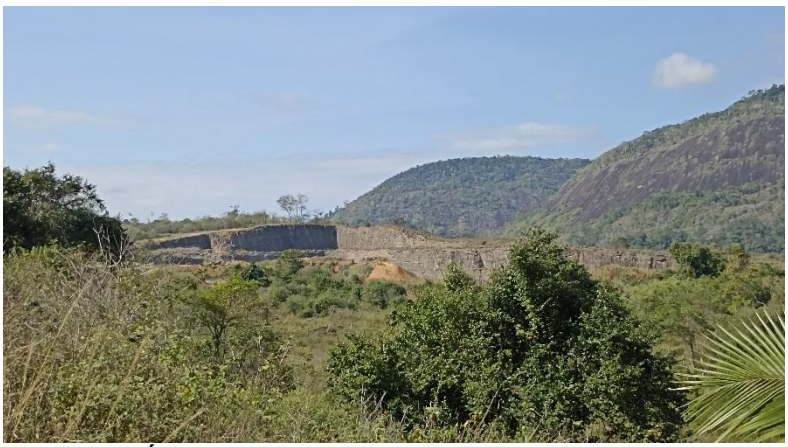


Figura 02: Área nas proximidades da nascente do córrego da serra
Fonte: AUTOR (2025)

No Trecho 2, observou-se fragmentação da cobertura vegetal, com redução da mata ciliar e presença de atividades agropecuárias. Esse estágio intermediário de degradação reflete a diminuição da capacidade de filtragem de poluentes e da estabilidade das margens, conforme destacado por Tucci (2017).

No Trecho 3, inserido no perímetro urbano, verificou-se o maior grau de degradação ambiental, caracterizado pelo lançamento de efluentes, ligações clandestinas de esgoto, canalização do leito, impermeabilização das margens e quase ausência de vegetação ripária(Figura 3). Esse cenário corresponde ao padrão descrito por Walsh et al. (2005) e Booth (2016), evidenciando a artificialização dos cursos d'água urbanos.



Figura 03: Trecho do Córrego da serra na área urbana da cidade
Fonte: AUTOR (2025)

A aplicação do PAR revelou que os parâmetros mais comprometidos foram a extensão da mata ciliar, o assoreamento do leito e a ocupação das margens. Esses resultados demonstram a relação direta entre expansão urbana e degradação ambiental da bacia hidrográfica, corroborando estudos que apontam a urbanização como fator determinante na perda de qualidade dos ecossistemas aquáticos (Allan, 2004; Silva, Santos & Galdino, 2016).

Além dos impactos ambientais, observou-se que a ocupação da planície de inundação expõe a população local a riscos socioambientais, como enchentes, contaminação hídrica e perdas materiais. Esses aspectos evidenciam a interdependência entre processos ambientais e sociais, reforçando a necessidade de abordagens integradas na gestão das bacias hidrográficas urbanas.

Considerações Finais

O estudo evidenciou que a urbanização constitui o principal fator de degradação ambiental na bacia hidrográfica do Córrego da Serra, promovendo alterações significativas na dinâmica hidrológica, ecológica e geomorfológica do sistema fluvial.

A perda da vegetação ripária, o lançamento de efluentes e a ocupação irregular das margens configuram os principais desafios ambientais identificados, comprometendo a qualidade da água e a estabilidade das margens, além de intensificarem os riscos socioambientais.

A análise integrada por meio de sensoriamento remoto, índices de vegetação e diagnóstico ambiental demonstrou a existência de um gradiente de degradação associado ao grau de urbanização, confirmando o caráter multifatorial dos impactos sobre as bacias hidrográficas urbanas.

Diante desse cenário, destaca-se a necessidade de políticas públicas integradas de planejamento urbano, gestão de recursos hídricos e saneamento ambiental, bem como ações de recuperação da mata ciliar e controle da ocupação das margens. Tais medidas são fundamentais para a mitigação dos impactos ambientais e para a promoção da sustentabilidade das bacias hidrográficas urbanas.

Conclui-se que a bacia do Córrego da Serra representa um exemplo emblemático dos desafios enfrentados pelos corpos hídricos urbanos no Brasil, reforçando a importância do monitoramento ambiental contínuo e da articulação entre ciência, gestão pública e sociedade.

Referências Bibliográficas

Allan, J. D. (2004). Landscapes and riverscapes: The influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35, 257–284.

Almeida, D. A. (2016). Função ecológica das matas ciliares em ecossistemas aquáticos. *Revista Brasileira de Ecologia*, 20(2), 45–56.

Booth, D. B. (2016). Urban stream syndrome: A global perspective. *Freshwater Science*, 35(1), 412–420.

Callisto, M., Ferreira, W., Moreno, P., Goulart, M., & Petrucio, M. (2002). Aplicação de protocolos de avaliação rápida da diversidade de habitats em atividades de ensino e pesquisa. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 14(1), 91–98.

Silva, L. H., Santos, P. R., & Galdino, M. (2016). Urbanização e seus efeitos sobre a dinâmica de bacias hidrográficas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(4), 1–14.

Tundisi, J. G., & Matsumura-Tundisi, T. (2016). *Limnologia*. Oficina de Textos.

Tucci, C. E. M. (2017). Urbanização e recursos hídricos: desafios e oportunidades. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 22(3).

Walsh, C. J., Roy, A. H., Feminella, J. W., Cottingham, P. D., Groffman, P. M., & Morgan, R. P. (2005). The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *Journal of the North American Benthological Society*, 24(3), 706–723.

SENSIBILIDADE SOCIOECONÔMICA EM MAPAS DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL AO ÓLEO: PROPOSTA CONCEITUAL E SISTEMATIZAÇÃO DE VARIÁVEIS PARA ANÁLISE INTEGRADA

1 DScDaiana Marques Costa, 2 Dra.Paulina Setti Riedel, 3 Dr.Fabio Augusto Gomes Vieira Reis
1 UNESP/Rio Claro, e-mail: daiana.m.costa@unesp.br; 2 UNESP/Rio Claro, e-mail: paulina.riedel@unesp.br; 3 UNESP/Rio Claro, e-mail: fabio.reis@unesp.br

Palavras-chave: Cartas SAO; vulnerabilidade socioeconômica; gestão costeira

Introdução

Os derramamentos de óleo se configuram como eventos de elevado potencial de impacto em ambientes costeiros, afetando simultaneamente os meios físicos, biológicos e socioeconômicos. Esses eventos têm sido amplamente reconhecidos como uma das principais ameaças aos ecossistemas costeiros, dada sua capacidade de provocar impactos persistentes sobre habitats sensíveis e atividades humanas (Gundlach; Hayes, 1978; NOAA, 2019; IPIECA, 2022). Nesse contexto, os mapas de sensibilidade ambiental ao óleo, também conhecidos como Cartas SAO, constituem ferramentas fundamentais para o planejamento de contingência e a gestão de riscos, permitindo a identificação de áreas prioritárias para proteção e a definição de estratégias de resposta (NOAA, 2019; Utomo et al., 2021).

Esses mapas são tradicionalmente estruturados a partir da representação de três componentes principais: o Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL), que expressa a sensibilidade física da linha de costa; os recursos biológicos, caracterizados por áreas de ocorrência, reprodução, alimentação e registros pontuais de espécies, incluindo aquelas ameaçadas; e os recursos de uso humano, igualmente representados de forma pontual (Gundlach; Hayes, 1978; Vafai *et al*., 2013; Belo Smith *et al*., 2011). Embora esses componentes sejam fundamentais para a compreensão da sensibilidade ambiental, não há, em geral, integração entre eles por meio de índices quantitativos, sendo apresentados, predominantemente, como camadas informativas independentes (NOAA, 2019; Depellegrin; Pereira, 2016).

Enquanto o componente físico encontra-se metodologicamente consolidado, sobretudo a partir das classificações propostas por Gundlach e Hayes (1978), amplamente adotadas como referência internacional, a partir de sua consolidação pelo NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), a dimensão socioeconômica ainda apresenta lacunas significativas, especialmente no que se refere à definição de variáveis e à padronização de sua representação. Em geral, os elementos associados ao uso humano do território, como pesca, turismo e infraestrutura costeira, são representados apenas por sua localização espacial, sem a incorporação de atributos que permitam avaliar sua relevância ou determinar seu grau de sensibilidade frente a eventos de derramamento de óleo, o que limita o potencial analítico das Cartas SAO e compromete a comparabilidade entre estudos (Shavykin; Karnatov, 2018; Rakasiwi, 2020).

Paralelamente, a literatura sobre vulnerabilidade social demonstra que fatores como estrutura demográfica, desigualdade econômica, dependência de recursos naturais e acesso a serviços influenciam diretamente a capacidade de resposta e recuperação frente a eventos ambientais (Cutter; Boruff; Shirley, 2003; Feng *et al*., 2021; Carey *et al*., 2014). Esses estudos reforçam que os impactos de derramamentos de óleo extrapolam a dimensão ecológica e se manifestam de forma significativa sobre as populações e suas dinâmicas socioeconômicas (IPIECA, 2022; Clear Seas, 2020), evidenciando a necessidade de abordagens que integrem essas dimensões de forma estruturada.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo propor uma abordagem conceitual e sistematizar um conjunto de variáveis socioeconômicas para a análise da sensibilidade ao óleo, organizadas de forma a permitir sua futura integração em modelos analíticos, contribuindo para o aprimoramento metodológico das Cartas SAO e para o fortalecimento das ferramentas de gestão e planejamento costeiro.

Material e Métodos

O presente estudo foi desenvolvido a partir de uma revisão bibliográfica de caráter analítico, crítico e integrador, orientada à identificação e sistematização de variáveis relevantes para a avaliação da sensibilidade socioeconômica em contextos de derramamentos de óleo. A revisão contemplou diretrizes técnicas consolidadas, como o *Environmental Sensitivity Index Guidelines* (NOAA, 2019), os documentos da IPIECA (2022) voltados à avaliação de impactos socioeconômicos e compensação, e os relatórios da iniciativa Clear Seas (2020), que enfatizam a integração entre componentes ambientais e socioeconômicos na gestão de riscos costeiros. Adicionalmente, foram considerados estudos aplicados ao mapeamento da sensibilidade ambiental ao óleo e à análise de vulnerabilidade em ambientes costeiros, incluindo abordagens baseadas em sistemas de informação geográfica, lógica fuzzy e avaliação multicritério (Vafai *et al*., 2013; Depellegrin; Pereira, 2016; Utomo *et al*., 2021; Sardi *et al*., 2020).

A partir da análise crítica da literatura, foram identificadas e sistematizadas variáveis relevantes para a representação da sensibilidade socioeconômica, organizadas em dimensões analíticas interdependentes. O processo de seleção visou assegurar consistência teórica, coerência analítica e aplicabilidade em diferentes contextos costeiros. Nesse sentido, se considerou a

relevância teórica das variáveis, com base em sua recorrência em estudos sobre sensibilidade ao óleo e vulnerabilidade socioeconômica (NOAA, 2019; IPIECA, 2022; Cutter et al., 2003), bem como sua relação direta com os impactos decorrentes de derramamentos de óleo, priorizando aquelas capazes de representar efeitos imediatos e indiretos sobre populações e atividades econômicas costeiras (Clear Seas, 2021; Depellegrin; Pereira, 2016; Feng *et al*., 2021).

Adicionalmente, foram considerados critérios relacionados à representatividade das dimensões da vulnerabilidade, contemplando aspectos de exposição, sensibilidade e capacidade de resposta (Cutter *et al*., 2003; Carey *et al*., 2014), bem como à viabilidade de aplicação empírica, considerando a disponibilidade de dados em bases secundárias oficiais, como censos demográficos e registros de atividades econômicas. Por fim, foi avaliado o potencial de integração das variáveis em abordagens quantitativas futuras, permitindo sua incorporação em índices de sensibilidade compostos e modelos multicritério (Shavykin; Karnatov, 2018; Rakasiwi, 2020; Akuna *et al*., 2018). A estrutura resultante foi consolidada em um quadro sintético e em um modelo conceitual de relações entre variáveis, configurando uma base teórica replicável para a análise da sensibilidade socioeconômica em cenários de derramamentos de óleo.

Resultados e Discussão

A análise realizada permitiu identificar que a sensibilidade socioeconômica pode ser compreendida como um fenômeno multidimensional, resultante da interação entre exposição ao risco, dependência de recursos naturais, estrutura socioeconômica e capacidade de resposta das populações. Nesse sentido, foi proposta uma estrutura organizada em diferentes dimensões analíticas, conforme apresentado no Quadro 1.

Dimensão	Variável	Descrição	Relação com a sensibilidade ao óleo
Exposição populacional	Densidade populacional	Número de habitantes por área	Maior número de pessoas potencialmente afetadas
Dependência econômica	Dependência da pesca e mariscagem	Uso direto de recursos naturais	Impacto imediato na subsistência
	Aquicultura	Produção em ambientes costeiros	Alta vulnerabilidade à contaminação
Atividades econômicas	Turismo e recreação	Uso recreativo das áreas costeiras	Perdas econômicas e impacto na imagem
Infraestrutura	Serviços básicos	Saúde, transporte e saneamento	Influencia resposta e recuperação
Demografia	População vulnerável	Crianças e idosos	Maior suscetibilidade aos impactos
Uso do território	Atividades portuárias e industriais	Uso intensivo da zona costeira	Ampliação dos impactos
	Comunidades tradicionais	Dependência direta do ambiente	Alta vulnerabilidade social
Valor socioeconômico	Valor cultural e patrimonial	Áreas simbólicas e históricas	Impactos irreversíveis
Acessibilidade	Acesso físico	Facilidade de acesso	Influencia resposta operacional

Quadro 1: Estrutura proposta de variáveis para análise da sensibilidade socioeconômica
Fonte: elaborado pela autora (2026)

Os resultados indicam que variáveis relacionadas à exposição populacional e à dependência econômica apresentam forte influência na magnitude dos impactos, especialmente em comunidades que dependem diretamente de recursos costeiros para subsistência. Além disso, fatores estruturais, como infraestrutura e acessibilidade, desempenham papel fundamental na capacidade de resposta e recuperação, influenciando a resiliência das populações afetadas. A incorporação de variáveis culturais e territoriais amplia a análise, permitindo considerar impactos não econômicos, frequentemente negligenciados em abordagens tradicionais.

A Figura 1 apresenta um modelo conceitual da sensibilidade socioeconômica estruturado como uma rede de interações entre diferentes dimensões e variáveis, evidenciando não apenas sua organização sistêmica, mas também a intensidade das relações estabelecidas entre os componentes. A sensibilidade socioeconômica é influenciada por quatro dimensões principais: exposição populacional, dependência econômica, capacidade de resposta e valor socioeconômico. A dimensão de exposição populacional inclui variáveis, como densidade populacional e grupos vulneráveis, indicando o contingente populacional exposto e seu grau de suscetibilidade. A dependência econômica abrange atividades como pesca, mariscagem e aquicultura, além da presença de comunidades tradicionais, refletindo a dependência direta dos recursos costeiros. A capacidade de resposta é representada por infraestrutura e acessibilidade, que condicionam a habilidade de reação e recuperação frente aos impactos, enquanto o valor socioeconômico engloba turismo, valor cultural e uso portuário ou industrial, incorporando tanto aspectos econômicos quanto simbólicos.

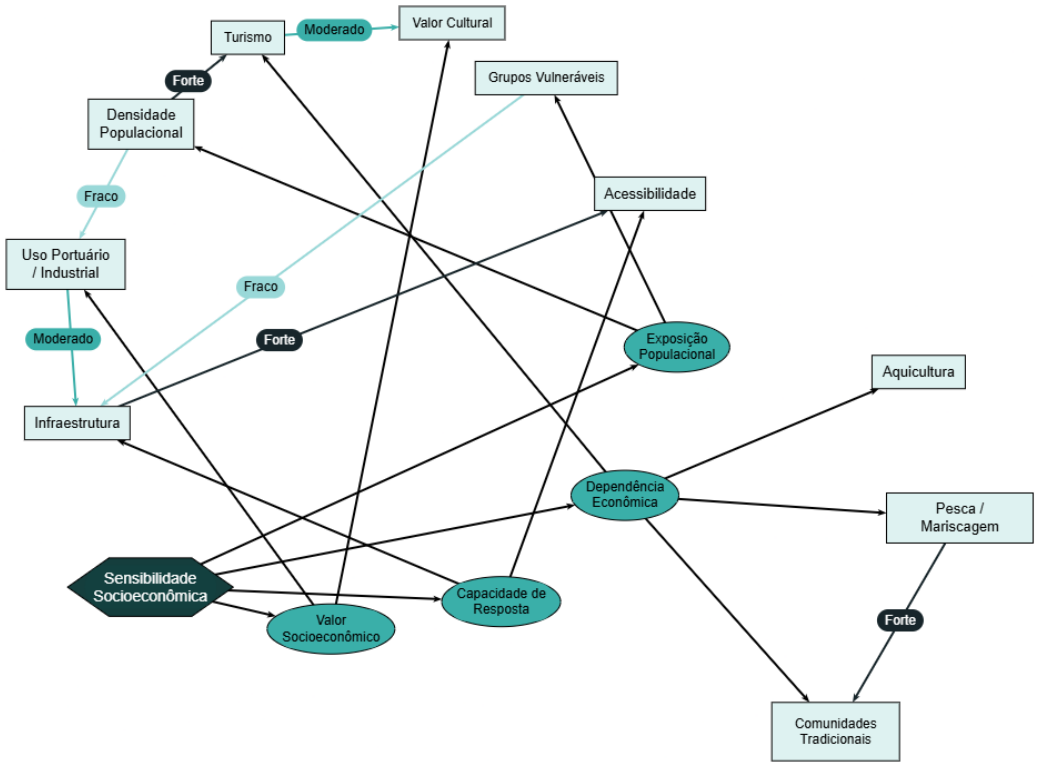


Figura 1: Modelo conceitual das relações entre variáveis da sensibilidade socioeconômica
Fonte: elaborado pela autora (2026)

As relações entre as variáveis são diferenciadas por níveis de intensidade. Relações fortes são observadas, por exemplo, entre pesca e comunidades tradicionais, evidenciando a dependência direta desses grupos em relação aos recursos naturais, bem como entre infraestrutura e acessibilidade, indicando que melhores condições estruturais ampliam significativamente a capacidade de resposta. Também se destaca como relação forte a influência da densidade populacional sobre atividades como o turismo, uma vez que áreas mais densamente ocupadas tendem a concentrar maior uso e pressão sobre o território. Relações moderadas são identificadas entre turismo e valor cultural, bem como entre uso portuário ou industrial e infraestrutura, refletindo interações relevantes, porém mediadas por outros fatores. Por outro lado, relações fracas, como aquela entre grupos vulneráveis e infraestrutura ou entre densidade populacional e uso portuário, indicam influências indiretas ou condicionadas ao contexto local. Dessa forma, a figura demonstra que a sensibilidade socioeconômica resulta de um sistema interdependente no qual diferentes variáveis exercem influências distintas, reforçando a necessidade de abordagens integradas e hierarquizadas para a análise dos impactos de derramamentos de óleo.

Considerações Finais

O estudo evidenciou que a sensibilidade socioeconômica constitui um componente essencial, porém ainda insuficientemente desenvolvido, na análise da sensibilidade ambiental ao óleo. Enquanto o componente físico encontra-se amplamente consolidado e padronizado em escala internacional, a dimensão socioeconômica permanece marcada por lacunas conceituais e metodológicas, sendo frequentemente representada de forma pontual e desprovida de critérios que permitam avaliar seu grau de sensibilidade e suas inter-relações.

A proposta conceitual apresentada contribui para o avanço dessa temática ao sistematizar variáveis organizadas em dimensões analíticas interdependentes, oferecendo uma base estruturada para a incorporação do componente socioeconômico em análises de sensibilidade ambiental. Essa abordagem permite superar limitações associadas à representação isolada dos elementos de uso humano, favorecendo uma compreensão mais integrada dos impactos de derramamentos de óleo sobre as populações costeiras e suas dinâmicas territoriais.

Além disso, a definição clara e fundamentada dessas variáveis representa um passo fundamental para o fortalecimento das ferramentas de planejamento e gestão costeira, uma vez que os impactos desses eventos se manifestam diretamente sobre a vida humana, suas atividades produtivas, relações sociais e valores culturais. Ao promover maior padronização e comparabilidade entre estudos, a estrutura proposta cria condições para o desenvolvimento de abordagens mais robustas e aplicáveis em diferentes contextos.

Por fim, destaca-se que esta pesquisa estabelece uma base conceitual para estudos futuros voltados à construção de um índice de sensibilidade socioeconômica, possibilitando a integração quantitativa das variáveis propostas em modelos multicritério. Nesse sentido, o avanço na estruturação da dimensão socioeconômica representa não apenas o preenchimento de uma lacuna

metodológica, mas um passo estratégico para a evolução das análises de sensibilidade ambiental ao óleo, orientando-as para uma abordagem verdadeiramente integrada e centrada na proteção dos sistemas costeiros e das populações que deles dependem.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-ANP), financiado por meio de recursos provenientes da Cláusula de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I), conforme estabelecido na Resolução ANP n.º 50/2015. Os autores também reconhecem o suporte acadêmico e institucional do Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente da Universidade Estadual Paulista (UNESP), câmpus de Rio Claro. Adicionalmente, agradecem ao UNESPetro – Centro de Ciências Naturais Aplicadas, Centro de Pesquisa vinculado à UNESP, pelo apoio técnico e científico fornecido ao longo do desenvolvimento deste estudo.

Referências Bibliográficas

AKUNA, J.; NWILO, P.; OLAYINKA, D. Environmental sensitivity index mapping of shoreline to oil spill using fuzzy logic. Journal of Environmental Protection, v. 9, n. 10, p. 1163–1177, 2018. DOI: https://doi.org/10.4236/jep.2018.910072.

BELO SMITH, A.; CERASUOLO, G.; PERALES, J. A.; ANFUSO, G. Environmental sensitivity maps: The northern coast of Gibraltar Strait example. *Journal of Coastal Research*, 2011.

CAREY, Janet M.; KNAPP, Sabine; IRVING, Paul. Assessing ecological sensitivities of marine assets to oil spill by means of expert knowledge. *Econometric Institute Report*, n. 2014-13. Rotterdam: Erasmus University, 2014. Disponível em: https://repub.eur.nl/

CLEAR SEAS CENTRE FOR RESPONSIBLE MARINE SHIPPING. *Assessing Sensitivity of Coastal Areas to Oil Spills*. Vancouver: Clear Seas, 2020. Disponível em: https://clearseas.org.

CUTTER, S. L.; BORUFF, B. J.; SHIRLEY, W. L. Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, v. 84, n. 2, p. 242–261, 2003. DOI: https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002.

DEPELLEGRIN, D.; PEREIRA, P. Assessing oil spill sensitivity in unsheltered coastal environments. *Marine Pollution Bulletin*, v. 102, p.44-57, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.042.

FENG, Q.; AN, C.; CHEN, Z.; OWENS, E.; NIU, H.; WANG, Z. Assessing the coastal sensitivity to oil spills from the perspective of ecosystem services: a case study for Canada's Pacific coast. *Journal of Environmental Management*, v. 296, p. 113240, 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113240.

GUNDLACH, E. R.; HAYES, M. O. Vulnerability of coastal environments to oil spill impacts. Marine Technology Society Journal, v. 12, n. 4, p. 18–27, 1978.

IPIECA. *Economic assessment and compensation for oil spill impacts*. London, 2022. Disponível em: https://www.ipieca.org.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION – NOAA. *Environmental Sensitivity Index Guidelines*. Version 4.0. Seattle: NOAA, 2019. Disponível em: https://response.restoration.noaa.gov.

RAKASIWI, R. K. Environmental sensitivity index assessment algorithm in coastal areas: a method. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, v. 584, 2020. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/584/1/012043

SARDI, S. S.; QURBAN, M. A.; LI, W.; KADINJAPPALLI, K. P.; MANIKANDAN, P. Ka.; HARIRI, M. M.; TAWABINI, B. S.; KHALIL, A. B.; EL-ASKARY, H. Assessment of areas environmentally sensitive to oil spills in the western Arabian Gulf, Saudi Arabia, for planning and undertaking an effective response. *Marine Pollution Bulletin*, v. 150, p. 110588, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110588

SHAVYKIN, A.; KARNATOV, A. Main development problems of vulnerability mapping of sea-coastal zones to oil spills. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 6, n. 4, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/jmse6040152.

UTOMO, S. W.; RISDIANTO, R. K.; TAMBUNAN, R. P.; HERNAWAN, U. Environmental sensitivity index analysis for coastal protection of oil spill in Fakfak, Papua, Indonesia. *Global NEST Journal*, v. 23, n. 2, p. 241-248, 2021. DOI: 10.30955/gnj.003566. Disponível em: https://doi.org/10.30955/gnj.003566.

VAFAI, F.; HADIPOUR, V.; HADIPOUR, A. Determination of shoreline sensitivity to oil spills by use of GIS and fuzzy model: case study – the coastal areas of Caspian Sea in north of Iran. *Ocean & Coastal Management*, v. 71, p. 123-130, 2013. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2012.05.033.

AVALIAÇÃO DOS SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS DE PROVISÃO E REGULAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITAJAÍ-MIRIM (SC)

1 Jullia Comicholi Jargas, 1 Ana Luiza Silva Donazzolo, 2 Rodrigo Fortunato de Oliveira, 1,2 Vivian de Mello Cionek

1 Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI, e-mail: julliajargas@gmail.com; 2 Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI, e-mail: analuisa1414@live.com; rodrigofortunato144@gmail.com; vivian.cionek@univali.br

Palavras-chave: Importância ecossistêmica, Serviços Ambientais, Uso e Ocupação do Solo, Geoprocessamento.

Introdução

Os serviços ecossistêmicos representam os benefícios que a humanidade obtém dos ecossistemas, sendo fundamentais para a promoção do bem-estar humano, ao apoio à vida, independente de avanços tecnológicos (MEA, 2003). Esses serviços são classificados em quatro categorias: serviços de regulação, de provisão, culturais e de suporte. Dentre eles, destacam-se os serviços de regulação, que são aqueles responsáveis por regular os processos, ciclos e funções do ecossistema, e os serviços de provisão que garantem o abastecimento de alimentos, combustíveis e outros bens de uso e consumo pela sociedade (MEA, 2003).

A avaliação destes serviços requer a avaliação de condições ecológicas que integrem processos ecossistêmicos. Para serviços de regulação hídrica, por exemplo, é importante avaliar a capacidade de infiltração do solo, a densidade da cobertura vegetal e a estabilidade das vertentes, para avaliar a capacidade de um ecossistema (CHEN et al., 2021). Estudos baseados em sensoriamento remoto, dados de uso e cobertura do solo e modelagem geoespacial são os mais utilizados para esse tipo de análise (STOYCHEVA; GENELETTI, 2023). A análise temporal dos dados de cobertura da terra, obtidos principalmente por imagens de satélite, tem permitido identificar variações na oferta de serviços ecossistêmicos ao longo do tempo, especialmente em contextos de rápidas transformações do uso do solo (SONG; DENG, 2017; FU et al., 2015). A utilização de indicadores ecológicos derivados do mapeamento permite inferir indiretamente a capacidade do ecossistema de manter a provisão de determinados serviços, sem necessariamente recorrer à medição direta de variáveis biofísicas em campo.

Nesse sentido, a manutenção da provisão de serviços ecossistêmicos em bacias hidrográficas está diretamente relacionada à conservação dos ecossistemas, a qual, por sua vez, depende das formas de uso e ocupação do solo. Mudanças no uso da terra, como a expansão agrícola, urbanização e desmatamento, afetam processos ecológicos fundamentais como o ciclo da água, a dinâmica dos nutrientes e a estabilidade do solo comprometendo a capacidade dos ecossistemas em fornecer serviços de forma contínua (FU et al., 2015).

Dessa forma, compreender e diagnosticar o uso do solo em uma bacia hidrográfica torna-se essencial para identificar áreas prioritárias para conservação e manejo, bem como subsidiar estratégias de planejamento ambiental (GOLDMAN et al., 2009). A Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí-Mirim (BHRIM), em Santa Catarina, exemplifica a pressão sobre esses serviços. A região drena áreas ocupadas historicamente por agricultura, mineração e urbanização, o que reflete negativamente na qualidade de suas águas (ROEDEL et al., 2024). Esta bacia possui uma relevância socioeconômica vital para o estado de Santa Catarina, sendo a principal fonte de abastecimento público para diversos municípios da região. No entanto, a BHRIM enfrenta desafios críticos relacionados com a qualidade da água e a integridade dos seus solos. Embora a bacia ainda apresente uma cobertura florestal significativa (cerca de 60%), os processos de uso antrópico intensivo, especialmente em áreas de agricultura no Alto Itajaí-Mirim, têm desencadeado processos erosivos acentuados (SANCHEZ, 2024).

Com isso, se faz importante o estudo e definição das áreas com maior importância ecossistêmica para manutenção dos serviços de provisão e regulação na Bacia do Rio Itajaí-Mirim.

Material e Métodos

O rio Itajaí-Mirim é a maior sub-bacia da bacia de drenagem do rio Itajaí-Açú, fazendo parte da Região Hidrográfica do Vale do Itajaí (RH 7). Drena pelos municípios de Vidal Ramos, Presidente Nereu, Botuverá, Guabiruba e Brusque; e parcialmente por outros quatro municípios (M. HOMECHIN Jr & A.C. BEAUMORD, 2007).

Índices de Importância Ecossistêmica foram calculados para a BHRIM, seguindo Cartolano, 2023. Provisão de bens e produtos, e provisão hídrica foram estimados para imóveis rurais na bacia (cadastrados no Sistema Nacional de Cadastro Ambiental (SICAR) em 2022), e ranqueados em uma escala que variou entre 0 (sem provisão) e 5 (provisão alta). Bens e produtos soram classificados conforme o uso e cobertura da terra do MapBiomas e avaliados por áreas produtivas dentro do imóvel rural (silvicultura, agricultura e pastagem). A silvicultura recebeu nota cinco, agricultura nota quatro, pastagem nota três e a ausência dessas três classes no imóvel foi concebida nota zero.

Para provisão hídrica foram extraídos dados da Agência Nacional de Águas (ANA) e classificados com maiores notas (4 e 5) aqueles imóveis que possuem nascentes ou trechos de hidrografia, já os demais foram classificados de acordo com o uso e cobertura da terra que permite maior infiltração e recarga de água no solo.

Serviços ecossistêmicos de regulação incorporaram a proporção de Status da Reserva Legal (RL), Status da Área de Preservação Permanente (APP), Estoque de Carbono e Risco à erosão nas propriedades. Imóveis com excedente de vegetação

nativa na Reserva Legal (RL) em relação ao mínimo exigido pelo Código Florestal (20%) ou apenas atendem a legislação receberam as maiores notas, já os que estão com maiores passivos, foram classificados com as menores notas.

O Status de APP foi avaliado com base nos dados de Cursos hídricos (ANA), gerando buffer de 30 metros. Notas mais altas foram atribuídas imóveis em conformidade, e quanto maior os passivos, menores as notas. Os dados de Estoque de carbono foram extraídos do Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa - GEE disponibilizado pelo INPE, estimando-se o carbono estocado na vegetação nativa de cada imóvel e o resultado foi dividido pela área total da propriedade. Com um valor de carbono estocado por hectare, por propriedade, esses valores foram distribuídos em 5 classes iguais e atribuídas as notas de 0 (menos de 1tC/ha) a 5. Para o Risco à Erosão os dados foram extraídos da tese de Sanchez, 2024. e reprojetados, considerando notas mais altas para as classes de maior risco.

As notas atribuídas a cada um dos critérios, por meio da ponderação dos indicadores, serviram de base para a criação de 2 (dois) índices, nomeadamente Índices de Importância Ecossistêmica (IIE), que podem variar entre 0 e 100 conforme equações (01,02) abaixo:

$$\boldsymbol{IE\ Provisão} = (Bens\ e\ produtos * 10) + (Hídrica * 10) \quad (01)$$

$$\boldsymbol{IE\ Regulação} = (Status\ APP * 5) + (Status\ RL * 5) + (Carbono * 5) + (Erosão * 5) \quad (02)$$

Os resultados do índice foram ranqueados em cinco categorias: Classe I (0-20), Classe II (20-40), Classe III (40-60), Classe IV (60-80) e Classe V (80-100).

Resultados e Discussão

Foram identificados 5.523 imóveis cadastrados no sistema, aos quais foram atribuídas notas de serviços de regulação e provisão para a BHRIM (Tabela 1).

PROVISÃO						
Provisão Hídrica						
Notas	**Indicadores**	**CLASSE MF**				**Total Geral**
		I	**II**	**III**	**IV**	
5	Nascentes	451	803	208	72	1534
4	Hidrografia	1795	1019	65	3	2882
3	Vegetação Nativa	604	128	17	5	754
2	Áreas produtivas e Antropizadas	316	14	3		333
0	Áreas Edificadas	20				20
Total Geral		**3186**	**1964**	**293**	**80**	**5523**
Provisão de Bens e Produtos						
Notas	**Indicadores**	**CLASSE MF**				**Total Geral**
		I	**II**	**III**	**IV**	
5	Silvicultura	435	533	120	45	1133
4	Agricultura	1080	525	30	4	1639
3	Pastagem	1043	738	111	22	1914
0	Ausência	628	168	32	9	837
Total Geral		**3186**	**1964**	**293**	**80**	**5523**
REGULAÇÃO						
Status RL						
Notas	**Indicadores**	**CLASSE MF**				**Total Geral**
		I	**II**	**III**	**IV**	
5	> 150%	1419	1456	252	75	3202
4	100 - 150%	266	153	10	---	429
3	50 - 100%	377	155	9	2	543
2	25 - 50%	199	71	4	1	275
1	1 - 25%	285	74	14	1	374
0	< 1%	640	55	4	1	700
Total Geral		**3186**	**1964**	**293**	**80**	**5523**
Status APP						
Notas	**Indicadores**	**CLASSE MF**				**Total Geral**
		I	**II**	**III**	**IV**	
5	80 - 100%	533	575	146	52	1306
4	60 - 80%	306	390	41	13	750
3	40 - 60%	322	316	41	5	684
2	20 - 40%	336	263	24	3	626
1	0 - 20%	437	232	21	3	693
0	0%	1252	188	20	4	1464

Total Geral		**3186**	**1964**	**293**	**80**	**5523**
Estoque de Carbono						
Notas	**Indicadores (tC/ha)**	**CLASSE MF**				**Total**
		I	**II**	**III**	**IV**	
5	146,5 - 182,9	393	342	111	40	886
4	110,1 - 146,5	373	417	60	16	866
3	73,8 - 110,1	382	416	64	14	876
2	37,4 - 73,8	485	419	30	7	941
1	1 - 37,4	889	317	23	3	1232
0	0 - 1	664	53	5	0	722
Total Geral		**3186**	**1964**	**293**	**80**	**5523**
Risco à Erosão						
Notas	**Indicadores**	**CLASSE MF**				**Total Geral**
		I	**II**	**III**	**IV**	
5	Muito Alto	7	3	-	-	10
4	Alto	259	27	-	-	286
3	Médio	67	10	-	-	77
2	Baixo	49	11	1	-	61
1	Muito Baixo	2804	1913	292	80	5089
Total		**3186**	**1964**	**293**	**80**	**5523**

Tabela 01: Classificação da provisão de serviços de regulação e provisão na BHIM
Fonte: Autor, 2026

Os imóveis rurais da BHRIM apresentaram predominância de importância ecossistêmica intermediária a alta (40–80), indicando que a bacia apresenta, de modo geral, boa capacidade de provisão de serviços ecossistêmicos (Figura 1). As áreas classificadas entre 60–80 e 80–100 representam regiões onde a combinação de fatores naturais e uso do solo favorece a manutenção dos serviços. Áreas com menor importância (0–40) aparecem de forma pontual e estão associadas, em geral, a regiões mais antropizadas ou com menor cobertura vegetal, indicando atenção para ações de manejo e recuperação.

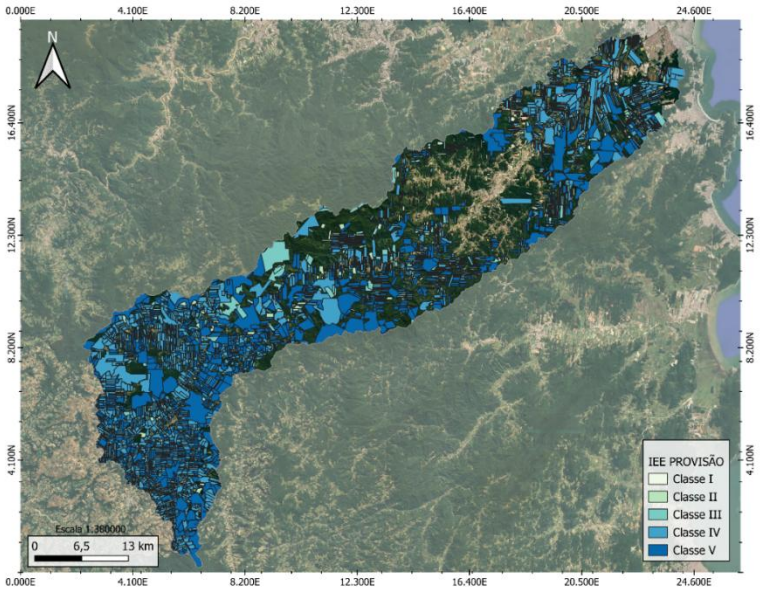


Figura 01: Classificação dos imóveis em relação ao IIE Provisão.
Fonte: Do autor (2026)

A análise espacial do IIE de Regulação (Figura 2) definiu que classes mais baixas de importância ecológica se concentram nas extremidades da bacia. Essas áreas apresentam menor capacidade de regulação, possivelmente em função da menor proteção de APPs, da fragmentação da vegetação e da maior pressão antrópica. As áreas centrais da bacia apresentam maior predominância de classes intermediárias a altas, indicando maior capacidade de regulação. Destaca-se a presença de cobertura vegetal contínua que desempenha papel fundamental na elevação do IIE. Esse padrão sugere que a bacia apresenta, de modo geral, uma capacidade moderada de regulação, independentemente do tamanho da propriedade.

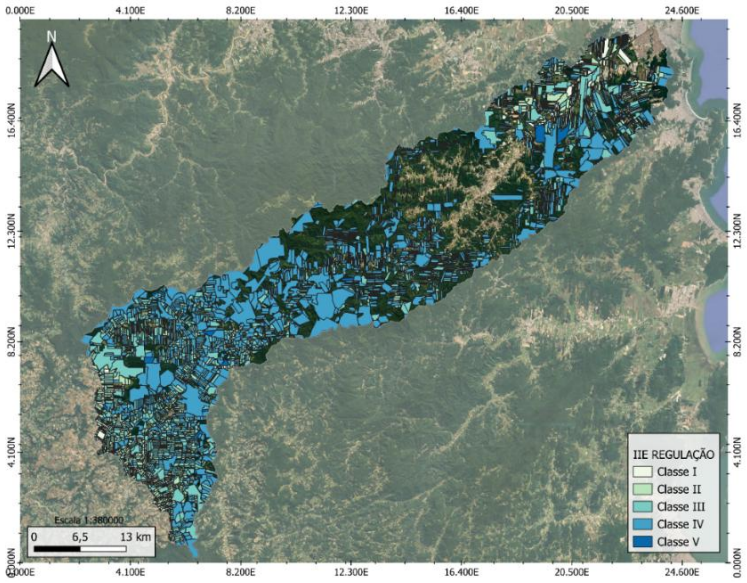


Figura 02: Classificação dos imóveis em relação ao IIE Regulação.
Fonte: Do autor (2026)

Considerações Finais

A BHRIM apresenta Importância Ecossistêmica de Regulação e Provisão intermediárias a altas. O tipo de ocupação dos imóveis rurais favorece a manutenção de uso relativamente equilibrado, e a sua espacialização pode ser utilizada, inclusive, para indicação de áreas adequadas para futuros programas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA).

Agradecimentos

JCJ agradece aos membros do Lab. De Ecologia de Comunidades Aquáticas da Univali; VMC agradece o financiamento FAPESC TO 2024TR001778.

Referências Bibliográficas

CARTOLANO, Rafael Torres. Pagamento por serviços ambientais: uma metodologia para identificação de imóveis rurais com potencial para prestação de serviços ecossistêmicos. Lavras, MG, 2023.

CHEN, Hsin-Pei; LEE, Mengshan; CHIUEH, Pei-Te. Creating ecosystem services assessment models incorporating land use impacts based on soil quality. Science of the Total Environment, [s. l.], v. 773, 145018, 2021.

FU, Bojie et al. Ecosystem services in changing land use. Journal of Soils and Sediments, [s. l.], v. 15, p. 833-843, 2015.

GOLDMAN, Rebecca L.; TALLIS, Heather. A Critical Analysis of Ecosystem Services as a Tool in Conservation Projects: The Possible Perils, the Promises, and the Partnerships. Annals of the New York Academy of Sciences, [s. l.], v. 1162, p. 63-78, 2009.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Washington, DC: Island Press, 2003.

OLIVEIRA, M. L. Duarte de; BURLIGA, A. L.; BEAUMORD, A. C.; HOMECHIN JR., M. Composição das assembleias fitoplanctônicas das ordens Chlorococcales e Volvocales (Chlorophyceae), no trecho médio do rio Itajaí-Mirim, Santa Catarina. 2007.

ROEDEL, Tamily; WALLOTH, Victoria; CIONEK, Vivian de Mello; BRANCO, Joaquim Olinto. Caracterização socioambiental da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Mirim - SC. 2024. Trabalho acadêmico – Centro Universitário de Brusque (UNIFEB), Brusque, 2024.

SANCHEZ, Thyago Konflanz. Vulnerabilidade a processos erosivos na sub-bacia hidrográfica do rio Itajaí-Mirim (SC). Itajaí, 2024.

SONG, Wei; DENG, Xiangzheng. Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China. Science of the Total Environment, [s. l.], v. 576, p. 705-719, 2017.

STOYCHEVA, Vanya; GENELETTI, Davide. A review of regulating ecosystem services in the context of urban planning. Journal of the Bulgarian Geographical Society, [s. l.], v. 48, p. 27-42, 2023.

MAPEAMENTO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ESCOAMENTO (MÉTODO SCS-CN) EM GUARAPUAVA - PR

1 Caren Gabrielle Ribas de Oliveira, 2 Dimaghi Schwamback
1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: caren@alunos.utfpr.edu.br;
2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: dimaghis@professores.utfpr.edu.br

Palavras-chave: Geoprocessamento; Escoamento Superficial; SCS-CN; Curve Number.

Introdução

O desenvolvimento geográfico, a intensificação das atividades agropecuárias e o crescimento populacional impõem desafios significativos ao manejo das águas pluviais e à gestão de recursos hídricos globalmente. O processo de infiltração de água no solo sofre alterações drásticas devido à antropização, impactando diretamente o aumento do escoamento superficial. Essa mudança tem como consequência a aceleração do tempo de concentração das bacias hidrográficas, potencializando o risco de picos de cheia, processos erosivos e o transporte de poluentes para os corpos hídricos (TUCCI, 2005), o que compromete o planejamento urbano e a preservação ambiental.

Diante deste cenário, o estudo do comportamento das águas pluviais é fundamental para o desenvolvimento de infraestruturas dependentes da dinâmica do escoamento. Dentre os modelos hidrológicos mais difundidos, destaca-se o método Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN), que relaciona a precipitação efetiva com as características físicas da área, baseando-se na integração entre o uso e ocupação do solo e as propriedades pedológicas locais. As características físicas do solo definem o seu Grupo Hidrológico (GHS), que, ao ser associado ao tipo de cobertura vegetal e uso da terra, é sintetizado no parâmetro adimensional conhecido como Curve Number (CN). No Brasil, o método é amplamente aplicado devido à sua eficácia em bacias com escassez de dados fluviométricos monitorados (SARTORI; LOMBARDI NETO; GENOVEZ, 2005).

Para a aplicação do método SCS-CN de forma precisa, é indispensável o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), uma vez que o mapeamento espacialmente explícito permite identificar “hotspots” de geração de escoamento, superando as limitações das análises hidrológicas tradicionais (SANTOS; LOLLO, 2016). Nesse contexto, o emprego do software de código aberto QGIS possibilita o processamento de dados geoespaciais e a análise distribuída, fornecendo informações cruciais para a gestão pública.

O presente trabalho tem como objetivo mapear o potencial de geração de escoamento superficial no município de Guarapuava (PR), aplicando o método SCS-CN em ambiente SIG. Com isso, busca-se gerar dados espaciais que auxiliem na compreensão da dinâmica hidrológica local, servindo como base técnica para estratégias de manejo sustentável das águas pluviais e conservação do solo na região.

Área de Estudo

O município de Guarapuava localiza-se na região Centro-Sul do estado do Paraná, inserido na unidade geomorfológica do Terceiro Planalto Paranaense (ITCG, 2008). Possui extensão territorial de aproximadamente 3.168 km² e população estimada em 182.093 habitantes (IBGE, 2022). Economicamente, destaca-se pelo PIB per capita de R$ 47.348,70 (IBGE, 2021) e um Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) de 0,707, patamar considerado alto (PNUD, 2010). Com altitude média de 1.100 m, a área exige rigor cartográfico para análises hidrológicas, portanto, os dados espaciais foram projetados no sistema de referência SIRGAS 2000/UTM zone 22S (EPSG: 31982), assegurando a precisão métrica necessária aos cálculos de área e declividade.

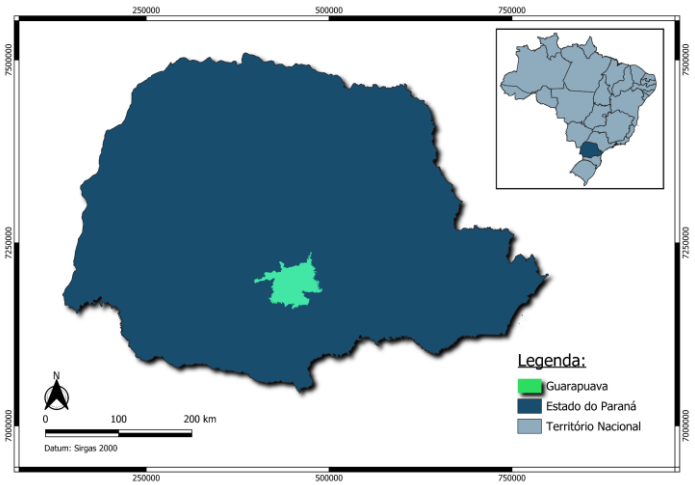


Figura 1: Localização da Área de Estudo.

A rede hidrográfica municipal é caracterizada por importantes cursos d'água, com destaque para o Rio Jordão e o Rio Cascavel, que drenam o perímetro urbano e são vitais para o abastecimento público e equilíbrio ecossistêmico regional. O clima local, conforme a classificação de Köppen, é o temperado úmido (Cfb), apresentando verões brandos, geadas frequentes no período invernal e ausência de estação seca definida (ALVARES et al., 2013). A precipitação média anual é elevada, oscilando entre 1.800 a 2.000 mm, e marcada por eventos extremos que, associados à topografia local, incrementam a suscetibilidade a enxurradas. Tais características justificam o monitoramento do escoamento superficial para fins de gestão de riscos urbanos.

A estrutura geológica regional é composta por rochas efusivas básicas da Formação Serra Geral (Grupo São Bento), com predominância de basaltos (MINEROPAR, 2001). Em função dessa matriz litológica e do relevo ondulado, a pedologia local exibe predominância de Latossolos Vermelhos e Brunos em setores de relevo suave, além de Cambissolos Háplicos em áreas de maior declividade (EMBRAPA, 2018). A profundidade e a textura desses solos são variáveis determinantes na classificação dos Grupos Hidrológicos de Solo (GHS), parâmetro essencial para a aplicação do método SCS-CN.

A ocupação do solo reflete a matriz econômica regional, pautada no agronegócio de grãos e na silvicultura, atividades que alteram significativamente a infiltração e a rugosidade superficial. Paralelamente, o processo de expansão urbana tem convertido zonas rurais em superfícies impermeabilizadas, reduzindo a capacidade de retenção hídrica natural do solo. Esses fatores são imprescindíveis para a atribuição do parâmetro *Curve Number (CN)*, influenciando diretamente o balanço hídrico e elevando o potencial de geração de escoamento superficial direto nas bacias hidrográficas locais.

Procedimentos Metodológicos

A metodologia deste trabalho fundamentou-se no emprego do software de código aberto QGIS, selecionado devido à sua eficiência no processamento de geoinformação e disponibilidade de algoritmos avançados para análise hidrológica espacial. O fluxo de trabalho foi estruturado em quatro etapas procedimentais: (i) aquisição e padronização de dados; (ii) classificação pedológica por grupos hidrológicos fundamentada nos critérios de Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005); (iii) processamento do uso e cobertura da terra e (iv) determinação do potencial de escoamento superficial.

Inicialmente, procedeu-se à delimitação da área de influência por meio da importação das malhas municipais digitais de Guarapuava (IBGE, 2022). Para a implementação do método SCS-CN, integraram-se os planos de informação referentes ao mapeamento pedológico e de uso e ocupação do solo (MAPBIOMAS, 2025), com resolução espacial de 30 metros, além do Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido junto ao projeto Brasil em Relevo (EMBRAPA, 2011), com resolução espacial de 30 metros. Visando a fidedignidade métrica e a compatibilidade espacial dos dados, todos os arquivos vetoriais e matriciais foram reprojetados para o sistema de referência SIRGAS 2000/UTM zone 22S (EPSG: 31982).

A espacialização do parâmetro *Curve Number (CN)* ocorreu mediante a operação de interseção vetorial (vector overlay) entre as camadas de uso do solo e GHS, resultando em um plano de informação composto por 243 feições poligonais distintas. Para cada combinação geométrica gerada, atribuíram-se valores de CN fundamentados em matriz paramétrica específica adaptada aos cenários de uso e cobertura da terra identificados na região. Tais índices refletem a interação entre a impermeabilidade da cobertura superficial e a permeabilidade do substrato pedológico.

Por fim, utilizou-se a Calculadora de Campo do QGIS para mensurar a área (A_i) de cada fragmento, totalizando uma superfície municipal de 3.164,70 km². Os dados da tabela de atributos foram processados para o cálculo do produto entre a área e o CN de cada polígono individual. O CN médio ($CN_{méd}$) representativo do município foi obtido por meio da média aritmética ponderada (Equação 1), garantindo que a heterogeneidade espacial do uso do solo fosse preservada no índice hidrológico final.

$$CN_{méd} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (CN \times A)}{\sum_{i=1}^{n} A} \quad (1)$$

Resultados e Discussões

A integração dos dados de uso do solo e grupos hidrológicos permitiu a determinação espacializada do parâmetro *Curve Number (CN)* para o município de Guarapuava. A variabilidade do escoamento superficial na região está intrinsecamente ligada à distribuição dos Latossolos Brunos e Vermelhos, os quais foram enquadrados no Grupo Hidrológico B, seguindo as adaptações para a classificação hidrológica de solos brasileiros propostas por Anjinho et al. (2018) devido à sua estrutura granular e profundidade, que favorecem a infiltração.

Entretanto, as áreas destinadas à agricultura mecanizada e a expansão do perímetro urbano promovem alterações significativas na rugosidade e na taxa de infiltração do solo. Os valores de *Curve Number* definidos para cada classe baseiam-se em estudos aplicados a bacias brasileiras. Adotaram-se os parâmetros de Soares et al. (2017) para as áreas urbanas e agrícolas, de Rezende, Ribeiro e Mendes (2018) para o solo exposto, e de Santos e Lollo (2016) para a cobertura vegetal. A Tabela 1 apresenta a síntese das classes mapeadas, evidenciando a correlação entre a tipologia de ocupação, a extensão territorial e o potencial de geração de escoamento. Este estudo determinou o índice representativo da resposta hidrológica municipal por meio do cálculo do ($CN_{méd}$), obtido pela média aritmética ponderada pelas áreas. O valor médio final é de 67,61 e sugere que o município possui, em sua totalidade, um potencial de escoamento superficial classificado como moderado.

É perceptível que, embora os remanescentes florestais (38,09% da área) exerçam um papel mitigador no ciclo hidrológico local, a predominância de áreas com alto grau de antropização como a soja e o mosaico agrícola, que juntos somam 42% do território eleva o CN médio municipal. Essa configuração reduz o tempo de concentração das bacias hidrográficas e aumenta os volumes de deflúvio direto.

Classe	Área (%)	CN Médio
Área Urbanizada	1,936%	89,20
Café	0,009%	74,21
Campo Alagado	2,190%	100,00
Corpo d'Água	0,321%	100,00
Formação Campestre	0,002%	87,35
Formação Florestal	38,09%	60,21
Mosaico de Agricultura e Pastagem	10,90%	75,05
Outras Áreas não Vegetadas	0,152%	84,07
Outras Lavouras Perenes	0,002%	74,51
Outras Lavouras Temporárias	0,877%	73,49
Pastagem	4,018%	72,28
Silvicultura	10,40%	59,82
Soja	31,10%	71,84
Total Geral	**100%**	**67,61**

Tabela 1: Síntese de áreas e parâmetros hidrológicos por classe de uso em Guarapuava (PR).

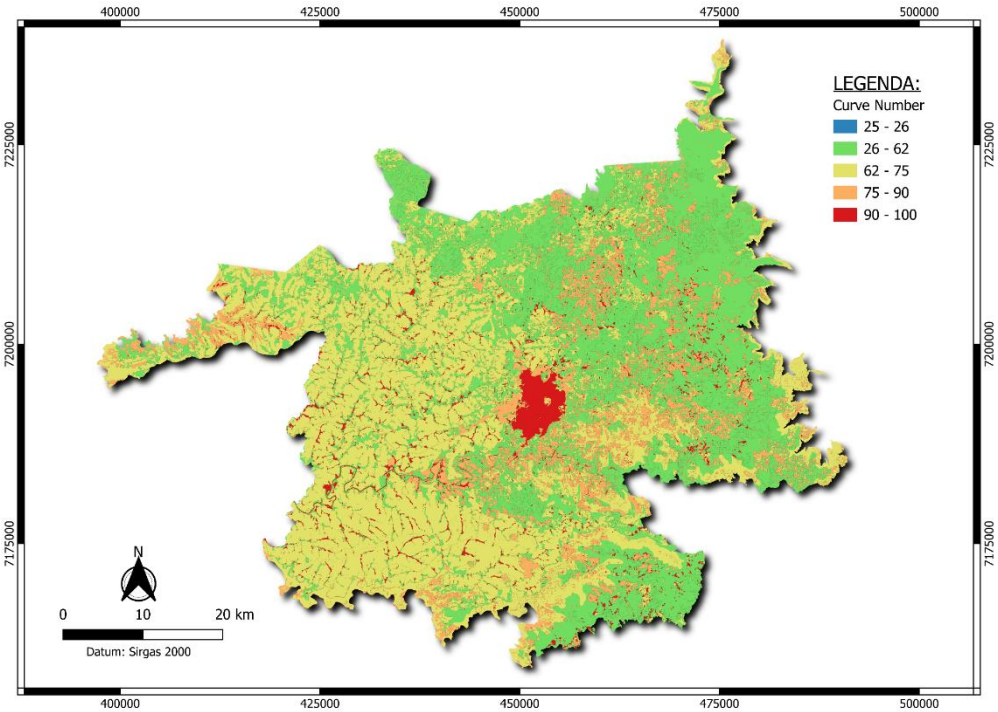


Figura 2: Mapa de Distribuição Espacial do Curve Number em Guarapuava - PR.

O mapeamento evidencia "hotspots" de escoamento em setores onde os Cambissolos (Grupo C) coincidem com áreas de solo exposto ou urbanização densa, onde o CN atinge valores próximos a 90. Tais zonas demandam atenção prioritária no planejamento da infraestrutura de drenagem e em estratégias de conservação de solo e água, visando mitigar riscos de enxurradas e processos erosivos em eventos de precipitação intensa.

Considerações Finais

A integração do método *SCS-CN* com ferramentas de geoprocessamento no software QGIS possibilitou a quantificação espacializada do potencial de escoamento superficial no município de Guarapuava (PR). A predominância de Latossolos Brunos (Grupo Hidrológico B), em convergência com as vastas áreas de agricultura mecanizada e a crescente expansão urbana, resultou em um valor de $(CN_{méd})$ de 67,61. Este índice caracteriza o município com uma resposta hidrológica de magnitude moderada, evidenciando que a precisão da modelagem foi assegurada pela padronização cartográfica no sistema SIRGAS 2000/UTM zone 22S (EPSG: 31982), etapa indispensável para o cálculo fidedigno da superfície total de 3.164,70 km² e para a correta representação da dinâmica hídrica local.

Os resultados obtidos estabelecem um diagnóstico fundamental para a região Centro-Sul do Paraná, fornecendo uma base de dados geográficos capaz de identificar setores de vulnerabilidade hidrológica que demandam intervenções preventivas. A partir do parâmetro *Curve Number*, estabelecido por meio do cruzamento rigoroso entre a pedologia e a cobertura do solo,

torna-se viável a elaboração de estratégias de manejo de microbacias hidrográficas em escala local, otimizando o ordenamento do uso do solo. Finalmente, o mapeamento gerado provê subsídios robustos para a gestão de riscos e para o planejamento de longo prazo nos sistemas de drenagem dos rios Cascavel e Jordão, servindo como um instrumento de suporte à decisão voltado ao fortalecimento da resiliência hídrica e à conservação dos solos no Terceiro Planalto Paranaense.

Referências Bibliográficas

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

ANJINHO, P. da S. et al. Espacialização do parâmetro curve number (CN) na bacia hidrográfica do Ribeirão do Lobo para o período de 1985 e 2017. In: SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL, 16., 2018, São Carlos. **Anais** [...]. São Carlos: USP/EESC, 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Projeto Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2011. Disponível em: http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br. Acesso em: 03 dez. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produto Interno Bruto dos Municípios**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: https://www.ibge.gov.br. Acesso em: 29 mar. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades e Estados: Guarapuava**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pr/guarapuava.html. Acesso em: 03 dez. 2025.

INSTITUTO DE TERRAS, CARTOGRAFIA E GEODÉSIA DO PARANÁ (ITCG). **Geomorfologia do Estado do Paraná**. Curitiba: ITCG, 2008.

MINERAIS DO PARANÁ (MINEROPAR). **Atlas Geológico do Estado do Paraná**. Curitiba: Mineropar, 2001.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD). **Ranking IDHM Municípios 2010**. Brasília, DF: PNUD, 2010.

PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção 10 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil (1985-2024)**. 2025. Disponível em: https://mapbiomas.org. Acesso em: 02 mar. 2026.

REZENDE, V. S.; RIBEIRO, V. O.; MENDES, Y. S. Determinação dos valores de número de deflúvio (CN) para o perímetro urbano de Dourados-MS. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 7., 2018, Jardim. **Anais** [...]. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária; São José dos Campos: INPE, 2018. p. 230-239. Disponível em: https://www.geopantanal.cnptia.embrapa.br/2018/Anais-Geopantanal/pdfs/p37.pdf. Acesso em: 02 mar. 2026.

SANTOS, F. M. dos; LOLLO, J. A. de. Cartografia digital para estimativa de escoamento superficial visando ao planejamento urbano. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 663-675, out./dez. 2016. DOI: https://doi.org/10.1590/S1413-41522016130053.

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 Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 5-18, out./dez. 2005. DOI: http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v10n4.p5-18.

SOARES, M. R. G. de J. et al. Eficiência do método curve number de retenção de águas pluviais. **Mercator**, Fortaleza, v. 16, e16001, 2017. DOI: https://doi.org/10.4215/rm2017.e16001.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE EROSÃO E DEPOSIÇÃO DE AREIA NO RIO COM O USO DO NDWI

1 Débora Brasiliense Ferreira, 2 Alencar Cabral, 3 Vivian de Mello Cionek
1 Univali, e-mail: deborabrasiliense@gmail.com; 2 Univali, e-mail: alencar@univali.br;
3 Univali, e-mail: vivian.cionek@univali.br

Palavras-chave: mineração de areia; geoprocessamento; Rio Tijucas

Introdução

Os rios destacam-se como importantes fornecedores de areia e cascalho, em razão da proximidade com centros urbanos, dos baixos custos de transporte e da geração natural de minerais angulares, adequados ao setor da construção civil (Hemmler, Camara e Buerkert, 2025; Barman, Kumar e Sarma, 2019; Silva et al 2020). A remoção de grandes volumes de areia do fundo de rios acarreta distúrbios que aumentam a interação do sedimento com o fluxo de água e causam mudanças na morfologia dos rios (Barma, Kumar e Sarna., 2019). Como consequência, há perda de substrato e aumento da erosão fluvial e costeira, redução do nível de lençóis freáticos e redução da disponibilidade de substrato (Pearce, 2019; WWF, 2018). A remoção inadequada desses sedimentos pode gerar desequilíbrios ecológicos e prejuízos econômicos para comunidades que dependem diretamente dos recursos hídricos.

A atividade de mineração de areia em leito de rio é reconhecidamente impactante aos recursos hídricos, induzindo efeitos geomorfológicos como o corte e instabilidade lateral do canal, a criação de irregularidades no leito do rio, o rebaixamento do lençol freático e impacto sob a mata ciliar (Marini, 2017). A demanda por recursos de alta qualidade, é crescente em toda a cadeia produtiva e faz com que os países do mundo todo enfrentem múltiplos desafios (Ma *et al*, 2022) já que as atividades de mineração de areia frequentemente têm impactos negativos profundos no ambiente ecológico dos rios.

O Brasil é um dos países mais ricos em recursos naturais do planeta, e a mineração pode ser considerada uma atividade de alto valor econômico (Vieira, Rezende, 2015). Quase todos os Estados brasileiros são produtores de areia, e dois terços dessa atividade é realizada em leito de rio (DNPM, 2006), junto às matas ciliares. O Estado de Santa Catarina é o terceiro maior produtor de areia mineral para construção civil do país (CETESB, 2024). A Bacia Hidrográfica do Rio Tijucas, situada na região Centro Leste de Santa Catarina, é responsável pela concentração da maior produção dentre as áreas de extração de areia no Estado, constituindo a Área I de interesse mineral da região metropolitana de Florianópolis, com destaque para os municípios de Tijucas e São João Batista, com alto potencial para extração de areia por meio dos depósitos sedimentares de planícies aluviais e leitos fluviais (Zwirtes; Hammes, 2016). Essas áreas possuem alto potencial para extração de areia por meio dos depósitos sedimentares de planícies aluviais e leitos fluviais (Zwirtes; Hammes, 2016).

Materias e Métodos

A Bacia Hidrográfica do Rio Tijucas está localizada na porção leste do Estado de Santa Catarina, região Sul do Brasil, e possui exultório no Oceano Atlântico. O principal corpo hídrico superficial é o rio Tijucas.

A fim de avaliar a variação das massas de água no terreno, utilizou-se o Índice de Diferença Normalizada de Água (NDWI) (Laonamsai et al (2023) e Singh et al (2023)). O NDWI é uma técnica utilizada na análise de imagens de satélite para distinguir características de águas abertas, utilizando as bandas espectrais do infravermelho próximo (NIR) e do verde visível (GREEN). As superfícies de água têm alta absorção na faixa do infravermelho próximo (NIR) e alta refletância na faixa do verde (GREEN) e o NDWI capitaliza essa diferença usando as bandas espectrais verde e infravermelho próximo. Para corpos d'água, a refletância no verde é maior do que no NIR, resultando em valores de NDWI positivos e, geralmente, maiores que 0,5, o que os faz "sobressair" em relação à vegetação e ao solo. Por outro lado, a vegetação e o solo refletem mais fortemente no NIR do que no verde, resultando em valores de NDWI menores (frequentemente negativos ou próximos de zero), permitindo uma clara diferenciação.

Os rios do Braço e Tijucas são conhecidos pela extração de areia em leito de rio com o uso de dragas. Para esse estudo foram selecionados nove trechos onde existe mineração licenciada, e delimitados dois trechos de 1 km a montante e a jusante desses locais de mineração, a fim de avaliar potenciais variações de ocorrência de massas de água em locais com e sem mineração, pontos podem ser observado na Figura 1.

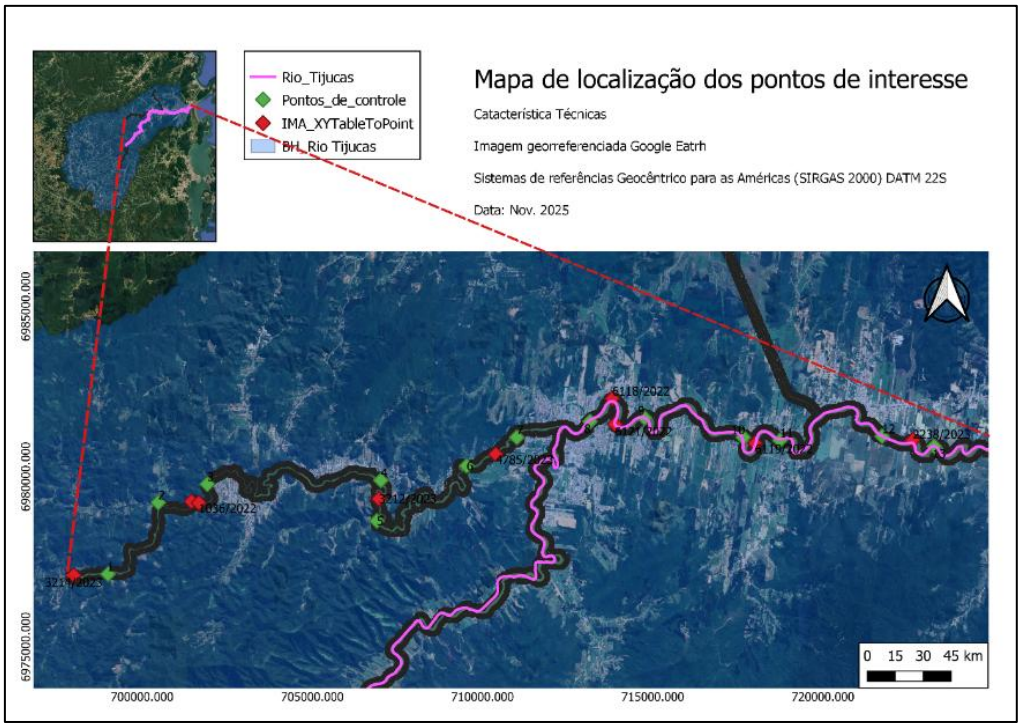


Figura 1 - Localização dos pontos com e sem mineração ao longo do Rio do Braço e do Rio Tijucas
Fonte: Ferreira et al (2026)

Para avaliar a transformação do Rio Tijucas e Rio do Braço, foi utilizada a variação de largura do leito ao longo do tempo como variável resposta. A definição dos trechos em que a largura dos rios foi medida, considera a ocorrência de empresas de mineração atualmente. A dinâmica espacial do Rio Tijucas e afluentes foi avaliada a partir de imagens multiespectrais obtidas por sensoriamento remoto. Sendo utilizadas as bandas 3, 4 e 5 do Sensor TM do satélite Landsat 5 (1984 – 2011) e as bandas 4, 5 e 6 do sensor OLI do satélite Landsat 8 (2013 – ativo). As imagens do Landsat possuem resolução espacial de 30 metros, ou seja, os pixels do raster são de 30 metros. As imagens foram obtidas no banco de imagens disponíveis no Google Engine.

Foram realizadas medidas a partir de 1992, como representativo do início da primeira atividade ambientalmente licenciada de mineração no leito do rio. Foram realizadas medidas de 10 em 10 anos para acompanhar a variação temporal da largura. Para determinar a imagens, sendo observada a porcentagem de nuvens menor que 5% e preferencialmente imagens de um mesmo mês. As análises temporais foram feitas por décadas, iniciando no ano de 1994. As imagens passaram por uma etapa de classificação para determinar a massa d'água do rio. O processamento foi trabalhado no QGis pro e a massa d'água foi vetorizada, gerando um polígono, tendo a sua variação quantificada em porcentagem.

A fim de avaliar se a cobertura de massas d'água na bacia hidrográfica varia ao longo das décadas e se a mineração influencia essa cobertura, corremos um modelo linear misto (utilizando a função lmer), assumindo como variável resposta os valores de NDWI, e como preditores o ano (1994, 2003, 2014, 2024) e se o trecho tem atividade de mineração licenciada ou não. Os transectos foram introduzidos como fator aleatório. A validação do modelo foi realizada utilizando a função simulateResiduals do pacote Dharma, no R Studio.

Além disso, foram realizadas avaliações estatísticas da vazão do rio utilizando dados disponíveis no Hidroweb da ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). A variação da vazão nos três dias anteriores à coleta das imagens para quantificação do NDWI foi analisada por meio de um teste t para uma amostra, considerando-se a vazão média do rio como 50 m^3/s (Loitzenbauer e Mendes, 2016). A ausência de diferenças significativas sugere que as possíveis variações na superfície coberta por água entre os anos analisados não podem ser atribuídas a eventos de pluviosidade recente.

Resultados

A variação temporal da superfície coberta por água, avaliada por meio do Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI) ao longo dos anos de 1994, 2003, 2014 e 2024, foi realizada comparando áreas com e sem mineração de areia no leito fluvial, com indicação de médias e intervalos de variação, variações significativas dos valores de NDWI entre trechos com e sem mineração foram identificadas com letras diferentes. Não houve diferença significativa entre trechos com e sem mineração para nenhuma das décadas. A designação das letras reflete o resultado estatístico da diferença entre décadas. De forma geral, observa-se que os valores de NDWI são negativos em todos os períodos, indicando baixa presença relativa de água superficial ou maior influência de superfícies expostas, como sedimentos e solos descobertos, o que é compatível com ambientes fluviais sujeitos a intervenções antrópicas (Figura 2).

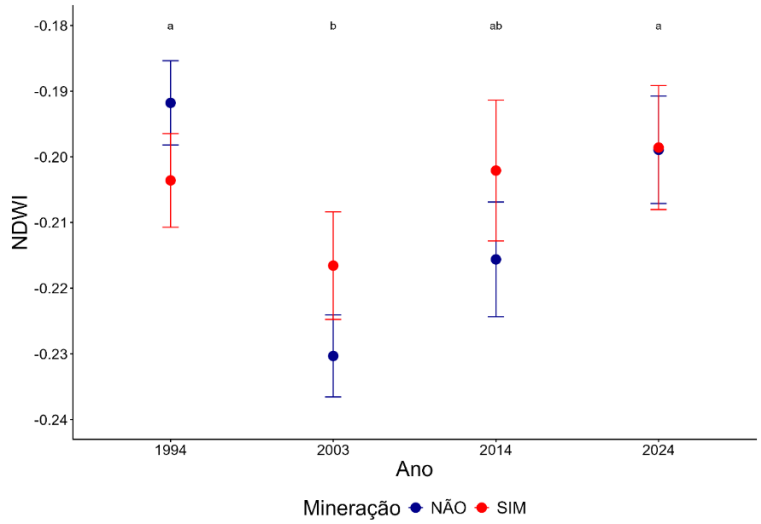


Figura 2 - Variação do NDWI médio ± Erro Padrão entre as décadas, e entre trechos com e sem mineração. Não houve diferença significativa entre trechos com e sem mineração para nenhuma das décadas. A designação das letras reflete o resultado estatístico da diferença entre décadas.
Fonte: Ferreira et al (2026)

Ainda, ao analisar os dados de vazão das quatro imagens, nos últimos três dias que antecedem a imagem, a vazão do Rio Tijucas não variou significativamente em relação à média de vazão (50m³/s), nos anos de 1994 (t = -1,196; gl = 2; p = 0,354), 2014 (t = -34,782; gl = 2; p = < 0,001) e 2024 (t = -2,511; gl = 2; p = 0,129). Em 2003 a vazão dos três dias que antecederam a coleta das imagens foi significativamente menor do que a média de vazão do rio (t = 0,272; gl = 2; p = 0,811). Isso implica em dizer que a vazão em 2003 diferente da média, pode indicar que outros fatores (como precipitação ou outras variáveis) influenciaram a variação da vazão nesse ano.

Com análise estatística (ANOVA) responde-se à pergunta se "Existe diferença significativa das massas d´água ao longo do tempo e em trechos com e sem mineração?", com resultado apresentado no Quadro 1. O quadro apresenta os resultados de uma análise de variância (ANOVA) aplicada aos valores de NDWI, considerando como fatores o ano e a presença de mineração, permitindo interpretar estatisticamente os padrões observados no gráfico anteriormente apresentado.

	SQ	QM	GL	DenGl	F	P value
Ano	0,20	0,06	3	1634,39	5,09	0,00
Mineração	0,00	0,00	1	20,16	0,01	0,90

Quadro 1 - Análise de variância da diferença de massa d'água ao longo do tempo em trechos com e sem mineração
Fonte: Ferreira et al (2026)

Esse resultado sugere que, embora o gráfico indique valores de NDWI sistematicamente mais negativos em áreas mineradas, essa diferença não é suficiente, do ponto de vista estatístico, para explicar a variabilidade total do índice.

Discussão

A maior superfície coberta por água nos anos de 1994, 2014 e 2024, em relação à 2003, pode ser reflexo das grandes cheias registradas na região. O valor elevado de índice da superfície coberta por água em 1994 coincide com uma década marcada pela forte influência do fenômeno *El Niño* Oscilação Sul. Este fenômeno é historicamente responsável por potencializar os acumulados de chuva no Sul do Brasil, resultando em cheias recorrentes que mantêm o canal do Rio Tijucas mais largo e as margens saturadas. Em contrapartida, 2003 apresentou o ponto mais baixo da série e reflete um período de menor umidade. Registros indicam que anos de *La Niña* ou neutralidade em Santa Catarina, como os registrados em 2003, costumam apresentar déficits de precipitação, resultando num rio com calha mais rasa e maior exposição de bancos de areias secos. A análise da vazão do Rio Tijucas nos anos de 1994, 2014 e 2024 não revelou diferenças significativas em relação à vazão média histórica de 50 m³/s. No entanto, em 2003, observou-se uma vazão consideravelmente reduzida, inclusive na média mensal, o que sugere um regime atípico de precipitação para a região. Esse comportamento atípico da vazão pode ter influenciado na aparência das margens do rio, sendo possivelmente relacionado a condições pluviométricas incomuns naquele ano. A variação do índice de NDWI em 2003 precisa ser feito com cautela, pois o regime de chuva está implicando na quantidade de água no rio.

A ausência de variação de largura ou de superfície coberta por água ao longo do tempo, entre áreas com e sem mineração pode ser explicada por (i) baixo impacto relativo da mineração sobre os processos de erosão de deposição no leito do rio, se mantendo abaixo da capacidade de suporte do sistema (Brasil, comunicação pessoal); (ii) a ausência de variação também pode decorrer do fato de que historicamente há registro de aumento da área de mata ciliar na bacia hidrográfica do Rio Tijucas (Santos, 2009), que reflete diretamente nos processos de retenção de sedimentos e proteção de margens ao longo da bacia; (iii) ainda, o

reconhecimento ao trabalho que vem sendo desempenhado pelo Comitê Tijucas e Biguaçu, que garante a fiscalização das atividades ambientalmente licenciáveis (Brasil, comunicação pessoal).

Uma limitação importante deste estudo está relacionada à resolução espacial das imagens utilizadas (pixel de 30 x 30 m), a qual pode não ser suficiente para representar com precisão a dinâmica dos rios estudados. A baixa resolução espacial implica que cada pixel englobe uma área extensa, o que pode resultar na mistura de diferentes classes de uso do solo, como corpos d'água, vegetação e áreas impactadas pela mineração. Como resultado, a resolução da imagem pode subdimensionar os impactos ambientais locais, dificultando a observação de modificações mais específicas no ambiente aquático e nos processos geomorfológicos do rio. Portanto, é imprescindível considerar a limitação imposta pela resolução espacial das imagens, sugerindo que estudos futuros possam se beneficiar de dados com maior definição espacial para uma avaliação mais precisa e detalhada dos impactos da mineração no leito do rio.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Fundação “FAPESC”, a Universidade “UNIVALI” pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

BARMAN, B.; KUMAR, B.; SARMA, A. K. Impact of sand mining on alluvial channel flow characteristics. Ecological Engineering, v. 135, p. 36-44, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857419301727?via%3Dihub

CETESB. Câmara Ambiental do Setor de Mineração. 2024. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/camaras-ambientais/camaras-ambientais-em-atividade/camara-ambiental-do-setor-de-mineracao/

DNPM. Sumário mineral. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 2006. Disponível em: http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serieestatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2006

HEMMLER, K. S.; CAMARA, B.; BUERKERT, A. Social ecology of artisanal sand mining in the Niger River around Bamako, Mali. PLoS ONE, v. 20, n. 1, p. e0318029, 2025. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318029

LAONAMSAI, J.; JULPHUNTHONG, P.; SAPRATHET, T.; KIMMANY, B.; GANCHANASURAGIT, T.; CHOMCHEAWCHAN, P.; TOMUN, N. Utilizing NDWI, MNDWI, SAVI, WRI, and AWEI for estimating erosion and deposition in Ping River in Thailand. Hydrology, v. 10, n. 3, p. 70, [2023]. DOI: https://doi.org/10.3390/hydrology10030070

MA, Y.; CHAI, Y.; XU, Y. J.; LI, Z.; ZHENG, S. Spatial and temporal changes of sand mining in the Yangtze River Basin since the establishment of the Three Gorges Dam. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 19, n. 24, p. 16712, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph192416712

MARINI, M. Controle geológico e caracterização legal e ambiental da atividade de mineração de areia na Bacia do Rio da Madre (SC). Florianópolis: UFSC, 2017.

PEARCE, F. The hidden environmental toll of mining the world's sand. Yale Environment 360, 2019. Disponível em: https://e360.yale.edu/features/the-hidden-environmental-toll-of-mining-the-worlds-sand

SILVA, E. F.; BENTO, D. F.; MENDES, A. C. et al. Environmental impacts of sand mining in the city of Santarém, Amazon region, Northern Brazil. Environment, Development and Sustainability, v. 22, p. 47-60, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s10668-018-0183-2

SINGH, S.; MERAJ, G.; KUMAR, P.; SINGH, S. K.; KANGA, S.; JOHNSON, B. A.; PRAJAPAT, D.; DEBNATH, J.; SAHARIAH, D. Decoding Chambal River shoreline transformations: a comprehensive analysis using remote sensing, GIS, and DSAS. Water, v. 15, n. 9, p. 1793, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/w15091793

VIEIRA, E. G.; REZENDE, E. N. Mineração de areia e meio ambiente: é possível harmonizar? Revista do Direito Público, Londrina, v. 10, n. 3, p. 181-212, 2015. DOI: <10.5433/1980-511X.2015v10n3p181>.

WWF. Uncovering sand mining’s impacts on the world’s rivers. 2018. Disponível em: https://wwf.panda.org/our_work/water/freshwater_news/?333451/Uncovering-sand-minings-impacts-on-the-worlds-rivers

ZWIRTES, S.; HAMMES, D. F. Projeto de materiais de construção civil da região da Grande Florianópolis. Porto Alegre: CPRM, 2016.

PERSPECTIVAS DO USO DE IMAGENS HIPERESPECTRAIS NA DETECÇÃO DE METAIS PESADOS NO MEIO AMBIENTE BRASILEIRO

João Vitor Loch Martins, Douglas Fabiã 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; Metais Pesados

Introdução

A poluição por metais pesados é um problema ambiental de escala global, afetando cerca de 14% dos solos agrícolas. Esses elementos são definidos como metais e metaloides apresentam elevada toxicidade, persistência e capacidade de bioacumulação (LOVYNSKA et al., 2024). Devido à sua baixa degradabilidade, tendem a se acumular no solo ao longo do tempo, comprometendo suas funções, reduzindo a qualidade das culturas agrícolas e representando riscos à saúde humana por meio da cadeia alimentar (MAI et al., 2025). Os metais pesados têm suas concentrações significativamente elevadas por atividades antrópicas, como mineração, metalurgia, descarte inadequado de resíduos industriais e eletrônicos, práticas agrícolas intensivas e fontes urbanas (esgoto, efluentes e escoamento superficial) (LOVYNSKA et al., 2024; PYO et al., 2020). Esses elementos infiltram-se e acumulam-se no solo ao longo do tempo e podem se dispersar pelo ar, água e pelas cadeias biológicas, alcançando o organismo humano e causando efeitos tóxicos (WANG et al., 2024).

No Brasil, a contaminação por metais pesados tem sido amplamente evidenciada por eventos de grande impacto ambiental, como o rompimento da barragem em Brumadinho-MG, que resultou na dispersão desses contaminantes no solo e em corpos hídricos, ocasionando danos significativos à saúde humana e aos ecossistemas locais. De forma semelhante, a mineração de carvão na região Sul do país tem contribuído para a degradação ambiental, afetando a qualidade do solo e dos rios utilizados para abastecimento público em Santa Catarina. Ademais, o descarte inadequado de esgoto e resíduos urbanos intensifica esse cenário, promovendo a poluição de corpos hídricos, como observado na Baía de Ilha Grande, no Rio de Janeiro. Diante desse contexto, medidas de mitigação vêm sendo implementadas, destacando-se investimentos institucionais, como os realizados pela FAPESC, que ultrapassam R$ 1 milhão em projetos voltados à melhoria da gestão ambiental do carvão em Santa Catarina (FAPESC, 2025).

No que se refere ao monitoramento da contaminação por metais pesados no solo, a abordagem tradicional baseia-se na coleta de amostras e em análises laboratoriais, como Espectrometria de Absorção Atômica (AAS), Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS) e cromatografia (LOVYNSKA et al., 2024; PYO et al., 2020). Apesar da elevada precisão, esses métodos apresentam limitações importantes, incluindo alto custo, tempo de análise elevado, baixa cobertura espacial e uso de reagentes químicos agressivos, o que res-tringe sua aplicação em larga escala (LOVYNSKA et al., 2024; PYO et al., 2020; LIU et al., 2019). Nesse contexto, o avanço das plataformas de sensoriamento remoto (SR) e das tecnologias de sensores tem impulsionado o uso do sensoriamento proximal e do imageamento hiperespectral (HRS) como alternativas eficientes e não invasivas.

A tecnologia hiperespectral destaca-se por sua alta resolução espectral e capacidade de aquisição rápida de informações detalhadas, permitindo o monitoramento e mapeamento da poluição por metais pesados em grandes áreas, superando as limitações dos métodos convencionais (SUN et al., 2022, SU et al., 2025). Nesse contexto, o sensoriamento remoto emerge como uma abordagem promissora para o monitoramento ambiental em larga escala. Entretanto, a elevada dimensionalidade desses dados impõe desafios computacionais relevantes, conhecidos como maldição da dimensionalidade ou fenômeno de Hughes, caracterizados por redundância de informações e por ruídos decorrentes de interferências atmosféricas e de limitações de calibração dos sensores (VIEL et al., 2023; RAM et al., 2024). Para contornar essas limitações, técnicas de redução de dimensionalidade combinadas com métodos de Machine Learning (ML) e Deep Learning (DL), como Redes Neurais Convolucionais (CNNs) e Autoencoders, têm sido amplamente empregadas na extração de padrões relevantes e na construção de modelos preditivos de regressão e de classificação para a quantificação e o mapeamento de metais pesados no solo (PYO et al., 2020; RAM et al., 2024; LOVYNSKA et al., 2024).

Embora essas abordagens já tenham promovido avanços significativos em áreas como agricultura de precisão e monitoramento hídrico (GERARDO; DE LIMA; DE LIMA, 2025, GARCIA et al., 2025), a detecção de metais pesados ainda representa um desafio, sobretudo pela ausência de assinaturas espectrais diretas para elementos como As, Cd, Cr, Cu e Pb (PYO et al., 2020, WANG et al., 2021). Nesse contexto, estratégias mais robustas têm sido propostas, incluindo o uso de Deep Neural Networks (DNNs) com técnicas de aumento de dados, integração de dados espectrais de campo com imagens hiperespectrais por meio de Support Vector Machines (SVM), e a fusão com variáveis auxiliares, como modelos digitais de elevação, visando aumentar a acurácia das estimativas em ambientes complexos WANG et al., 2021, WANG et al., 2023, YANG et al., 2021). No Brasil, aplicações recentes já demonstram o potencial dessas abordagens, como o uso integrado de imagens Sentinel-2 e CBERS-4A, com algoritmos avançados de segmentação e classificação (GARCIA et al., 2025).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sistemática sobre o uso do sensoriamento remoto e de imagens hiperespectrais, associados a técnicas de inteligência artificial, na detecção e no monitoramento de metais pesados no solo, analisando os principais avanços, desafios e lacunas existentes na literatura.

Material e Métodos

Esta pesquisa consiste em uma revisão estruturada da literatura, de natureza qualitativa e exploratória, com foco na análise do uso de imagens e de dados hiperespectrais no monitoramento de metais pesados. As buscas foram realizadas nas bases de dados Google Scholar, IEEE Xplore e ScienceDirect, utilizando descritores em inglês (e.g., *hyperspectral imaging, heavy metal soil contamination, vegetation stress, proximal sensing, machine learning, deep learning*), com ênfase em estudos publicados a partir de 2018. Foram incluídos artigos, revisões e relatórios técnicos que utilizam sensoriamento remoto ou proximal hiperespectral para detecção de metais tóxicos (As, Cd, Cu, Pb, Zn, Cr), com metodologias claras de pré-processamento e modelagem, contemplando detecção direta no solo ou indireta via vegetação. Foram excluídos estudos genéricos, sem foco em metais pesados nem em uma base de comparação. A seleção foi qualitativa, orientada pela relevância temática, e os estudos foram organizados por meio de uma taxonomia multidimensional em quatro eixos principais, conforme apresentado na Figura 1.

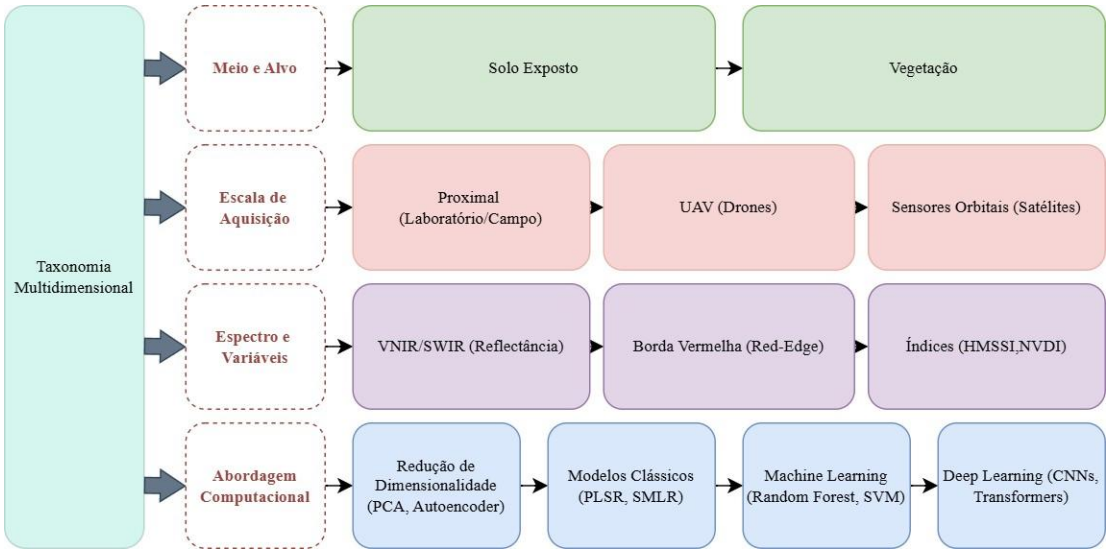


Figura 1: Fluxograma da taxonomia multidimensional adotada para classificação dos estudos.

Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta a síntese dos artigos selecionados, categorizados conforme a taxonomia proposta. A partir da análise desses estudos, observa-se que a evolução do monitoramento de metais pesados no ambiente se dá pela transição de métodos destrutivos de laboratório para o uso de imagens de sensoriamento remoto hiperespectrais em larga escala, impulsionada por avanços no monitoramento de vegetação e na modelagem computacional. Na análise de vegetação, a exploração da região da "Borda Vermelha"(Red-edge) e o desenvolvimento de índices específicos, como o HMSSI, permitiram detectar o estresse fisiológico induzido pela toxicidade com muito mais precisão do que índices tradicionais, como o NDVI (ZHANG et al., 2018), enquanto a fusão de imagens de satélite passou a viabilizar o rastreamento das alterações dos ciclos biológicos ao longo da safra (LIU et al., 2018).

Computacionalmente, a superação da "maldição da dimensionalidade"foi alcançada por meio de técnicas de DL, com destaque para as Redes Neurais Convolucionais (CNNs) integradas a Autoencoders (PYO et al., 2020) e modelos combinados (Ensembles) de ML, capazes de filtrar ruídos e extrair padrões espectrais de alta precisão (LIU et al., 2018). Apesar disso, a aplicação prática desses métodos ainda enfrenta alguns obstáculos, já que metais pesados geralmente não apresentam respostas espectrais diretas nas faixas visível e infravermelha, o que faz com que os algoritmos dependam de covariações empíricas com a matéria orgânica (LOVYNSKA et al., 2024). Além disso, a forte atenuação causada pela umidade do solo exige o desenvolvimento de calibrações complexas para transferir os modelos preditivos elaborados a partir de amostras secas em laboratório para os mapeamentos de campo via satélite ou *drone* (LIU et al., 2019).

No Brasil, a aplicação dessas tecnologias apresenta grande potencial estratégico diante de desastres e de ações humanas no meio ambiente. Em áreas afetadas por rompimentos de barragens de rejeitos, como em Brumadinho-MG, a abordagem de Pyo et al (PYO et al., 2020), que utilizou autoencoders para estimar As, Cu e Ob em bacias hidrográficas, aliada ao método de transferência espacial via DNN de Wang et al. (WANG et al., 2023), ofereceria um mapeamento rápido e não destrutivo do rastro de contaminação. Na agricultura de larga escala, muito presente no Sul e Centro-Oeste, a contaminação residual por Cádmio e Chumbo via fertilizantes poderia ser precocemente identificada pelo índice HMSSI e pela fusão de dados de satélite (ZHANG et al., 2018, LIU et al., 2018), repli-cando o monitoramento já estudado na orizicultura catarinense sem a necessidade de amostragens massivas de solo (GARCIA et al., 2025). Por fim, em centros urbanos, o uso do satélite Sentinel-2 para prever

acúmulos de metais em solos irrigados por efluentes, associado à fitorremediação por macrófitas (e.g., *Phragmites australis*) em estuários, consolida o sensoriamento remoto como uma ferramenta vital para a segurança hídrica e gestão de bacias altamente urbanizadas (MIRZAEI et al., 2021, EL-ALFY et al., 2019, GERARDO; DE LIMA; DE LIMA, 2025).

Referência	Meio de Detecção e Elemento Alvo	Região Espectral e Variáveis Observáveis	Arquitetura Sensorial e Escala de Aquisição	Abordagem Computacional e Modelagem	Resultados e Comentários
WANG et al., 2021)	Solo (Cr). Campo de carvão/área de mineração.	VNIR-SWIR (401–2400 nm). Derivadas de 2ª ordem e aumento de dados (DA).	Proximal (Laboratório/espectrômetro).	DNN, SVM e KNN combinados com Data Enhancement.	O modelo profundo DA-DNN atingiu a maior precisão (96,25%), superando as abordagens clássicas e mitigando a falta de amostras.
(WANG et al., 2023)	Solo (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn). Área de nova urbanização (Xiong'an).	Espectros contínuos de campo associados a bandas de imagens aéreas.	Híbrida (Espectrômetro de solo SVC + Sensor hiperespectral aerotransportado).	SVM (predição de amostras locais) + DNN e função Softmax para nível de poluição espacial.	O modelo integrado converteu dados pontuais em mapas regionais contínuos, mostrando a eficácia da transferência espacial via redes neurais profundas.
(PYO et al., 2020)	Solo (As, Cu, Pb). Bacia hidrográfica/rejeitos de Mineração (Rio Geum).	VNIR. Atributos ópticos latentes de metais-traço.	Proximal (Espectrômetro/laboratório).	CACNN (CNN com Autoencoder), PCA.	O uso do Autoencoder reduziu drasticamente a complexidade dos dados (maldição da dimensionalidade), permitindo à CNN estimar os três metais simultaneamente com alta precisão.
(LIU et al., 2019)	Solo (As, Cd, Hg). Solos secos vs. úmidos.	VNIR. Razão DSSR/MSSR (Refletância de Solo Seco/Úmido).	Proximal e Regional (AvaField portátil + Satélite HJ-1A HSI).	Algoritmo Boruta, Regressão Stepwise, Análise VIF (Variance Inflation Factor).	Inovou ao criar uma relação matemática para atenuar o efeito da umidade do solo, permitindo mapear o Cádmio regionalmente com precisão satisfatória (RRMSE 17%).
(MIRZAEI et al., 2021)	Solo irrigado com esgoto (Pb, Cu, Ni). Área agrícola urbana.	Visível e Infravermelho.	Regional (Satélite multiespectral Sentinel-2).	Regressão Stepwise, análise RMSE e Correlação de Pearson.	Provou que imagens multiespectrais gratuitas (Sentinel-2) podem mapear concentrações de metais com precisão viável (R = 0,73 a 0,81), barateando o monitoramento de áreas irrigadas com efluentes
(ZHANG et al., 2018)	Vegetação / Arroz (Cd, Hg, Pb). Detecção de estresse.	Borda Vermelha (Red-edge). Índice HMSSI (CIred-edge / PSRI).	Regional (Série temporal de imagens Sentinel-2).	Classificador Random Forest (RF) aplicado a séries temporais.	O novo índice HMSSI superou os índices clássicos de clorofila. A modelagem multitemporal (avaliando todo o ciclo de crescimento) foi superior à análise de um único dia
(LIU et al., 2018)	Vegetação / Arroz (Cd). Detecção de estresse via fenologia.	Índices VIs (NDVI, EVI, NDWI). Métricas fenológicas (perfilhamento, floração).	Regional (Satélites MODIS + Landsat fundidos via algoritmo ESTARFM).	Feature selection (RF-RFECV), Ensemble model (RF + Gradient Boosting), Filtro Whittaker.	Conseguiu classificar os níveis de estresse do arroz com mais de 98% de precisão, combinando informações de umidade, verdor e os atrasos nos ciclos de crescimento da planta
(EL-ALFY et al., 2019)	Água, Sedimento e Vegetação (Phragmites australis) contaminados por metais e pesticidas.	Cobertura do solo (vegetação densa vs. áreas urbanas e canais).	Regional (Satélites Landsat OLI e WorldView-2).	Classificador de Máxima Verossimilhança (MLC), Fator de Bioacumulação (BAF) e SIG.	Demonstrou o potencial da planta invasora Phragmites australis em bioacumular níveis críticos de Níquel e Cobalto, atuando como um filtro/fitorremediador em zonas de estuário poluídas

Tabela 1: Síntese das aplicações de sensoriamento remoto na detecção e monitoramento de metais pesados

Considerações Finais

A integração do sensoriamento remoto hiperespectral com técnicas de Inteligência Artificial (ML e DL) representa um avanço no monitoramento ambiental de metais pesados, consolidando uma abordagem rápida, não destrutiva e de ampla cobertura espacial, superando as limitações dos métodos laboratoriais convencionais. O uso de arquiteturas como Redes Neurais Convolucionais (CNNs) e Autoencoders tem demonstrado capacidade para a extração de padrões relevantes e para a mitigação dos efeitos da alta dimensionalidade dos dados.

Apesar dos avanços, a ampla operacionalização dessa tecnologia ainda enfrenta desafios relevantes. Como os metais pesados raramente apresentam assinaturas espectrais diretas, sua detecção depende da covariação com componentes do solo (matéria orgânica e óxidos de ferro) ou de respostas fisiológicas da vegetação, especialmente na região da borda vermelha (red-edge). Além disso, a transferência de modelos calibrados em laboratório (amostras secas) para aplicações em campo, por meio de satélites ou UAVs, é limitada por fatores ambientais, como a umidade do solo e as interferências atmosféricas. Do ponto de vista computacional, exige-se ainda rigor no pré-processamento e no particionamento dos dados, evitando o vazamento entre treino e teste e prevenindo métricas artificialmente otimistas (VIEL et al., 2023).

Entre as perspectivas futuras, destaca-se a integração de Modelos Físicos de Transferência Radiativa (como PROSAIL e WOFOST) com algoritmos de aprendizado profundo, o que permite uma compreensão mais consistente das alterações físico-biológicas induzidas pelos poluentes. Paralelamente, a miniaturização de sensores e o uso de Edge Computing e TinyML para processamento embarcado (onboard) em satélites e drones tendem a reduzir as limitações de transmissão de dados, viabilizando análises em tempo real e a emissão de alertas imediatos. Por fim, no contexto brasileiro, a aplicação dessas tecnologias é estratégica, podendo subsidiar o monitoramento contínuo de áreas mineradas, a segurança alimentar em sistemas agrícolas intensivos e a gestão de ecossistemas urbanos, consolidando o sensoriamento hiperespectral aliado à IA como ferramenta promissora para a gestão ambiental e formulação de políticas públicas.

Referências Bibliográficas

EL-ALFY, Muhammad A. et al. Toxicity assessment of heavy metals and organochlorine pesticides in freshwater and marine environments, Rosetta area, Egypt using multiple approaches. **Sustainable Environment Research**, v. 29, n. 1, p. 19, 2019.

DOI: https://doi.org/10.1186/s42834-019-0020-9.

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA E INOVAÇÃO DO ESTADO DE SANTA CATARINA (FAPESC). Governo de Santa Catarina vai fomentar pesquisas nas áreas de gestão, tratamento e valorização do carvão mineral com edital de R$ 1 milhão. Disponível em: https://fapesc.sc.gov.br/governo-de-santa-catarina-vai-fomentar-pesquisas-nas-areas-de-gestao-tratamento-e-valorizacao-do-carvao-mineral-com-edital-de-r-1-milhao. Acesso em: 5 out. 2025.

GARCIA, Andre Dalla Bernardina et al. Detailed Mapping of Irrigated Rice Fields Using Remote Sensing data and Segmentation Techniques: A case of study in Turvo, Santa Catarina, Brazil. **Journal of Information and Data Management**, v. 16, n. 1, 2025. DOI: https://doi.org/10.5753/jidm.2025.4181.

GERARDO, Romeu; DE LIMA, Isabel Pedroso; DE LIMA, João L. M. P. Utilização de imagens multies-pectrais do Sentinel-2 na gestão da água no cultivo do arroz, no Baixo Mondego (Portugal). In: DE LIMA, M. Isabel P. et al. (ed.). Livro de Resumos do 4º Congresso Internacional de Engenharia Ambiental. Coimbra: Facul-dade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, jul. 2025. ISBN 978-989-33-7993-6. (Resumo 4CIEA-66).

LIU, Tianjiao et al. Classification of rice heavy metal stress levels based on phenological characteristics using remote sensing time-series images and data mining algorithms. **Sensors**, v. 18, n. 12, p. 4425, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/s18124425.

LIU, Zhenhua et al. Estimation of soil heavy metal content using hyperspectral data. **Remote Sensing**, v. 11, n. 12, p. 1464, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/rs11121464.

LOVYNSKA, Viktoriia et al. Monitoring heavy metals and metalloids in soils and vegetation by remote sensing: A review. **Remote Sensing**, v. 16, n. 17, p. 3221, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/rs16173221.

MAI, Xurui et al. Research progress on the environmental risk assessment and remediation technologies of heavy metal pollution in agricultural soil. **Journal of Environmental Sciences**, v. 149, p. 1-20, 2025.

MIRZAEI, Farhad et al. Modeling the distribution of heavy metals in lands irrigated by wastewater using satellite images of Sentinel-2. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 24, n. 3, p. 537-546, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.03.002.

PYO, JongCheol et al. Estimation of heavy metals using deep neural network with visible and infrared spectros-copy of soil. **Science of the Total Environment**, v. 741, p. 140162, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140162.

RAM, Billy G. et al. A systematic review of hyperspectral imaging in precision agriculture: Analysis of its current state and future prospects. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 222, p. 109037, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109037.

SU, Yi et al. Hyperspectral remote sensing for soil heavy metal inversion: insights and applications. **Interna-tional Journal of Digital Earth**, v. 18, n. 1, p. 2520474, 2025.

SUN, Weichao et al. Performance of hyperspectral data in predicting and mapping zinc concentration in soil. **Science of the Total Environment**, v. 824, p. 153766, 2022.

VIEL, Felipe et al. Hyperspectral image classification: An analysis employing CNN, LSTM, transformer, and attention mechanism. **IEEE Access**, v. 11, p. 24835-24850, 2023. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3255164.

WANG, Mingwei et al. Pollution level mapping of heavy metal in soil for ground-airborne hyperspectral data with support vector machine and deep neural network: A case study of Southwestern Xiong'an, China. **Environ-mental Pollution**, v. 321, p. 121132, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121132.

WANG, Yuan et al. Hyperspectral monitor of soil chromium contaminant based on deep learning network mo-del in the Eastern Junggar coalfield. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 257, p. 119739, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119739.

WANG, Yulong et al. Monitoring of soil heavy metals based on hyperspectral remote sensing: A review. **Earth-Science Reviews**, v. 254, p. 104814, 2024.

YANG, Yun et al. Estimating the heavy metal concentrations in topsoil in the Daxigou mining area, China, using multispectral satellite imagery. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 11718, 2021. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-021-91103-8.

ZHANG, Zhijiang et al. A new vegetation index based on multitemporal Sentinel-2 images for discriminating heavy metal stress levels in rice. **Sensors**, v. 18, n. 7, p. 2172, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/s18072172.

MAPEAMENTO DA SENSIBILIDADE AMBIENTAL AO ÓLEO NOS ENTORNOS DE TRECHO DO OLEODUTO OSSP-12 P NA BAIXADA SANTISTA

1 Lívia Cristofoletti Lunardi, 2 Lucilia do Carmo Giordano, 3 Paulina Setti Riedel
1 UNESP/Rio Claro, e-mail: livia.cristofoletti@unesp.br; 2 UNESP/Rio Claro, e-mail: lucilia.giordano@unesp.br; 3 UNESP/Rio Claro, e-mail: paulina.riedel@unesp.br

Palavras-chave: geoprocessamento; sensibilidade ambiental ao óleo; Baixada Santista

Introdução

Durante a década de 1970, grandes eventos de contaminação marinha por hidrocarbonetos atingiram a costa de muitos países do Hemisfério Norte e deram início aos estudos sobre os impactos do derramamento de óleo ao mar, como o vazamento de 119.000 toneladas de petróleo cru do petroleiro *SS Torrey Canyon* na Inglaterra (Wells, 2017). O Índice de Sensibilidade Ambiental (ISA) ao óleo foi concebido, nesse contexto, como parte integrante dos planos de contingência, com o objetivo de diminuir o tempo de resposta frente a um evento de contaminação a partir do conhecimento prévio das áreas mais sensíveis, portanto, prioritárias para limpeza (Pincinato; Riedel; Milanelli, 2009). Inicialmente, o índice era construído a partir da análise conjunta de diferentes parâmetros relativos ao ambiente costeiro, como o tipo de substrato, parâmetros sedimentológicos e biológicos, exposição relativa a ondas e marés, inclinação das encostas e as atividades humanas (Gundlach; Hayes, 1978; Michel; Hayes; Brown, 1978; Owens; Robilliard, 1981).

O uso de Sistema de Informação Geográfica (SIG) foi definitivamente incorporado na construção do índice de sensibilidade durante a década de 1990 (Jensen *et al*., 1995) e, desde então, muitos países passaram a adotar metodologias integradas nesses sistemas, com destaque para a utilização de análise multicritério em SIG, incorporando critérios analisados com a lógica *fuzzy*, análise de estrutura hierárquica, teoria AHP (*Analytic Hierarchy Process*), dentre outros, para compor o índice de sensibilidade (Vafai; Hadipour; Hadipour, 2013). No início dos anos 2000, o Brasil começou a mapear a sensibilidade do seu litoral em diferentes escalas de operação a partir do Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL), produzido com especificações estabelecidas pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), com base em diretrizes do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (Brasil, 2007; NOAA, 2002) e sintetizado nas Cartas de Sensibilidade Ambiental ao óleo (Cartas SAO), cartas que unem o mapeamento da sensibilidade da linha de costa (ISL), os recursos biológicos e as atividades socioeconômicas passíveis de impacto (Brasil, 2007).

O modal dominante no cenário global para o transporte de grandes toneladas de petróleo e derivados é o aquaviário marítimo, por meio de navios petroleiros (Stanford, 2026) e, por isso, o estudo do mapeamento da sensibilidade ambiental foi fortemente condicionado aos ambientes costeiros e marinhos. No entanto, é importante reconhecer que os outros modais transportadores de petróleo também impõem riscos de contaminação ao meio físico, como no sistema dutoviário, a exemplo do acidente brasileiro com o oleoduto OSBAT em 2004, onde a contaminação atingiu a Serra do Mar e a praia de Guaecá (CETESB, 2005). Para esse modal, ainda não há metodologia amplamente estudada e consolidada como existe nas áreas costeiras, mas algumas abordagens em países com histórico de contaminação, como a Nigéria, onde os autores fizeram uso de critérios de uso e ocupação do solo, elevação, drenagens e áreas protegidas (Ifuwe; Onosemuode, 2024; Wekpe; Whitworth; Baily, 2024).

Assim, o presente trabalho tem como objetivo mapear a sensibilidade ambiental terrestre ao óleo nos entornos do oleoduto OSSP-12 P, que transfere petróleo da Refinaria Presidente Bernardes-Cubatão (RPBC) para a Refinaria Capuava (RECAP), aplicado em um trecho de 12 km situado entre os municípios de Cubatão e São Bernardo do Campo, inserido na Sub-Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 7.2- Rio Cubatão (Sub-UGRHI 7.2), Região Hidrográfica da Baixada Santista, e delimitado por um *buffer* de raio de 2 km de distância das margens do oleoduto.

Material e Métodos

O material utilizado para a obtenção dos resultados consiste no *software* de Sistema de Informação Geográfica (SIG) ArcGIS Pro, na versão 3.6, desenvolvido pelo *Environmental Systems Research Institute* (ESRI) e um computador, no qual são processados os dados geoespaciais manipulados pelo SIG. A pesquisa bibliográfica foi empregada para a identificação das principais metodologias utilizadas no mapeamento da sensibilidade em SIG, dos principias oleodutos brasileiros e da determinação da área de estudo, representada por um raio de influência direta de 2 km no entorno do trecho de 12 km de comprimento do oleoduto OSSP-12 P.

Para a construção do índice de sensibilidade ambiental terrestre, denominado de Índice de Sensibilidade Terrestre (IST), foram definidos cinco critérios analisados dentro da área de estudo: cobertura e uso do solo, declividade, litologia, densidade de fraturas e profundidade do lençol freático. Os critérios utilizados exprimem a sensibilidade do meio físico ao refletirem o tempo de permanência do óleo no ambiente, a permeabilidade do meio físico frente ao contaminante e os recursos fundamentais passíveis de impacto: a água subterrânea e o uso do solo. Esses critérios foram processados em conjunto a partir da técnica de análise de decisão multicritério, com o uso da lógica *fuzzy*.

A cobertura e uso do solo utilizada no estudo provém da Coleção 10 de 2024, produzida para todo o território nacional pelo MapBiomas (2026); a declividade foi obtida através do Modelo Digital de Terreno (MDT) ANADEM (Laipelt *et al.*, 2024) com o uso da ferramenta de geoprocessamento *slope* em SIG, e classificada de acordo com os intervalos de porcentagem estipulados pela EMBRAPA (2018); a litologia foi obtida através da digitalização da integração das cartas geológicas contidas em Sadowski (1974), Machado Filho (2000) e Almeida *et al.* (2019).

A densidade de fraturas e a profundidade do lençol freático também foram obtidas a partir de técnicas de geoprocessamento em SIG: a densidade foi gerada a partir do uso da ferramenta *Kernel density*, e as fraturas extraídas da imagem *BaseMap* a partir do uso da técnica de fotointerpretação. A profundidade do lençol freático foi estimada a partir da subtração da superfície potenciométrica da água subterrânea, gerada por interpolação de malha de pontos, do Modelo Digital de Elevação (MDT) e seus valores agrupados em classes de intervalos de profundidade conforme DAEE e UNESP (2013).

Os critérios em formato vetorial foram convertidos para o formato *raster* e a área de ocorrência da grande massa d'água representada pela Represa Rio das Pedras foi excluída de todos eles, além disso, foram reamostados para a mesma resolução espacial, de aproximadamente 30 metros, e mesma extensão espacial. Os *rasters* foram reclassificados em três classes de intervalo *fuzzy membership* que variam de 0,2 a 0,8 e inseridos na análise multicritério com a operação *Fuzzy Overlay Gamma*, utilizando-se o valor do operador *gamma* igual a 0,9 para produzir o índice de sensibilidade ambiental terrestre que, ao final, foi reclassificado nas classes de sensibilidade alta, média e baixa.

Resultados e Discussão

O mapeamento da sensibilidade ambiental terrestre estabelece três classes de sensibilidade para a área de estudo: alta, média e baixa, espacializadas conforme indicado na Figura 1.

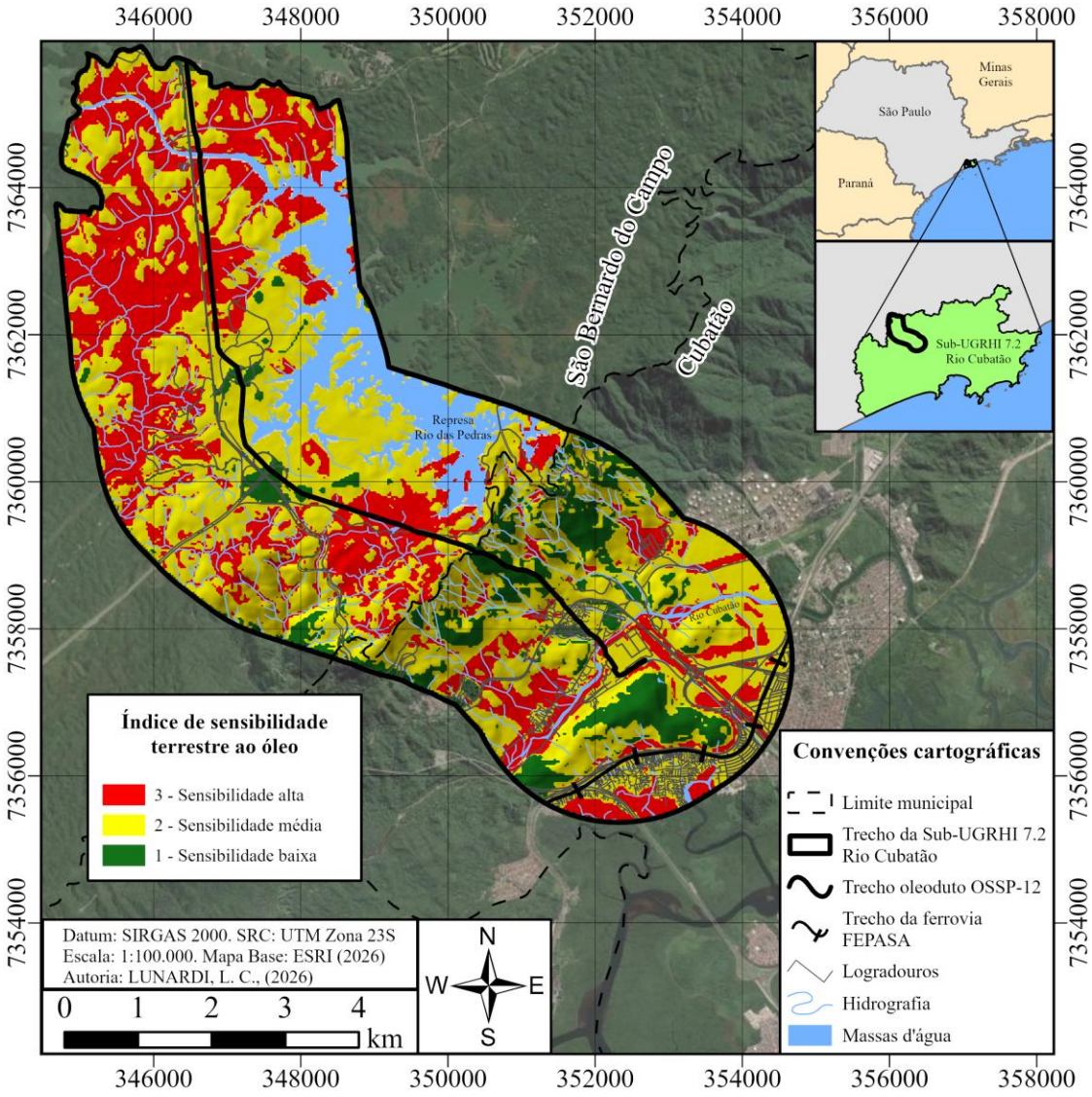


Figura 1: Mapa da sensibilidade ambiental terrestre ao óleo nos entornos de trecho do oleoduto OSSP-12 P.
Fonte: elaborado pela autora (2026).

A área de estudo representa um total de aproximadamente 47 km² e possui 34,2% do seu território classificado em zonas de alta sensibilidade ambiental, correspondentes a 16 km² na superfície, enquanto a maior parcela da área encontra-se em locais onde a sensibilidade é intermediara, em torno 55,7% do total, ocupando por volta de 26 km² do território. Por outro lado, apenas 10,1% da área encontra-se em locais de baixa sensibilidade, equivalente a 5 km² da superfície analisada e correspondendo a classe de menor intervalo de ocorrência observada no trecho estudado.

Os locais de alta sensibilidade encontram-se em regiões predominantemente aplainadas onde aflora grande quantidade de drenagens, córregos e onde passam os leitos de rios de grande porte, como o Rio das Pedras no planalto, o vale do Rio Cubatão na planície e os Rio Paranhos e Queiroz no manguezal na Baixada Santista. Por outro lado, as regiões de menor sensibilidade encontram-se majoritariamente em topografias declivosas, onde aflora pouca ou nenhuma nascente, como em algumas regiões na encosta da Serra de Cubatão e nas encostas e topos dos morrotes de maior extensão espacial dentro da Planície Costeira. Ainda, identifica-se regiões de baixa sensibilidade ambiental em áreas aplainadas no Planalto Paulistano, próximo a rodovias e infraestruturas de auxílio ao transporte.

Por fim, as regiões de sensibilidade ambiental intermediária encontram-se em locais onde a topografia é variada, abrangendo espaços relativamente aplainados até de alta declividade, compreendendo todo o planalto, serra e até em partes da planície litorânea e seus morrotes. Contemplam mais nascentes e afluentes do que as áreas de baixa sensibilidade, no entanto, ainda em menor grau de adensamento do que em áreas de alta sensibilidade, como pode ser observado nos arredores da Represa Rio das Pedras. Ainda, a sensibilidade intermediária pode ser observada próxima a regiões de alta concentração populacional, representadas pela área urbana da cidade de Cubatão e outras áreas residenciais afastadas da zona urbana.

Considerações Finais

O objetivo do estudo, mapear a sensibilidade ambiental nos entornos do oleoduto OSSP-12 P, foi atingido com a aplicação da modelagem desenvolvida dentro do ambiente SIG, no qual o emprego da lógica *fuzzy* por meio da *operação Fuzzy Overlay Gamma* na análise de decisão multicritério demonstrou-se coerente e adequado para os critérios escolhidos. A escolha dos critérios varia a depender dos pesquisadores, de suas áreas de atuação e do que consideram como fatores críticos frente um acidente de contaminação por hidrocarboneto, de modo que o índice de sensibilidade ambiental reflete o caráter pessoal e multifatorial do impacto, seja na biodiversidade, nos aspectos sociais ou nas características do meio físico, como a hidrogeologia e hidrografia.

O presente estudo elaborou o Índice de Sensibilidade Terrestre (IST) que reflete, principalmente, as características do meio físico que mais contribuem para o tempo de permanência do petróleo no ambiente, a sua permeabilidade em relação a percolação do contaminante, a distância estimada até que o hidrocarboneto atinja o lençol freático e o tipo de uso e cobertura do solo, de modo que foi possível levar em consideração, ainda que de maneira reduzida, a influência da vegetação e as principais atividades humanas desenvolvidas na área. Os resultados obtidos pelo estudo contribuem para o planejamento de planos de contingência nos municípios de Cubatão e São Bernardo do Campo, bem como norteiam a atuação direcionada de equipes de limpeza para mitigação dos impactos na área analisada e permitem que o índice possa ser aplicado em outros municípios cruzados por oleodutos.

Para refinar o índice, sugere-se que outros critérios sejam incorporados para melhor refletir aspectos biológicos e socioeconômicos presentes na área e salienta-se, ainda, que as limitações encontradas na modelagem do IST estão associadas à técnica de extração de fraturas por meio de fotointerpretação. Não é possível aplicá-la em áreas de grandes massas d'água, como a Represa Rio das Pedras, implicando na exclusão de áreas como essa da análise para não enviesar o resultado devido à falta de informação espacial. No entanto, é de extrema importância ressaltar que represas, ou outras massas d'água, costumam ser altamente sensíveis a contaminação pela sua função socioeconômica e ecológica. Portanto, para fins de esclarecimento, o presente estudo considera que a sensibilidade ambiental na região da Represa Rio das Pedras é alta, apesar da área não estar diretamente incluída na análise.

Agradecimentos

As autoras agradecem o Apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, gerido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2026/01604-7 – PRH40/UNESP. As autorias também gostariam de agradecer ao UNESPetro – Centro de Ciências Naturais Aplicadas, pelo laboratório de informática utilizado durante o desenvolvimento do estudo.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, V. V. de *et al*. *Mapa geológico integrado da Região Metropolitana de São Paulo, escala 1:250.000*. São Paulo: Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Especificações e normas técnicas para a elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. 107 p.

CETESB - Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. Relatório Técnico: *Acidente com o Oleoduto OSBAT-PETROBRAS/TRANSPETRO- Guaecá- São Sebastião*. São Paulo, 101 p., 2005.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE); UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Laboratório de Estudos de Bacias. *Águas subterrâneas no Estado de São Paulo: diretrizes de utilização e proteção*. São Paulo: DAEE/LEBAC, 2013. 48 p.

EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos (SiBCS)*. 5. ed. Brasília: EMBRAPA, 2018.

GUNDLACH, E. R.; HAYES, M. O. Vulnerability of coastal environments to oil spill impacts. *Marine Technology Society Journa*l, v. 12, p. 18-27, 1978.

IFUWE, C. C.; ONOSEMUODE, C. Environmental sensitivity index mapping for environmental sustainable cleanup along NAOC Pipeline, Asemoku, Delta State, Nigeria. *Journal of Geographic Information System*, v. 16, n. 2, p. 148–165, 2024. DOI: https://doi.org/10.4236/jgis.2024.162010.

JENSEN, R.; RAMSEY, E. W.; HOLMES, J. M.; MICHEL, J. E.; SAVITSKY. B.; DAVIS, B. A. Environmental sensitivity index (ESI) mapping for oil spills using remote sensing and geographic information system technology. *International Journal of Geographical Information Systems*, v. 4(2), p. 181-201, 1995. DOI: https://doi.org/10.1016/0964-5691(95)00017.

LAIPELT, L.; ANDRADE, B. C.; COLLISCHONN, W.; TEIXEIRA, A. de A.; PAIVA, R. C. D. de; 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.

MACHADO FILHO, J. G. *Estabilidade de encostas e condicionantes geológicos, geomorfológicos e estruturais, num trecho da Serra de Cubatão*. 2000. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. doi:10.11606/D.44.2000.tde-05102015-105648.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomas – *Coleção 10 da série anual de mapas de cobertura e uso da terra do Brasil (1985–2024).* [S.l.]: MapBiomas, 2024. Disponível em: https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/.

MICHEL, J.; HAYES, M. O.; BROWN, P. J. Application of an oil spill vulnerability index to the shoreline of lower Cook Inlet, Alaska. *Environmental Geology*, v. 2, n. 2, p. 107–117, 1978. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/BF02380473.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. *Environmetal Sensitivity Index Guidelines*. Version 3.0. Techinical Memorandum NOS OR&R 11. Seatle, EUA: Office Response and Restoration, National Oceanic and Atmospheric Administration, v. 13, n.3, p. 277-287, 2002.

OWENS, E. H.; ROBILLIARD, G. A. Shoreline sensitivity and oil spills: a re-evaluation for the 1980's. *Marine Pollution Bulletin*, v. 12, n. 3, p. 75–78, 1981. DOI: https://doi.org/10.1016/0025-326X(81)90196-X.

PINCINATO, F. L.; RIEDEL, P. S.; MILANELLI, J. C. C. Modelling an expert GIS system based on knowledge to evaluate oil spill environmental sensitivity. *Ocean & Coastal Management*, v. 52, n. 9, p. 479-486, 2009. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2009.08.003.

SADOWSKI, G. R. *Tectônica da Serra de Cubatão, SP*. 1974. Tese (Doutorado em Geologia Geral e de Aplicação) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1974. DOI: https://doi.org/10.11606/T.44.1974.tde-26092012-141057.

STANFORD, Stanford Understand Energy. *Understand Oil Trade and Transportation*. Stanford Energy, 2026. Disponível em: https://understand-energy.stanford.edu/news/understand-oil-trade-and-transportation.

VAFAI, F.; HADIPOUR, V.; HADIPOUR, A. Determination of shoreline sensitivity to oil spills by use of GIS and fuzzy model: case study – the coastal areas of Caspian Sea in north of Iran. *Ocean & Coastal Management*, v. 71, p. 123–130, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.05.033.

WEKPE, V. O.; WHITWORTH, M.; BAILY, B. Terrestrial environmental sensitivity index mapping (TESIM) of the coastal areas of the Niger Delta region of Nigeria. *Scientific African*, v. 24, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02152.

WELLS, P. G. The iconic Torrey Canyon oil spill of 1967-Marking its legacy. *Marine Pollution Bulletin*, v. 115, n. 1-2, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.12.013.

ESTIMATIVA DE CURVAS IDF COM DADOS DE SATÉLITE: COMBINAÇÃO E CORREÇÃO DE PRODUTOS DE PRECIPITAÇÃO

1 Aldo Ivan Romero Miranda, 2 Daniel Gustavo Allasia Piccilli, 3 Moisés Perales Avilés, 4 Rutineia Tassi, 5 Vitória Tesser Martin, 6 Eliane Fischborn, 7 Limber Zenteno Aguilera, 8 Camila Caballero Cristaldo

1 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: romialivbr@gmail.com; 2 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: dallasia@gmail.com; 3 Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, e-mail: moisesperalesaviles@gmail.com; 4 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: rutineia@gmail.com; 5 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: vitoriatmartin@gmail.com; 5 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: eliane.fischborn@acad.ufsm.br; 7 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: limberzent.agui@gmail.com; 8 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: camicaba2601@gmail.com.

Palavras-chave: Produtos de precipitação; Curvas IDF; Regressão múltipla.

Introdução

As curvas Intensidade–Duração–Frequência (IDF) são fundamentais para o dimensionamento de obras hidráulicas e o planejamento de sistemas de drenagem urbana, pois permitem estimar a magnitude de eventos extremos de precipitação em diferentes escalas temporais. No entanto, sua construção depende de séries pluviométricas longas, contínuas e consistentes, cuja disponibilidade ainda é limitada, especialmente em regiões com baixa densidade de monitoramento.(Lanciotti et al., 2022)

Nesse contexto, produtos de precipitação derivados de satélite e reanálises surgem como alternativa por oferecem cobertura espacial contínua e séries extensas.

Aplicações em bacias brasileiras com escassez de dados observacionais mostram que produtos satelitais são uma alternativa viável para geração de curvas IDF, embora ainda apresentem limitações na representação de eventos extremos (Cremasco et al., 2024). No sul do Brasil, estudos indicam essa tendência de superestimativa de extremos em produtos satelitais, evidenciando a necessidade de aplicação de técnicas de correção de viés antes da modelagem (Schiavo Bernardi et al., 2015). Avanços recentes demonstram que a combinação de múltiplos produtos, associada à correção de viés, pode reduzir significativamente as incertezas e melhorar a confiabilidade das estimativas de extremos (Mianabadi, 2023).

A relevância desse tema torna-se ainda mais evidente diante de eventos recentes, como o ocorrido entre abril e maio de 2024 no Rio Grande do Sul (RS), com acumulados superiores a 300–400 mm em poucos dias, resultando em cheias históricas e impactos severos sobre infraestrutura e populações ribeirinhas (Collischonn et al., 2025). Esse evento faz parte de um cenário de aumento de extremos climáticos na América do Sul, algo já evidenciado em estudos recentes. Conte; Tassi e Bayer (2026) destacam o papel crescente dos produtos de precipitação por satélite (SREs) no monitoramento de eventos extremos, ao mesmo tempo em que evidenciam limitações importantes na sua capacidade de representação, especialmente no Brasil.

Diante desse cenário, este estudo analisa a performance de diferentes tipos de produtos de precipitação na elaboração de curvas IDF para o município de Muçum/RS no período de 2000 a 2025. Incluiu-se estimativas baseadas em sensoriamento remoto: IMERG (Precipitation Processing System (PPS) At NASA GSFC, 2023) e CHIRPS (Funk et al., 2015), dados de reanálise climática ERA5-Land (Copernicus Climate Change Service, 2019) e produtos híbridos que combinam múltiplas fontes de informação MSWEP(Wang et al., 2026). O desempenho dos produtos é avaliado por meio de métricas estatísticas, como erro médio, erro relativo e raiz do erro quadrático médio.

Material e Métodos

-Área de estudo

A área de estudo compreende o município de Muçum, localizado na bacia hidrográfica do Taquari-Antas, no estado do Rio Grande do Sul (Figura 01). A cidade foi uma das mais atingidas pelo evento extremo ocorrido em abril e maio de 2024, com cerca de 80% da população atingida (DEE/RS, 2025).

-Disponibilidade de dados de precipitação

Foram utilizados dados diários de precipitação provenientes de quatro produtos de chuva amplamente empregados em estudos hidrológicos: IMERG, CHIRPS, ERA5-Land e MSWEP.

Esses produtos apresentam diferentes metodologias resoluções espaciais e, combinando dados de sensoriamento remoto, reanálises e observações de superfície. As informações foram agregadas na escala diária, intervalo em que todos os produtos apresentam disponibilidade de dados.

Como referência, foram utilizados dados observados de precipitação provenientes da estação pluviométrica de código 02951070, localizada no município de Muçum. A estação é operada pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB) e seus dados disponibilizados no Portal HidroWeb. A série pluviométrica observada apresenta baixa ocorrência de falhas no período analisado e boa representação dos eventos extremos registrados na região. Esses dados foram utilizados exclusivamente para a avaliação do desempenho dos produtos de precipitação.

As informações foram agregadas na escala diária, intervalo em que todos os produtos apresentam disponibilidade de dados, a partir da qual foram calculados acumulados para diferentes durações 1, 2, 3, 4, 7, 10, 20, 30, 45 e 60 dias.

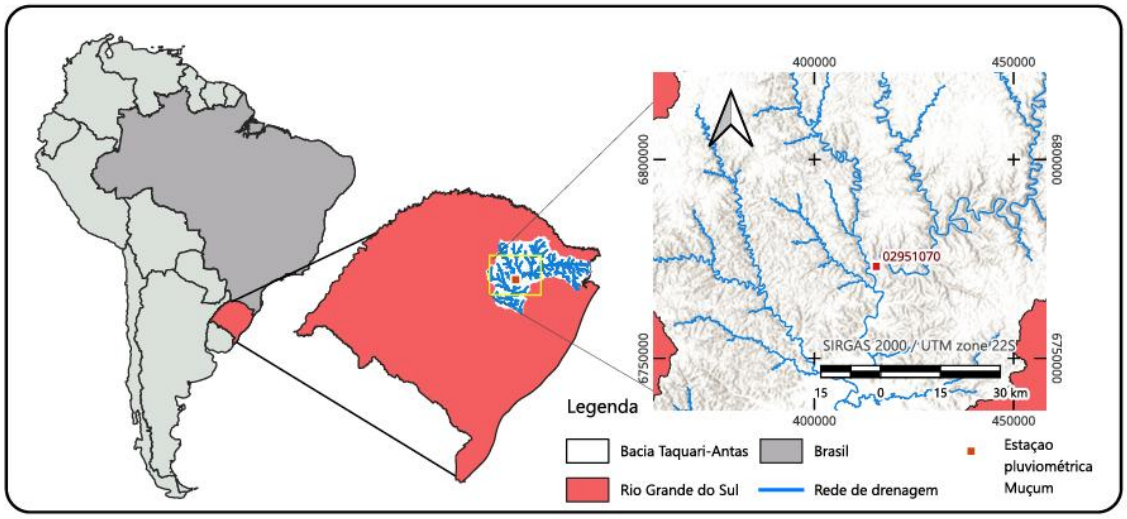


Figura 01: Localização da área de estudo.
Fonte: Elaborado pelo autor

-Correção e combinação dos dados

Com o objetivo de melhorar a estimativa de precipitação, foi adotada uma abordagem baseada na combinação de produtos de precipitação em duas etapas: ponderação via stacking (Equações 01 e 02) e correção de viés (Equação 03).

Na primeira etapa, aplicou-se regressão linear múltipla para combinar os produtos de precipitação, essa abordagem segue o princípio do stacking, no qual múltiplas fontes são combinadas por meio de um modelo de nível superior que aprende os pesos ótimos, sendo amplamente aplicada na reconstrução de séries. (Mianabadi, 2023; Yang et al., 2022)

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \beta_4 \cdot x_4 \quad (01)$$

Os coeficientes $\beta_i$representam os pesos de cada produto, estimados por mínimos quadrados, de forma a minimizar o erro entre valores observados e estimados. Assim, a estimativa combinada é dada por:

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^{k} \beta_i \cdot x_i \quad (02)$$

onde $x_i$são os produtos de precipitação.

Na segunda etapa, aplicou-se uma correção de viés baseada na razão entre médias:

$$f_{corr} = \frac{\bar{x}_{obs}}{\bar{x}_{est}} \quad (03)$$

onde $\bar{x}_{obs}$e $\bar{x}_{est}$são as médias observada e estimada, respectivamente. Essa correção ajusta desvios sistemáticos na magnitude da precipitação, conforme recomendado em estudos.(Ombadi et al., 2018; Prakash et al., 2016)

-Modelagem de extremos e curvas IDF

Para a construção das curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF), ajustou-se a distribuição de Valores Extremos Generalizada (GEV), amplamente empregada na modelagem de eventos hidrológicos extremos devido à sua flexibilidade em representar diferentes comportamentos de cauda.

A função de distribuição acumulada da GEV é dada conforme a Equação 04:

$$F(x) = \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{\xi}}\right\} \quad (04)$$

para $1 + \xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) > 0$, onde μé o parâmetro de localização, $\sigma > 0$ *é* o parâmetro de escala e ξé o parâmetro de forma.
Essa abordagem segue os fundamentos da hidrologia estatística para análise de extremos, conforme descrito por (Mianabadi, 2023; Pinto, 2007).

-Avaliação de desempenho

Para avaliar o desempenho dos produtos de precipitação, foram utilizados três métricas estatísticas: Erro Relativo (ER) (Equação 05), Erro Médio (EM) (Equação 06) e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) (Equação 07).

$$ER(\%) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{P_i^{est} - P_i^{obs}}{P_i^{obs}}\right) \times 100 \quad (05)$$

$$EM = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(P_i^{est} - P_i^{obs}\right) \quad (06)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i^{est} - P_i^{obs})^2} \quad (07)$$

onde P_i^{est}e P_i^{obs}representam, respectivamente, os valores estimados e observados, né o número de observações.

Resultados e Discussão

Figura 02 estão apresentadas as curvas IDF obtidas para cada produto de precipitação, considerando os dados originais, corrigidos por viés e ponderados, para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 25 e 50 anos. De modo geral, observa-se que houve diferenças expressivas entre os produtos em relação à curva de referência gerada com base nos dados observados (02951070).

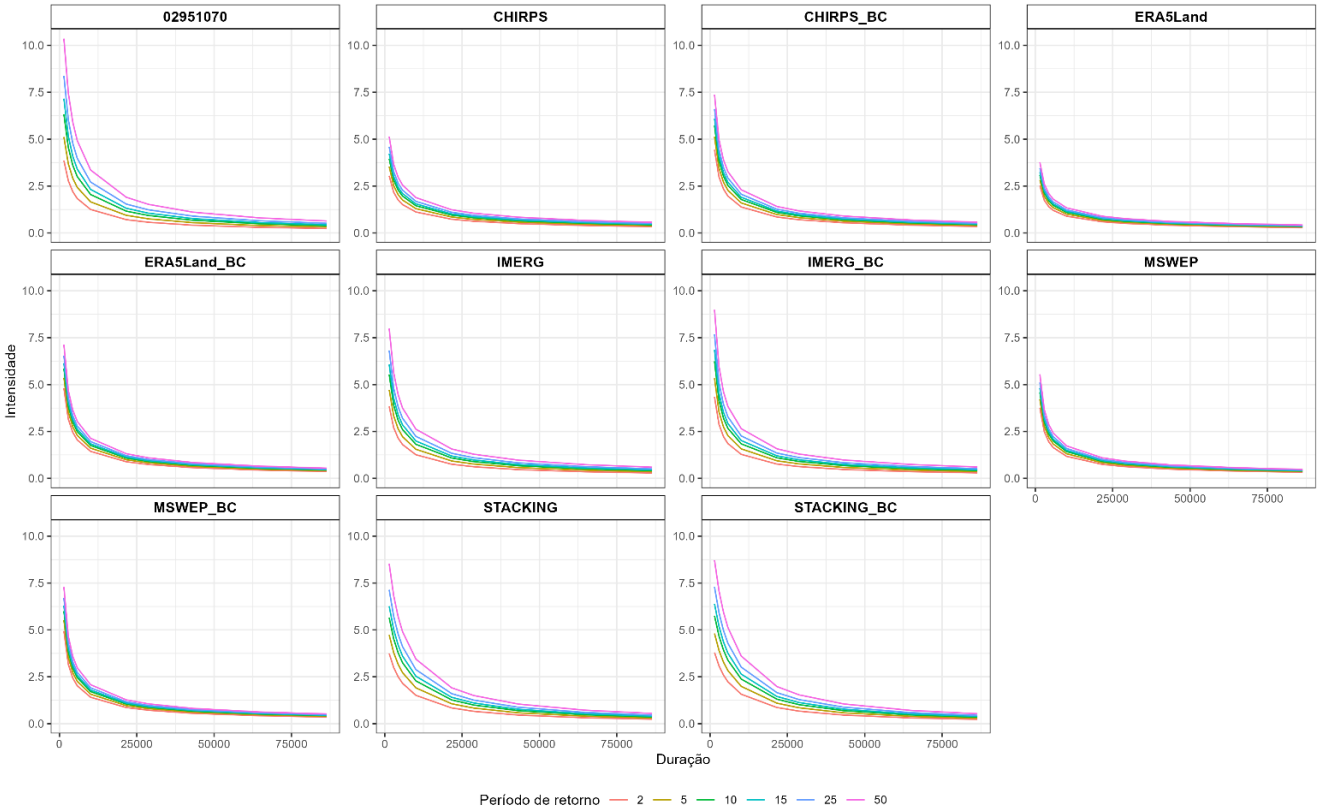


Figura 02: Curvas Intensidade-Duração-Frequência.
Fonte: Elaborado pelo autor

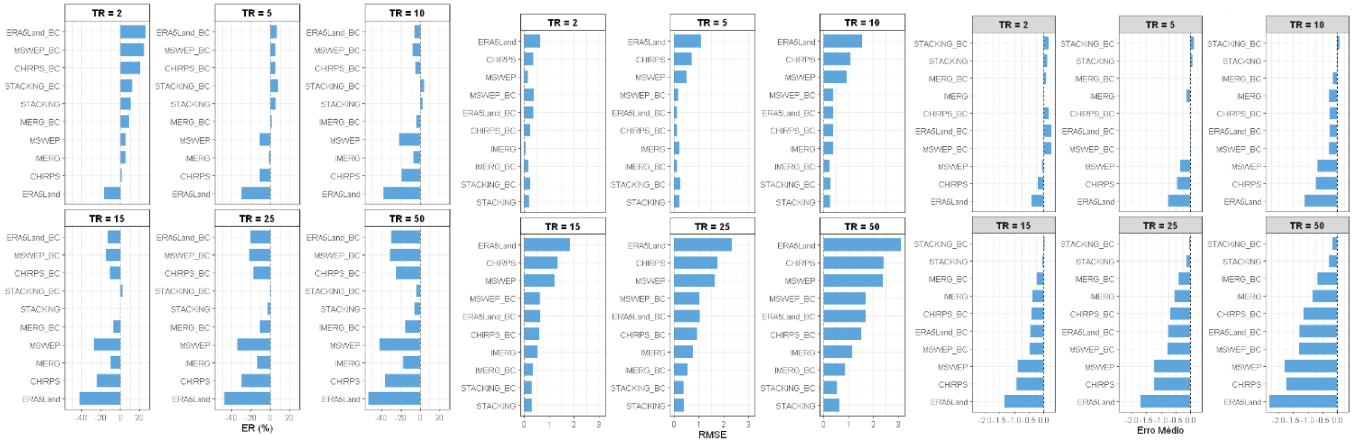


Figura 03: Métricas de avaliação.
Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 03 é possível observar as métricas de avaliação para os diferentes produtos e períodos de retorno. Para a métrica RMSE, verifica-se uma tendência de aumento dos erros com a elevação do período de retorno, refletindo a maior incerteza associada à estimativa de eventos extremos. Esse comportamento é esperado, uma vez que eventos mais raros dependem de extrapolações.

Em relação ao erro médio e ao erro relativo, os produtos sem correção de viés apresentaram predominantemente valores negativos, indicando uma tendência de subestimativa das intensidades de precipitação. Por outro lado, as versões corrigidas reduziram significativamente essa tendência, aproximando os indicadores de zero.

O pior desempenho observado foi do ERA5-Land que pode estar associado à sua natureza de reanálise, que tende a suavizar extremos. Por outro lado, O IMERG apresentou o melhor desempenho, em concordância com a literatura recente (Conte,

Tassi e Bayer, 2026). Adicionalmente os resultados deste estudo evidenciam que a combinação de produtos e a aplicação de correções contribuem para melhorias significativas no desempenho.

Considerações Finais

Os resultados demonstram que produtos de precipitação por satélite possuem potencial para a geração de curvas IDF, especialmente após a aplicação de técnicas de correção. Em regiões com ausência de dados pluviométricos, a transferência de fatores de correção obtidos em áreas monitoradas mostra-se uma alternativa viável, desde que consideradas similaridades fisiográficas e climáticas.

Entretanto, sua aplicação deve considerar as incertezas associadas aos métodos de correção, aos ajustes estatísticos e às limitações dos próprios produtos. Como perspectiva futura, destaca-se o uso de produtos com a menor resolução temporal disponível e, quando necessário, a aplicação de técnicas de desagregação para obtenção de durações menores.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, ao meu orientador, à Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental pelo apoio e pelos ensinamentos que contribuíram para a realização deste trabalho. Agradeço também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte ao desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

COLLISCHONN, Walter et al. The exceptional hydrological disaster of April-May 2024 in southern Brazil. RBRH, v. 30, p. e1, 2025.

CONTE, Luiza Chiarelli; TASSI, Rutineia; BAYER, Débora Missio. Satellite-Based Rainfall Datasets: A Global Systematic Review of Applications, Accuracy, and Research Gaps. IEEE Access, v. 14, p. 29539–29565, 2026.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE. ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), , 2019. Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/doi/10.24381/cds.e2161bac>. Acesso em: 4 abr. 2026

CREMASCO, Camila Rodrigues et al. Análise de curvas IDF por dados de satélite na bacia do Alto Paranapanema/SP-Brasil. Revista de Geografia, v. 41, n. 1, p. 73–91, 11 abr. 2024.

DEE/RS. Impactos socioeconômicos dos eventos climáticos extremos de 2024 no Rio Grande do Sul: uma análise após um ano do desastre. abr. 2025.

FUNK, Chris et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. Scientific Data, v. 2, n. 1, p. 150066, 8 dez. 2015.

LANCIOTTI, Sabrina et al. Intensity–Duration–Frequency Curves in a Data-Rich Era: A Review. Water, v. 14, n. 22, p. 3705, 16 nov. 2022.

MIANABADI, Ameneh. Evaluation of long-term satellite-based precipitation products for developing intensity-frequency (IF) curves of daily precipitation. Atmospheric Research, v. 286, p. 106667, maio 2023.

OMBADI, Mohammed et al. Developing Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves From Satellite-Based Precipitation: Methodology and Evaluation. Water Resources Research, v. 54, n. 10, p. 7752–7766, out. 2018.

PINTO, Éber José De Andrade. Hidrologia Estatística. [S.l.]: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2007.

PRAKASH, Satya et al. From TRMM to GPM: How well can heavy rainfall be detected from space? Advances in Water Resources, v. 88, p. 1–7, fev. 2016.

PRECIPITATION PROCESSING SYSTEM (PPS) AT NASA GSFC. GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V07. NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, , 2023. Disponível em: <https://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/GPM_3IMERGHH_07.html>. Acesso em: 4 abr. 2026

SCHIAVO BERNARDI, E. et al. TRMM rainfall estimative coupled with Bell (1969) methodology for extreme rainfall characterization. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, v. 369, p. 163–168, 11 jun. 2015.

WANG, Xuetong et al. MSWEP V3: Machine Learning-Powered Global Precipitation Estimates at 0.1° Hourly Resolution (1979-Present). arXiv, , 2026. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2602.01436>. Acesso em: 4 abr. 2026

YANG, Wencong et al. Long-term reconstruction of satellite-based precipitation, soil moisture, and snow water equivalent in China. Hydrology and Earth System Sciences, v. 26, n. 24, p. 6427–6441, 21 dez. 2022.

RESILIÊNCIA AMBIENTAL: UM ESTUDO DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS QUEIMADAS

Khallil Said Samir Sobh, Ygor Garcez Ferrer, Arthur Jorge de Veras da Silva
Academia de Bombeiro Militar D. Pedro II, e-mail: ferrer.ygor@gmail.com; Academia de Bombeiro Militar D. Pedro II, e-mail: ksssobh@gmail.com, Universidade Federal do Rio de Janeiro, e-mail: arthurdeveras@hotmail.com

Palavras-chave: NDVI; Resiliência; Geoprocessamento.

Introdução

O Estado do Rio de Janeiro tem sido, nos últimos anos, palco de inúmeros eventos de queimadas que comprometem a integridade ambiental, a biodiversidade e a segurança da população. De acordo com o Anuário Estatístico do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro (CBMERJ), somente no ano de 2024 foram registradas 21.207 ocorrências relacionadas a incêndios em vegetação, representando um aumento de 92,2% em relação ao ano de 2023 (CBMERJ, 2025). Esses eventos, embora frequentemente decorram de ações antrópicas, também podem ter origem natural, associados à combinação de fatores climáticos como elevadas temperaturas, ignição espontânea e descargas elétricas (Sari, 2022).

Diante disso, torna-se importante compreender que os incêndios florestais são considerados eventos que causam severos danos à cobertura arbórea e são definidos como qualquer queima descontrolada que ocorra em zona de mata, e que cause danos à fauna ou à flora da região, bem como perdas materiais, humanas e econômicas (Tetto et al., 2012). Dada a magnitude dos impactos, tais episódios são classificados como desastres ambientais, afetando não apenas a integridade da vegetação, mas a própria subsistência e segurança das populações atingidas (Bandara et al., 2023). A nível nacional, os incêndios são considerados desastres naturais, do grupo climatológico com base na Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (BRASIL, 2013, p. 4).

O monitoramento de focos de calor no Rio de Janeiro é realizado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), por meio do Banco de Dados de Queimadas (BDQueimadas), disponibilizado no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Este sistema utiliza uma rede de 31 satélites para prever o risco de fogo (Gois et al., 2020), servindo como fonte primária para a análise da Serra da Maria Comprida.

O presente trabalho analisou a dinâmica temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) na Serra da Maria Comprida, localizada em Petrópolis, no Estado do Rio de Janeiro. A escolha desta área é estratégica devido ao seu histórico de incêndios florestais e à sua importância para a biodiversidade da Mata Atlântica, bioma que tem sofrido pressões crescentes de queimadas (SOS Mata Atlântica e INPE, 2024). A partir de dados comparativos, foi avaliada a variação média do NDVI ao longo do tempo, considerando o período posterior aos eventos de fogo ocorridos em setembro de 2024, com o objetivo de identificar padrões de recuperação ou persistência de degradação da cobertura vegetal.

Material e Métodos

O estudo foi conduzido no Monumento Natural da Serra da Maria Comprida, unidade de conservação situada no bairro de Araras, Petrópolis, região serrana do Estado do Rio de Janeiro. A área abrange aproximadamente 7.803,69 hectares, sob cotas altimétricas superiores a 1.000 metros, com limites definidos pela Lei n° 9.756/2022. A escolha desta área justifica-se pela sua vulnerabilidade histórica a incêndios florestais e pela alta concentração de focos de calor detectados pelo BDQueimadas (INPE). O evento de maior magnitude analisado ocorreu em setembro de 2024, período caracterizado por baixa umidade relativa do ar na região, o que potencializou a propagação do fogo e a severidade dos danos à biodiversidade da Mata Atlântica local.Para a integração dos dados vetoriais, utilizou-se o Google Earth Engine (GEE), plataforma reconhecida pela eficiência no processamento de dados geoespaciais em larga escala (Robinson et al., 2017). A confiabilidade metodológica do sistema é validada por índices de concordância reportados entre 97,68% e 98,80% frente a dados de referência revisados por pares (Qasimi et al., 2022). Foram utilizadas imagens dos satélites Landsat e Sentinel, com aplicação de filtros para remoção de nuvens e geração de composições temporais por mediana. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) foi empregado no sensoriamento remoto para a análise da cobertura vegetal e é calculado a partir das bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (Red), permitindo a obtenção de valores no intervalo de -1 a 1, associados ao vigor da vegetação (Miranda et al., 2024).

O índice NDVI quantifica a cobertura do solo através da resposta espectral, neste preâmbulo, valores negativos indicam água ou estruturas artificiais; valores próximos a zero (até 0,2) referem-se a solo exposto e áreas áridas; enquanto valores positivos crescentes refletem o vigor vegetal. A vegetação esparsa ou rasteira situa-se geralmente entre 0,2 e 0,5, ao passo que valores superiores a 0,5 (atingindo 0,8) apontam para florestas densas e saudáveis. Vale ressaltar que esses limiares são flexíveis e podem variar conforme o ecossistema e a metodologia aplicada (Khalil et al., 2024).

Os registros de focos de incêndio na área de estudo ocorreram em 18/08/2024 e entre os dias 13 e 15/09/2024. Com base nessas datas, a análise foi compartimentada em três períodos distintos: o pré-incêndio, compreendendo os meses de junho a agosto de 2024; o pós-incêndio imediato, abrangendo setembro e outubro de 2024; e o estágio de regeneração tardia, analisado um ano após o período pré-incêndio (junho a agosto de 2025). Essa estrutura temporal permitiu a comparação direta do vigor vegetativo antes, durante e após a perturbação ambiental. Para a interpretação espacial do grau de degradação e recuperação da vegetação, os valores de NDVI foram analisados dentro de uma amplitude variando de -0,37 (mínimo) a 0,98 (máximo). Os

valores negativos (< 0) foram classificados na cor azul para representar corpos hídricos e superfícies não vegetais. Para a vegetação propriamente dita, adotou-se o intervalo entre 0 e 0,98, o qual foi segmentado em quatro classes iguais de 0,245. Estas classes foram representadas por uma faixa de cores (vermelho, amarelo, verde claro e verde escuro), permitindo correlacionar os níveis de vigor vegetativo à resposta espectral. Adicionalmente, gerou-se uma série temporal do NDVI médio da área para avaliar a dinâmica sazonal, os impactos imediatos do fogo e a subsequente resiliência ecossistêmica. A análise desses parâmetros fundamenta-se no conceito de resiliência ambiental, foco deste estudo. Sob essa ótica, a resiliência refere-se à capacidade de ecossistemas resistirem, absorverem e se recuperarem de perturbações como eventos climáticos extremos, ações antrópicas ou poluição, preservando suas estruturas, funções e processos ecológicos fundamentais (Yi e Jackson, 2021). Um sistema ambientalmente resiliente pode retomar seu estado original ou evoluir para um novo equilíbrio dinâmico após o distúrbio; caso contrário, pode sofrer degradação progressiva e perda irreversível de sustentabilidade (Sánchez-Pinillos et al., 2024).

Resultados e Discussão

Conforme Figura 01, a análise de gráfico de fevereiro de 2024 até março de 2026 evidenciou uma queda significativa nos valores de NDVI em setembro de 2024, associada à ocorrência de queimadas na área de estudo. Esse comportamento indica redução abrupta do vigor vegetativo, compatível com a remoção da cobertura vegetal causada pelo fogo, mesmo havendo incêndio em períodos posteriores, o foco do estudo são os eventos causados em setembro de 2024.

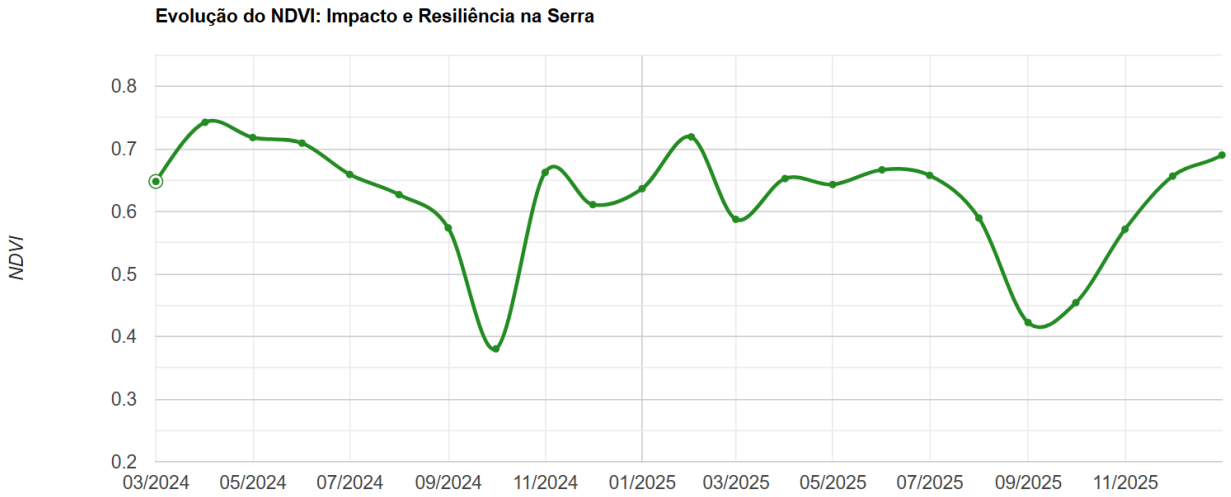


Figura 01: Variação média mensal do NDVI na Serra da Maria Comprida (RJ) entre janeiro de 2024 e março de 2026. Fonte: Elaborado pelos autores (2026) via Google Earth Engine.

Nos meses subsequentes, observou-se a recuperação gradual do NDVI, cujos valores situam-se entre 0,55 e 0,75, sugerindo a regeneração da vegetação e a retomada da atividade fotossintética estável. Todavia, foi registrado um novo decréscimo nos índices em setembro do ano seguinte. A análise de focos de calor confirmou eventos nos dias 20/07/2025 e 22/08/2025, o que, somado à sazonalidade climática, reforça a vulnerabilidade da paisagem durante os períodos de estiagem. Tais condições de baixa umidade aumentam a probabilidade de incêndios recorrentes, condicionando as flutuações observadas na série temporal. Na Figura 02, é possível verificar que na camada pré-fogo da região da Serra da Maria Comprida, o predomínio da classe verde-escura (69,80%). Este índice indica a presença de vegetação densa e bem desenvolvida, com elevado vigor vegetativo e fitofisionomias arbóreas saudáveis. A área verde-clara (21,36%) representa a vegetação moderada, composta por estratos arbustivos e árvores de pequeno porte com atividade fotossintética estável, porém com menor densidade foliar. Áreas em amarelo (7,24%) caracterizam vegetação esparsa ou rasteira, sugerindo estágios iniciais de regeneração natural ou baixa produtividade primária. Por fim, as zonas em vermelho (1,30%) denotam baixo vigor vegetativo, englobando solo exposto, afloramentos rochosos, infraestrutura urbana ou cicatrizes de incêndios pretéritos. Corpos hídricos foram identificados em azul, correspondendo a 0,30% da área total.

Na análise da camada pós-fogo, observa-se uma alteração significativa na paisagem da Serra da Maria Comprida. A classe Verde Escura (48,51%) sofreu uma redução drástica em comparação ao período anterior, evidenciando a supressão direta da biomassa florestal pelo incêndio. Concomitantemente, houve expansão das classes de transição: a vegetação moderada (Verde Claro) ascendeu para 28,02% e a esparsa (Amarela) para 20,92%, indicando a degradação de florestas primárias para estágios sucessionais. A classe representativa de solo exposto (Vermelha) atingiu 2,26%, demarcando as áreas de maior severidade de queima, onde a reflectância no infravermelho próximo (NIR) foi mínima. A estabilidade da classe hídrica (Azul, 0,29%) ratifica a consistência dos dados e a ausência de interferências externas significativas.

A análise da camada de resiliência, referente ao ano de 2025, revela um vigoroso processo de regeneração natural na área de estudo. A classe Verde Escura retornou ao patamar de 65,69%, indicando que a maior parte das matas densas recuperou sua biomassa foliar e estabilidade fotossintética após o distúrbio. Observa-se que a classe Vermelha regrediu para 1,31%, valor virtualmente idêntico ao registrado no período pré-incêndio, o que sinaliza a recolonização total das cicatrizes de solo exposto

por vegetação pioneira. As classes de transição, Verde clara (24,31%) e Amarela (8,42%), apresentam uma leve elevação em relação aos dados iniciais, sugerindo que embora a cobertura tenha retornado, certas áreas ainda se encontram em estágios sucessionais intermediários (capoeiras). A estabilidade da classe Azul (0,27%) ao longo de toda a série temporal valida a precisão metodológica e a ausência de ruídos sazonais que pudessem comprometer a interpretação da resiliência da Mata Atlântica local."

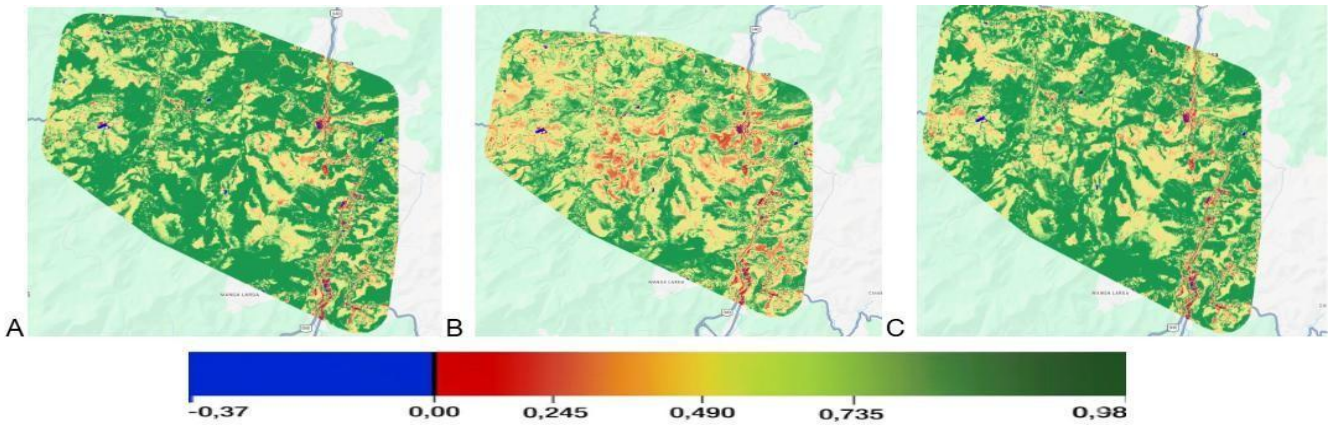


Figura 02: Comparativo temporal do NDVI na Serra da Maria Comprida (RJ): (A) Pré-incêndio (jun-ago/2024); (B) Imediatamente pós-fogo (set-out/2024) e (C) 08 meses após o incêndio (jun-ago/2025).
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Na Figura 03 apresenta a dinâmica temporal do NDVI na Serra da Maria Comprida, comparando os estágios pré-fogo, pós-fogo e de resiliência. Observa-se que a classe verde-escura (vegetação densa) sofreu redução drástica após o incêndio, mas recuperou-se significativamente no período de resiliência, indicando o restabelecimento do vigor vegetativo. O aumento das classes verde-clara (moderada), amarela (esparsa) e vermelha (solo exposto) no período pós-fogo demonstra a degradação da biomassa. Já a classe azul manteve-se estável em aproximadamente 0,30%.

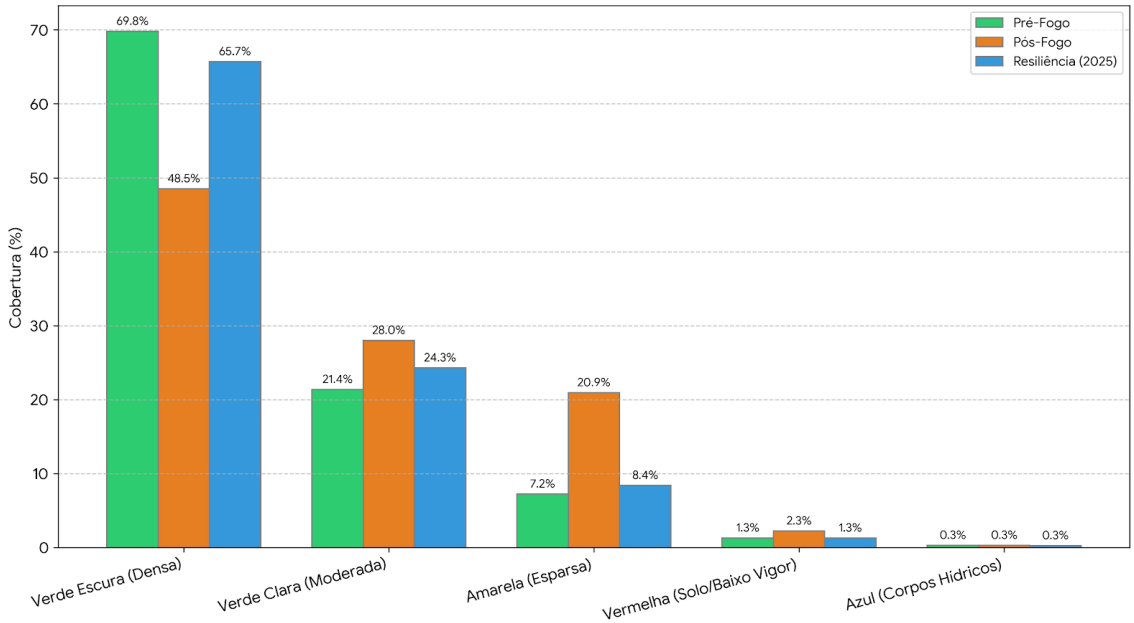


Figura 03: Dinâmica temporal do NDVI - Serra da Maria Comprida.
Fonte: Elaborado pelos autores.

No período referente à resiliência (2025), os dados indicam um vigoroso processo de regeneração natural. A cobertura de vegetação densa recuperou-se para 65,69%, sinalizando o restabelecimento da biomassa foliar e da estabilidade fotossintética. A classe de solo exposto regrediu para 1,31%, valor análogo ao período pré-incêndio, o que sugere a recolonização das cicatrizes por espécies pioneiras. Embora a cobertura tenha retornado, os índices de vegetação moderada (24,31%) e esparsa (8,42%) permanecem ligeiramente superiores aos níveis iniciais, indicando que frações da área ainda se encontram em estágios sucessionais intermediários (em estágio inicial). Por fim, a persistência da classe Azul (0,27%) valida a precisão metodológica frente às variações sazonais do bioma, confirmando a consistência dos dados hídricos e de sombreamento mesmo após o distúrbio ambiental.

Considerações Finais

Os resultados indicam que a Serra da Maria Comprida apresenta uma significativa capacidade de regeneração pós-fogo, evidenciada pela recuperação da classe de vegetação densa (Verde Escura), que retornou de 48,51% no período imediatamente após o incêndio para 65,69% em 2025, aproximando-se do patamar original de 69,80%. Contudo, a persistência de índices superiores de vegetação moderada (24,31%) e esparsa (8,42%) em relação ao período pré-incêndio (21,36% e 7,24%, respectivamente) sugere que a área ainda se encontra em estágios sucessionais intermediários, como vegetações secundárias. A redução da classe de solo exposto de 2,26% para 1,31% ratifica a recolonização das cicatrizes de queima por espécies pioneiras. Dessa forma, a análise de séries temporais de NDVI, validada pela estabilidade dos dados hídricos (estagnados em ~0,30%), constitui uma ferramenta de alta precisão para subsidiar ações de gestão ambiental. Este monitoramento auxilia órgãos públicos e instituições de resposta a desastres no planejamento de estratégias de recuperação e na identificação de áreas com menor vigor vegetativo, fundamentais para a prevenção de novos incêndios e a promoção da resiliência ecológica do bioma.

Referências Bibliográficas

BANDARA, S.; NAVARATNAM, S.; RAJEEV, P. (2023). Bushfire Management Strategies: Current Practice, Technological Advancement and Challenges. *Fire*, 6(11), 421. https://doi.org/10.3390/fire6110421.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Portaria nº 260, de 4 de dezembro de 2013. Estabelece procedimentos e critérios para a decretação de situação de emergência ou estado de calamidade pública pelos Municípios, Estados e pelo Distrito Federal. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2013. Disponível em: [https://www.gov.br/mdr/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/protecao-e-defesa-civil-sedec]. Acesso em: 30 abr. 2026.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. (2025). Anuário Estatístico do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro – 2024. Rio de Janeiro: CBMERJ.

Gois, G. d., Freitas, W. K. d., & Oliveira Júnior, J. F. d. (2020). Spatial-temporal of fire foci in the state of Rio de Janeiro, Brazil. Bioscience Journal, 36(3), 1008–1017. https://doi.org/10.14393/bj-v36n3a2020-47769

Khalil, R., Khan M., Hasan Y., Khan S. (2024). Supervised NDVI Composite Thresholding for Arid Region Vegetation Mapping. Engineering Technology & Applied Science Research, v. 14, n. 3, p. 14420–14427, 1 jun. 2024. https://www.researchgate.net/publication/381115226_Supervised_NDVI_Composite_Thresholding_for_Arid_Region_Vegetation_Mapping#read

Miranda, J., Cruz, J., Linhares, L., Salles, G., Lafetá, B (2024). Análise temporal e espectral do sensor modis no monitoramento da regeneração pós-incêndio no cerrado.

Qasimi, A. B., Isazade, V., Kaplan, G., & Nadry, Z. (2022). Spatiotemporal and multi-sensor analysis of surface temperature, NDVI, and precipitation using google earth engine cloud computing platform. Russian Journal of Earth Sciences, 1–12. https://doi.org/10.2205/2022es000812

Robinson, N., Allred, B., Jones, M., Moreno, A., Kimball, J., Naugle, D., Erickson, T., & Richardson, A. (2017). A Dynamic Landsat Derived Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Product for the Conterminous United States. Remote Sensing, 9(8), 863. https://doi.org/10.3390/rs9080863

SÁNCHEZ-PINILLOS, M.; DAKOS, V.; KÉFI, S. (2024). Ecological dynamic regimes: A key concept for assessing ecological resilience. *Biological Conservation*, 289, 110409.

SARI, F. (2022). Identifying anthropogenic and natural causes of wildfires by maximum entropy method-based ignition susceptibility distribution models. *Journal of Forestry Research*, 34(2), 355–371. https://doi.org/10.1007/s11676-022-01502-4.

SOS MATA ATLÂNTICA; INPE; FUNDAÇÃO SOS. (2024). Dinâmica do fogo na Mata Atlântica entre 1985 e 2023 e o caso de 2024.

TETTO, A. F.; BATISTA, A. C.; SOARES, R. V. (2012). Ocorrência de incêndios florestais no estado do Paraná, no período de 2005 a 2010. *Floresta*, 42(2), 391. https://doi.org/10.5380/rf.v42i2.22516.

YI, C.; JACKSON, N. (2021). A review of measuring ecosystem resilience to disturbance. *Environmental Research Letters*, 16(5), 053008. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdf09.

ANÁLISE DO USO E COBERTURA DO SOLO E SUA RELAÇÃO COM A DINÂMICA DE VAZÃO HIDROLÓGICA EM GUARAPUAVA – PR

1 Maria Fernanda Rocha Lara, 2 Dimaghi Schwamback
1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: mariafernandarochalara@gmail.com
2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, e-mail: dimaghis@professores.utfpr.edu.br

Palavras-chave: Uso do solo; Vazão hidrológica; Geoprocessamento.

Introdução

O uso e a ocupação do solo constituem fatores determinantes na dinâmica hidrológica de bacias hidrográficas, influenciando diretamente processos como infiltração, escoamento superficial e geração de vazão. Alterações na cobertura vegetal e na forma de ocupação antrópica tendem a modificar significativamente o comportamento hidrológico, sobretudo em função da redução da capacidade de infiltração e aumento do escoamento superficial (DUNNE; LEOPOLD, 1978; TUCCI, 2007).

Nesse contexto, a expansão urbana e as atividades agropecuárias desempenham papel central na transformação da paisagem e na reorganização dos fluxos hídricos. Em áreas urbanizadas, a impermeabilização do solo tende a intensificar o escoamento superficial e aumentar a ocorrência de eventos hidrológicos extremos, como enchentes e alagamentos (TUCCI, 2007).

No município de Guarapuava – PR, o uso do solo apresenta elevada heterogeneidade espacial, caracterizando-se por um padrão em mosaico, resultado da diversidade de usos e das condições geomorfopedológicas locais (THOMAZ, 2007).

Essa configuração implica respostas hidrológicas distintas, uma vez que diferentes tipos de cobertura apresentam capacidades variadas de infiltração e retenção de água.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo analisar as mudanças no uso e cobertura do solo no município de Guarapuava e sua relação com a dinâmica da vazão hidrológica ao longo do tempo, buscando compreender se as transformações na paisagem resultaram em alterações significativas no comportamento da vazão.

Área de Estudo

A área de estudo localiza-se no município de Guarapuava, região central do estado do Paraná, inserida na bacia hidrográfica do Rio Paraná. A região apresenta características do Terceiro Planalto Paranaense, com relevo suavemente ondulado e solos que influenciam diretamente os processos hidrológicos.

Essa área se desenvolve sobre basaltos da Formação Serra Geral, cujo mapeamento indica distintos compartimentos geomorfológicos que condicionam os padrões de drenagem e declividades do terreno, influenciando a distribuição das vertentes e a organização das bacias locais como a do Rio das Pedras, além de afetar o uso e ocupação do solo e os processos físico-hidrológicos, como resposta hidrológica e escoamento superficial sob diferentes coberturas da terra, aspectos que têm sido investigados em estudos de geomorfologia ambiental e dinâmica do uso da terra na região de Guarapuava-PR.

Tal análise integrada de relevo, solos e hidrografia constitui base fundamental para compreender as interações entre elementos naturais e pressões antrópicas, subsidiando análises mais consistentes sobre a dinâmica ambiental.

Para a análise hidrológica, foram utilizados dados provenientes da estação fluviométrica ETA – Guarapuava (código 65.809.000), pertencente à rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas (ANA), disponível por meio do sistema Hidroweb. A estação está localizada no Rio das Pedras, com área de drenagem de aproximadamente 314 km², sendo operada pelo Instituto Água e Terra do Paraná (IAT-PR), com medições de descarga líquida em operação contínua desde 1984.

Procedimentos Metodológicos

A análise do uso e cobertura do solo foi realizada por meio de técnicas de geoprocessamento em ambiente QGIS, utilizando dados provenientes da plataforma MapBiomas. Foram selecionados os anos de referência de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2024, de forma a permitir a avaliação da dinâmica temporal da paisagem em intervalos representativos ao longo das últimas décadas.

Inicialmente, foram obtidos os shapefiles correspondentes às classes de uso e cobertura do solo para cada um dos anos selecionados. A classificação das classes seguiu rigorosamente a legenda oficial do MapBiomas, mantendo-se a nomenclatura original de cada categoria analisada.

Posteriormente, os dados vetoriais foram processados individualmente para cada classe de uso do solo. Realizou-se a dissolução das feições, agrupando polígonos de mesma classe em unidades únicas, permitindo a obtenção de áreas totais por categoria. Em seguida, foram calculadas as áreas correspondentes a cada classe.

Após essa etapa, os dados foram reorganizados por ano de análise, sendo realizada a união das classes para recomposição do polígono total do município em cada período.

Área em km²					
Uso e Cobertura do solo	**1985**	**1995**	**2005**	**2015**	**2024**
Área Urbanizada	27.161,40	37.720,82	47.106,72	54.412,36	61.449,04
Café	122,80	118,08	807,68	291,97	284,04
Campo alagado e área pantanosa	66.439,25	66.284,41	64.504,03	63.510,01	69.238,84
Formação Campestre	-	-	7,93	0,15	60,30
Formação Florestal	1.381.223,73	1.270.137,37	1.235.049,07	1.232.893,82	1.207.289,52
Mosaico de uso	490.287,84	349.873,93	373.874,84	330.871,17	345.279,96
Outras áreas não vegetadas	6.617,82	1.845,95	2.947,43	2.719,74	4.760,38
Outras lavouras perenes	261,35	-	-	-	52,37
Outras lavouras temporárias	276.899,35	245.460,32	115.972,96	94.852,01	27.826,40
Pastagem	385.341,51	319.087,07	281.921,21	178.488,87	126.673,41
Rio, lago e oceano	12.298,71	13.130,78	9.825,21	10.758,24	10.302,07
Silvicultura	125.517,91	197.058,25	202.454,70	294.759,72	329.417,27
Soja	408.921,92	680.376,62	833.383,95	904.152,63	985.222,13

Tabela 01: Área total em km² referente a cada período de análise.
Fonte: Autores (2026).

Para a análise hidrológica, foi delimitada a bacia hidrográfica associada à área de estudo, com base na localização da estação fluviométrica selecionada. A escolha da estação considerou sua proximidade com a área urbana e sua representatividade na dinâmica local. A delimitação da bacia hidrográfica foi realizada em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software QGIS para análise e processamento dos dados espaciais. Após a delimitação, foi aplicado processo de suavização dos limites da bacia, deixando evidente apenas a área de interesse do estudo.

Os dados de vazão foram obtidos no sistema Hidroweb, sendo utilizadas séries históricas de vazão média mensal. A partir desses dados, foram calculadas as vazões médias anuais e a vazão acumulada ao longo do período de 1985 a 2024, referentes a bacia escolhida para análise. Por fim, aplicou-se regressão linear para análise da tendência temporal.

Resultados e Discussões

A análise dos dados de uso e cobertura do solo evidenciou transformações significativas na paisagem ao longo do período estudado. A área urbanizada apresentou crescimento expressivo, com aumento de aproximadamente 126% entre 1985 e 2024. A agricultura, especialmente a cultura da soja, também apresentou expansão significativa, com crescimento superior a 140%, assim como a silvicultura, com aumento superior a 160%.

Em contrapartida, áreas de pastagem apresentaram redução superior a 60%, indicando substituição por usos mais intensivos. Essas mudanças refletem a intensificação das atividades antrópicas e a reconfiguração da paisagem local.

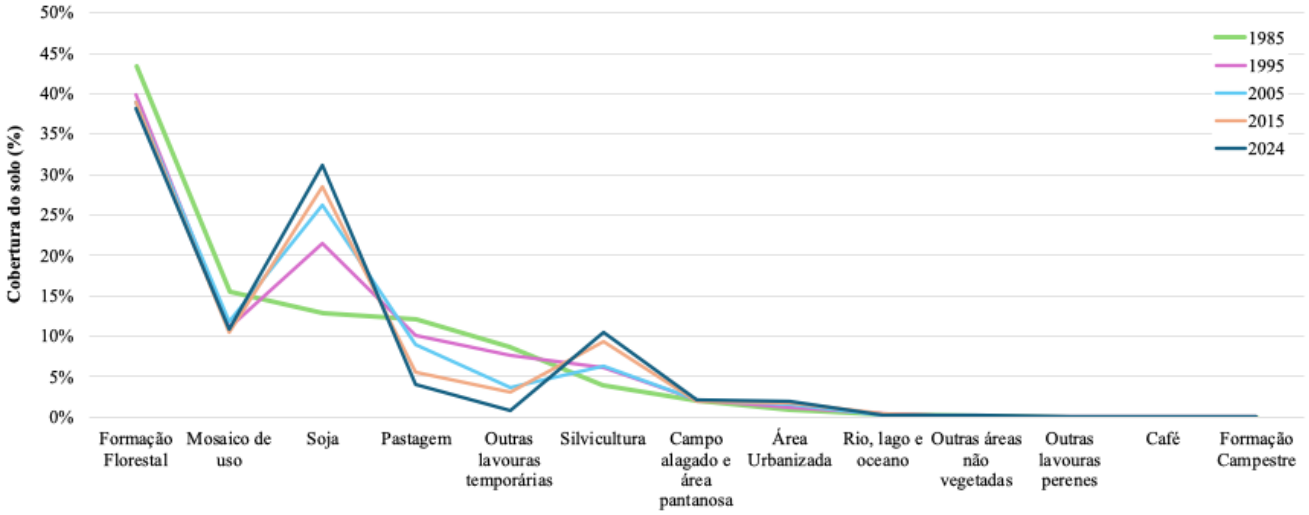


Figura 01: Porcentagem de área de cada categoria de uso e ocupação do solo em relação ao primeiro ano de surgimento de cada cobertura analisada.
Fonte: Autores (2026).

Apesar dessas transformações, a análise da vazão revelou comportamento distinto do esperado. A vazão acumulada apresentou crescimento contínuo e altamente linear ao longo do período, com coeficiente de determinação $R^2 = 0{,}9972$, indicando elevada estabilidade do sistema hidrológico.

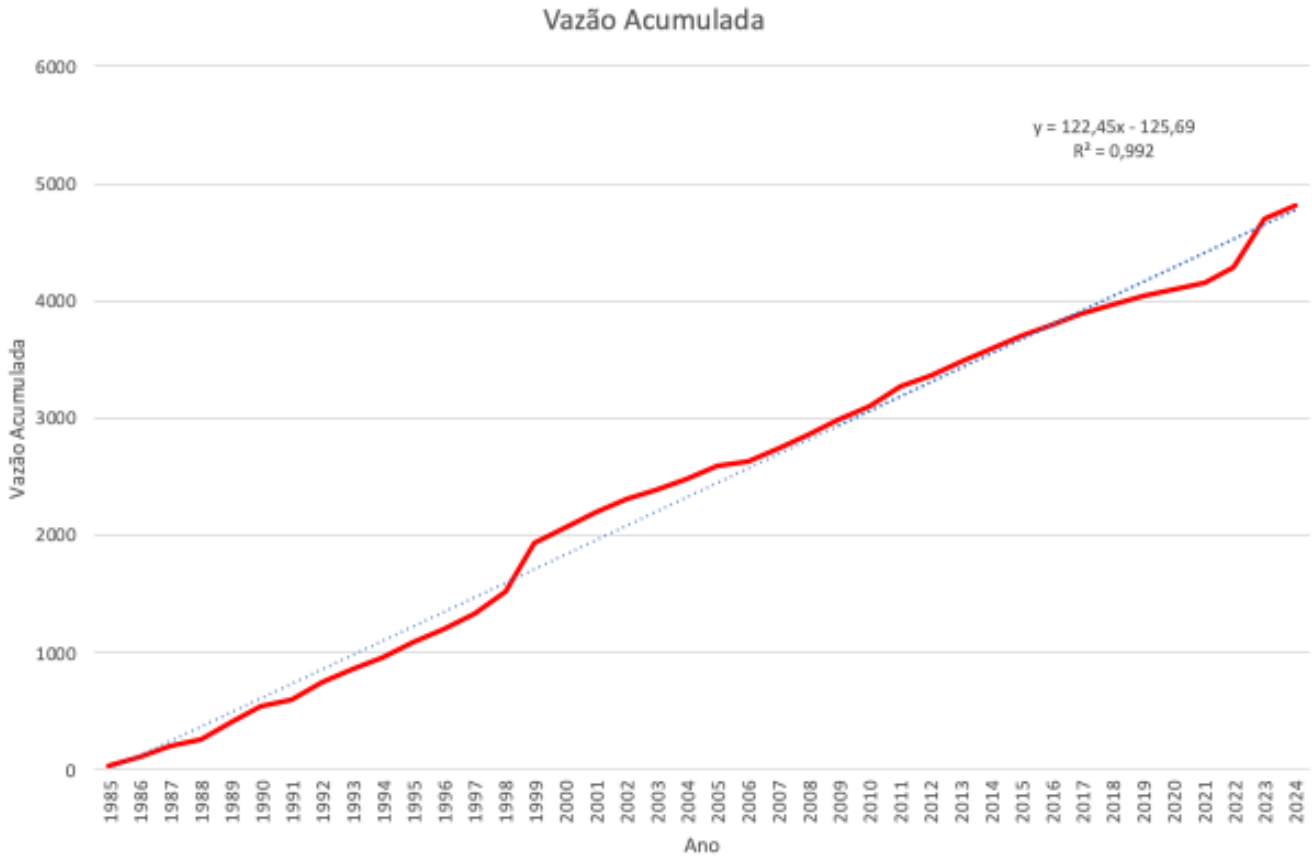


Figura 02: Gráfico de vazão acumulada anual referente à estação fluviométrica ETA – Guarapuava (código 65.809.000)
Fonte: Autores (2026).

Embora existam variações pontuais nas vazões médias anuais, o comportamento geral não apresenta oscilações abruptas, contrariando a expectativa teórica de aumento da variabilidade hidrológica com a intensificação do uso do solo (TUCCI, 2007).

Esse comportamento pode ser explicado por fatores como a presença de áreas ainda permeáveis, características geomorfológicas da bacia e influência do regime pluviométrico. Além disso, a escala temporal da análise contribui para a suavização de variações pontuais.

Os resultados indicam que a relação entre uso do solo e resposta hidrológica não é linear, sendo influenciada por múltiplas variáveis ambientais (CHRISTOFOLETTI, 1979).

Considerações Finais

Os resultados demonstram que, apesar das mudanças significativas no uso e cobertura do solo no município de Guarapuava, o comportamento da vazão hidrológica manteve-se relativamente estável ao longo do tempo.

Esse resultado evidencia a complexidade dos sistemas hidrológicos e sugere a presença de mecanismos naturais de regulação que contribuem para o equilíbrio da bacia.

Como desdobramento, recomenda-se a ampliação do estudo para outras bacias hidrográficas, a fim de verificar se o comportamento observado constitui um caso isolado ou um padrão recorrente. Essa abordagem pode contribuir para o aprimoramento do entendimento da relação entre uso do solo e dinâmica hidrológica, além de subsidiar estratégias de planejamento ambiental.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **HidroWeb** – Disponível em: https://www.snirh.gov.br/hidroweb. **Acesso em: [12/01/2026].**

CHRISTOFOLETTI, A. ***Geomorfologia***. São Paulo: Edgard Blücher, 1979.

DUNNE, T.; LEOPOLD, L. ***Water in environmental planning***. San Francisco: W. H. Freeman, 1978.

MACHADO, F. E.; VESTENA, L. R. **Evolução da mancha de inundação em Guarapuava**. *Revista de Geociências do Nordeste*, 2024.

MAPBIOMAS. **Plataforma MapBiomas: dados de uso e cobertura do solo do Brasil**. Disponível em: https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura. Acesso em: **[05/11/2025]**.

THOMAZ, E. L. **Dinâmica do uso da terra e degradação do solo na bacia do Rio Guabiroba – Guarapuava/PR**. *RA'E GA: O Espaço Geográfico em Análise*, 2007.

TUCCI, C. E. M. ***Hidrologia: ciência e aplicação***. Porto Alegre: UFRGS, 2007.

ESTUDO DE GRADIENTES DE TEMPERATURA ABAIXO E ACIMA DO DOSSEL NA FLORESTA AMAZÔNICA EM ÁREA FLORESTAL DE TERRA FIRME

1 Lívia Rosalem, 2 Livia S. Freire, 3 Hella van Asperen, 4 Cléo Quaresma Dias Júnior, 5 Jamil A. A. Anache, 6 Emerson Canato Vieira, 7 Edson Wendland, 8Susan Trumbore

1 INPA, Manaus, Brasi, email: liviarosalem@gmail.com; 2 ICMC-USP, São Carlos, Brasil;email: liviafreire@usp.br; 3 MPI-BGC, Jena, Alemanha, email: hasperen@bgc-jena.mpg.de ; 4 INPA, Manaus, Brasi, email: cleo.quaresma@inpa.gov.br; 5 EESC/USP, SãoCarlos, Brasil, email: jamil.anache@usp.br ; 6 UEMS, Dourados, Brasil, email: ecv13@uems.br; 7 EESC-USP, São Carlos, Brasil, email: ew@sc.usp.br

Palavras-chave: DTS; Projeto ATTO; Turbulência

Introdução

A floresta amazônica é um dos ecossistemas mais complexos e importantes do planeta, desempenhando papel fundamental no ciclo global do carbono e na regulação do clima regional e global. Compreender os processos de troca de energia e massa entre a floresta e a atmosfera, especialmente dentro e acima do dossel, é essencial para reduzir as incertezas em modelos climáticos (Huitema et al., 2026; Klink et al., 2020).

A temperatura do ar é uma variável central nesse contexto, pois influencia diretamente a densidade e a flutuabilidade das parcelas de ar, determinando a estabilidade atmosférica e a intensidade dos fluxos turbulentos. No entanto, medir com alta resolução os gradientes térmicos ao longo de perfis verticais extensos e perfis horizontais dentro da floresta representa um desafio metodológico significativo com instrumentação convencional (De Feiter et al., 2025; Doughty et al., 2023).

O Sensoriamento Distribuído de Temperatura por Fibra Óptica (FO-DTS) surge como uma alternativa inovadora para superar essa limitação, permitindo obter séries contínuas e densas de temperatura ao longo de cabos de fibra óptica com resolução espacial de centímetros a metros (Abdoli et al., 2023; Thomas et al., 2012). Tal capacidade é especialmente relevante no contexto do Observatório de Torre Alta da Amazônia (ATTO), sítio experimental de referência para o estudo da interação floresta–atmosfera na Amazônia (Andreae et al., 2015; Botía et al., 2020).

O estudo da estrutura térmica da camada abaixo do dossel e suas variações espaço-temporais em períodos diurno e noturno, usando a técnica FO-DTS, pode trazer informações importantes para a compreensão do transporte dos gases traços na floresta amazônica. Nesse contexto, foi realizada uma campanha no sítio ATTO aplicando a técnica de FO-DTS em perfis verticais abaixo e acima dossel na floresta Amazônica durante alguns dias em agosto de 2025. Com o monitoramento da temperatura em alta resolução espacial e temporal foi possível estudar a distribuição e a dinâmica desses gradientes de temperatura verticais (desde o solo até acima do dossel) e horizontais (abaixo do dossel) em área de floresta de Terra Firme na região central da Amazônia.

Material e Métodos

O estudo foi realizado no sítio experimental do projeto ATTO, parceria Brasil–Alemanha, localizada na Amazônia central. Uma campanha de campo foi conduzida entre 11 e 22 de agosto de 2025, na qual um sistema de monitoramento de temperatura FO-DTS foi usado. O equipamento de leitura usado foi Silixa XT-DTS (Silixa Ltd., Reino Unido) com cabo de fibra óptica multimodo de 0,9 mm de diâmetro externo, com núcleo de vidro de 50 µm (AFL, Alemanha)(Peltola; Lapo; Thomas, 2021).

A calibração foi realizada por meio de duas seções de banho térmico controlado (um tanque com água aquecida e outro com água resfriada com gelo), ambas com sensores de temperatura Pt100 como referência. A resolução temporal e espacial para as medidas foram de 1 minuto e de 0,25 m, respectivamente, e a precisão das medidas de temperatura de 0,01 °C (Hausner et al., 2011; Thomas et al., 2012).

Foram realizadas medições em três configurações: (1) perfil vertical na Torre Alta, com o cabo instalado até 50 m de altura; (2) perfil em estrutura bidimensional com fileiras de cabo até 4m de altura; e (3) perfil vertical adicional dentro da floresta.

Na configuração experimental 1, o intuito era obter informações sobre a variação de temperatura na camada logo acima do dossel, aproveitando a estrutura da torre alta, para obter dados da transição solo–dossel com maior continuidade. Como observações de temperatura foram obtidas continuamente durante alguns dias, foi possível verificar a variação térmica das camadas de rugosidade turbulenta, inclusive a variação do efeito de inversão térmica que possivelmente ocorre em períodos noturnos.

Na configuração experimental 2, o experimento teve como principal objetivo analisar a distribuição e variação espacial da temperatura dentro da floresta na camada mais próxima ao solo, isto é, entre 0,1 – 4,0 m de altura (Figura 1d e Figura 1e) . No mesmo local em que foi montada a estrutura bi-dimensional foram também obtidas medidas de fluxo de gases do solo (dióxido de carbono e metano) a partir de 5 colares simples de fluxo. Os colares foram dispostos no solo onde posteriormente foi instalada a estrutura bidimensional, com os quais foram obtidas medidas de fluxo em janelas espaçadas de tempo de 6-7 horas usando um analisador de gases modelo LI-7810 (Licor Inc., USA).

Na configuração experimental 3, o propósito era obter medições mais detalhadas no período noturno da transição solo–dossel na floresta. Por isso, uma estrutura do tipo andaime foi utilizada para obter medições de temperatura distribuída ao longo do perfil vertical do solo até 18 m de altura, próximo à Torre Alta (Figura 1f).

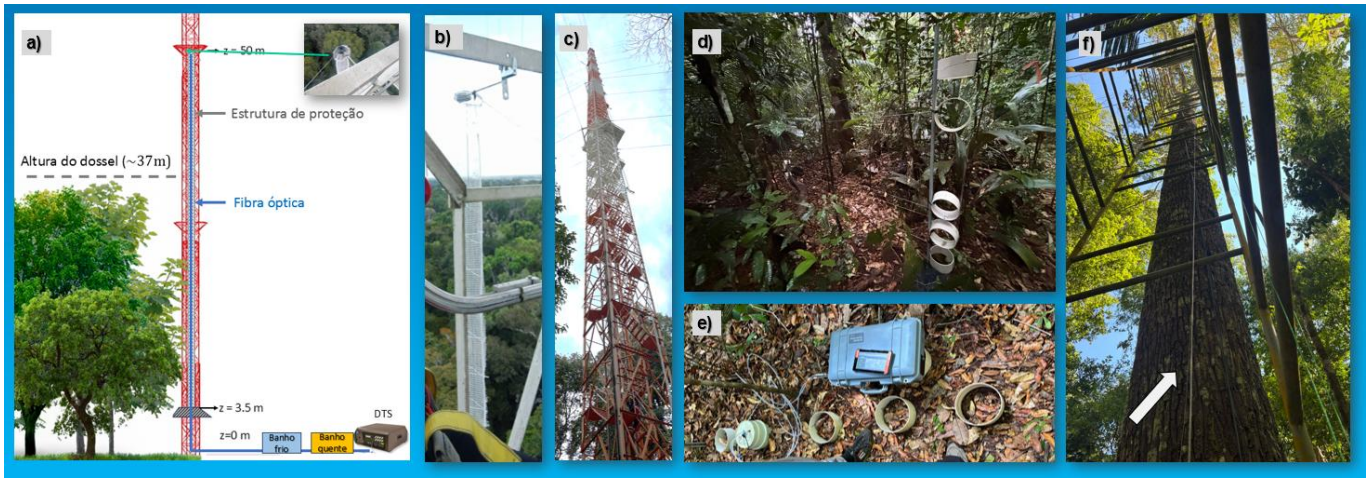


Figura 1. Desenho do esquema experimental usado na campanha no sítio ATTO de pesquisa na campanha de agosto de 2025, mostrando a) o caminho que o cabo óptico (linha azul) percorreu desde a saída do DTS, passando pelas seções de banho quente e frio, e seguindo depois para a torre; b) o cabo subia na Torre Alta protegido da radiação solar por uma estrutura de proteção com sombrite branco fixado à estrutura da própria torre, e retornava pelo mesmo caminho (c) na torre; d) A estrutura bidimensional (4m x 2m) com fileiras de cabos de fibra óptica em diferentes alturas, e) os colares de fluxo de gases organizados em fileira no solo onde a estrutura bidimensional foi erguida, e f) o cabo de fibra óptica posicionada para obtenção de perfis verticais até 18m de altura dentro da floresta.

Resultados e Discussão

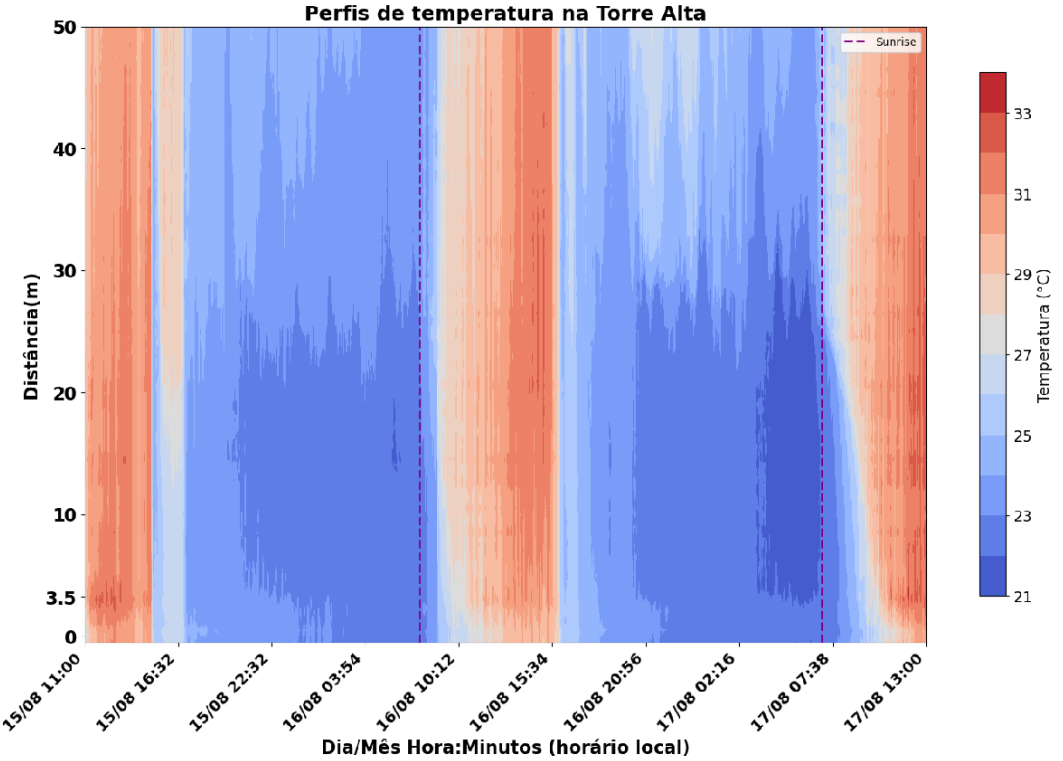
Os resultados da campanha realizada entre 11 e 22 de agosto de 2025 no sítio experimental ATTO, revelaram uma dinâmica complexa na interface solo-planta atmosfera. Durante a primeira fase da campanha com configuração experimental 1 (Figura 2), entre 15 a 17 de agosto, as temperaturas no perfil vertical na Torre Alta oscilaram entre 21,5 °C e 33,8 °C, apresentando uma média de 25,73 °C (± 3,29 °C). A resolução espacial de 0,25 m permitiu identificar que a maior variabilidade térmica ocorre na zona de transição entre o solo e o dossel, onde a estrutura da floresta modula a penetração da radiação solar durante o dia e o resfriamento radiativo durante a noite, estabelecendo um gradiente vertical contínuo que demonstra a camada de rugosidade turbulenta presente.

Os perfis verticais obtidos através dos experimentos 1 (perfis verticais de 50 m na Torre Alta) e do experimento 3 (perfis verticais de 18m dentro da floresta) possibilitaram o monitoramento detalhado do efeito de inversão térmica noturna. Observou-se um desacoplamento térmico no período noturno, permanecendo o ar dentro do dossel praticamente isolado da camada acima da copa. Esse fenômeno é muito importante para a interpretação dos fluxos de gases traço, pois a estabilidade térmica observada confirma o confinamento de escalares na camada abaixo do dossel, como também notado em outros estudos (Mendonça et al., 2025; Santos et al., 2016; Schilperoort et al., 2020). A possível continuidade espacial de dados obtidos pela técnica FO-DTS complementa as medições obtidas por sensores pontuais convencionais, possibilitando verificar hipóteses comumente admitidas, tal como a de não linearidade da transição térmica entre o solo e o topo do dossel (até cerca de 37 m) na floresta amazônica.

A resposta da floresta a eventos de precipitação foi nitidamente capturada durante dois episódios de chuva durante o primeiro experimento. No dia 15 de agosto (das 15:01 às 16:15) e no dia 16 de agosto (das 15:50 às 17:20), o perfil térmico exibiu um resfriamento abrupto e uma redistribuição quase imediata da temperatura no perfil vertical. Mais detalhadamente, no dia 15 de agosto a chuva ocorreu em um momento de alta disponibilidade de calor sensível no ambiente (linha vertical vermelha forte antes desse período na Figura 2). O mapa de calor (heatmap) na Figura 2 mostra que, imediatamente após o término da precipitação, a temperatura voltou a subir de forma consistente, restabelecendo os gradientes térmicos diurnos. Esse rápido reaquecimento sugere que a energia radiante remanescente foi suficiente para superar o resfriamento evaporativo inicial na interface atmosfera-dossel.

Em contrapartida, o evento do dia 16 de agosto apresentou uma dinâmica distinta devido à sua maior duração e proximidade com o pôr do sol. Como a disponibilidade de radiação solar foi drasticamente reduzida logo após o cessar da chuva, não houve aporte energético suficiente para promover o reaquecimento do perfil vertical. Consequentemente, a estrutura térmica permaneceu resfriada, facilitando a transição direta para o regime noturno de estabilidade e prolongando o efeito do resfriamento por várias horas após o evento.

A persistência de temperaturas mais baixas nas camadas inferiores, enquanto em altitudes afastadas do dossel (> 40m) ocorre o retorno mais rápido à temperaturas mais elevadas , pode ser justificada pelos processos de interceptação e sombreamento da cobertura vegetal. O volume de água retido nas superfícies da vegetação e na serrapilheira durante o evento de chuva consome calor sensível do ambiente para realizar a mudança de fase (evaporação), gerando um sumidouro de calor latente que retarda o aquecimento do ar sob o dossel. Aliado ao efeito de barreira física contra a radiação incidente, esse mecanismo garante que o interior da floresta apresente uma inércia térmica superior à atmosfera acima da copa, influenciando diretamente a estabilidade da camada dentro do dossel.



Assim, pode-se dizer que a chuva atuou como um agente de mistura mecânica e resfriamento evaporativo, modificando os gradientes térmicos desenvolvidos. Tais gradientes se desenvolvem durante períodos de aumento de turbulência, dito também período de "mistura" das camadas, que reduzem a estratificação térmica. Tais processos de mistura ocorrem normalmente no período diurno, sendo favorecido nas camadas próximas às superfícies devido ao aquecimento radioativo que adiciona energia para as trocas turbulentas.

Por fim, os resultados obtidos do monitoramento com as configurações experimentais 2 e 3 ainda estão sendo analisados. Em relação ao experimento 2 (configuração bidimensional), pode-se dizer que essa abordagem abre caminho para investigar possíveis caminhos preferenciais que a arquitetura da floresta pode criar, que poderiam favorecer o transporte de gases em condições desfavoráveis (por exemplo, de baixa turbulência).Quanto ao experimento 3, os resultados prévios indicam que no período noturno há uma diferença mais notável no gradiente térmico acima de 10m de altura, sendo observada maior variação térmica acima dessa altura. Apesar de ser apenas uma análise preliminar, essa observação indica necessidade de maior detalhamento e análise dos mecanismos de trocas turbulentas nessa altura.

A passagem de um evento de precipitação durante o período de medições permitiu observar a resposta rápida do perfil térmico à chuva, com resfriamento abrupto e redistribuição da estratificação. As medições bidimensionais dentro da floresta demonstraram a viabilidade da abordagem horizontal para capturar variações espaciais da temperatura em escala de metros, abrindo perspectivas para a identificação de heterogeneidades térmicas associadas à estrutura do dossel e ao microclima local.

Considerações Finais

A técnica FO-DTS demonstrou elevado potencial para o monitoramento contínuo e de alta resolução espacial e temporal dos gradientes de temperatura em ambientes florestais complexos como a Amazônia. Os resultados obtidos durante a campanha de agosto de 2025 no sítio ATTO confirmam a capacidade do método em capturar a estrutura térmica vertical e horizontal das camadas da interface solo-atmosfera, incluindo fenômenos de desacoplamento noturno e respostas a eventos meteorológicos. A análise de todos os experimentos da campanha ainda está sendo finalizada, sendo que futuramente tais resultados serão integrados aos dados da série histórica de medições micrometeorológicas e de gases de efeito estufa, visando avançar no entendimento dos mecanismos de transporte de calor e massa na floresta a fim de contribuir para o aprimoramento de modelos de fluxo e transporte de gases de efeito estufa.

Referências

ABDOLI, Mohammad *et al.* Toward quantifying turbulent vertical airflow and sensible heat flux in tall forest canopies using fiber-optic distributed temperature sensing. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 16, n. 3, p. 809–824, 14 fev. 2023.

ANDREAE, M. O. *et al.* The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO): overview of pilot measurements on ecosystem ecology, meteorology, trace gases, and aerosols. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 15, n. 18, p. 10723–10776, 28 set. 2015.

BOTÍA, Santiago *et al.* Understanding nighttime methane signals at the Amazon Tall Tower Observatory (ATTO). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 20, n. 11, p. 6583–6606, 5 jun. 2020.

DE FEITER, V. S. *et al.* Turbulent Exchange of {\textCO_2\ in the Lower Tropical Troposphere Across Clear-to-Cloudy Conditions. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 130, n. 19, p. e2025JD044231, 2025.

DOUGHTY, Christopher E. *et al.* Tropical forests are approaching critical temperature thresholds. **Nature**, v. 621, n. 7977, p. 105–111, set. 2023.

HAUSNER, Mark B. *et al.* Calibrating Single-Ended Fiber-Optic Raman Spectra Distributed Temperature Sensing Data. **Sensors**, v. 11, n. 11, p. 10859–10879, nov. 2011.

HUITEMA, Anna C. *et al.* **CO_2 and Heat exchange across the Nocturnal Canopy–Atmosphere interface in the Amazon rainforest**. Dynamics/Field Measurements/Troposphere/Physics (physical properties and processes), , 17 fev. 2026. Disponível em: <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2026/egusphere-2026-684/>. Acesso em: 24 fev. 2026

KLINK, Carlos A. *et al.* The Role of Vegetation on the Dynamics of Water and Fire in the Cerrado Ecosystems: Implications for Management and Conservation. **Plants**, v. 9, n. 12, p. 1803, dez. 2020.

MENDONÇA, Anne C. S. *et al.* Estimation of the nocturnal boundary layer height over the Central Amazon forest using turbulence measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 367, p. 110469, 15 maio 2025.

PELTOLA, O.; LAPO, K.; THOMAS, C. K. A Physics-Based Universal Indicator for Vertical Decoupling and Mixing Across Canopies Architectures and Dynamic Stabilities. **Geophysical Research Letters**, v. 48, n. 5, p. e2020GL091615, 16 mar. 2021.

SANTOS, Daniel M. *et al.* Temporal Scales of the Nocturnal Flow Within and Above a Forest Canopy in Amazonia. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 161, n. 1, p. 73–98, 1 out. 2016.

SCHILPEROORT, Bart *et al.* Decoupling of a Douglas fir canopy: a look into the subcanopy with continuous vertical temperature profiles. **Biogeosciences**, v. 17, n. 24, p. 6423–6439, 21 dez. 2020.

THOMAS, Christoph K. *et al.* High-Resolution Fibre-Optic Temperature Sensing: A New Tool to Study the Two-Dimensional Structure of Atmospheric Surface-Layer Flow. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 142, n. 2, p. 177–192, 1 fev. 2012.

GEOTECNOLOGIAS APLICADAS À SEGURANÇA DO TRABALHO: USO DE DRONES E SENSORIAMENTO REMOTO NA REDUÇÃO DE RISCOS EM ATIVIDADES DE AGRIMENSURA

1Thainan Tammy Tameirão, 2 Ângela Terumy Fushita, 3Mayke Santos de Oliveira, 4 Ana Sueling Alves Diniz, 5 Marcio Yukihiro Kohatsu

1 Universidade Federal do ABC, e-mail: thainantt@outlook.com; 2 Universidade Federal do ABC, e-mail: angela.fushita@ufabc.edu.br; 3 Universidade Federal do ABC, e-mail: Mayke.Oliveira@ufabc.edu.br; 4 Universidade Federal do ABC, e-mail: littleallanis@hotmail.com; 5 Universidade de São Paulo, e-mail: mykohatsu@usp.com;

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Drones; Segurança do trabalho

Introdução

As atividades de agrimensura e cartografia dependem de levantamentos de campo para produzir informações espaciais confiáveis, porém frequentemente são executadas em ambientes com declividade acentuada, vegetação densa, instabilidade do solo, áreas alagadas, locais de difícil acesso e trechos sujeitos a deslizamentos ou outros eventos adversos. Nessas condições, a presença física prolongada da equipe técnica amplia a exposição a riscos ocupacionais, como quedas, acidentes com veículos e equipamentos, contato com animais peçonhentos, exaustão térmica, perda de comunicação e dificuldade de resgate em situações emergenciais.

O avanço das geotecnologias, especialmente por meio do uso de drones e sensores remotos, permite uma mudança relevante na forma de planejar, executar e monitorar levantamentos topográficos. Ao possibilitar a coleta de dados geoespaciais por plataformas aéreas remotamente pilotadas, essas tecnologias reduzem a necessidade de deslocamento da equipe em áreas perigosas, ampliam a cobertura espacial dos dados e oferecem maior rapidez na geração de produtos cartográficos, como ortomosaicos, modelos digitais de terreno, nuvens de pontos, mapas de declividade e registros imagéticos de alta resolução.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo discutir a aplicação de drones e tecnologias de sensoriamento remoto como ferramentas de apoio à minimização de riscos em atividades de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, com enquadramento na área temática de Geotecnologias e Monitoramento Ambiental. A abordagem considera não apenas o ganho técnico na aquisição de dados, mas também a contribuição dessas ferramentas para a segurança do trabalho, a eficiência operacional, o monitoramento ambiental e a tomada de decisão em projetos que envolvem terrenos complexos ou potencialmente inseguros.

Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido a partir de pesquisa bibliográfica e análise técnico-descritiva sobre a aplicação de drones e sensoriamento remoto em levantamentos de campo, com ênfase na redução da exposição dos trabalhadores a riscos físicos. Foram considerados conceitos relacionados à Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, segurança ocupacional, monitoramento ambiental, fotogrametria, sensores embarcados e planejamento de missões com aeronaves remotamente pilotadas.

A pesquisa bibliográfica contemplou publicações acadêmicas, relatórios técnicos e normas de segurança aplicáveis ao trabalho de campo. Foram observadas, de modo especial, as diretrizes relacionadas ao uso de Equipamentos de Proteção Individual, à avaliação preliminar de riscos, ao planejamento de atividades externas, à comunicação entre membros da equipe e à elaboração de procedimentos preventivos. Também foram analisadas aplicações de sensores como câmeras RGB, câmeras multiespectrais, sensores infravermelhos e LiDAR, considerando suas finalidades, vantagens e limitações para obtenção de dados ambientais e topográficos.

A análise metodológica considerou as etapas usuais de um levantamento com drone: reconhecimento preliminar da área, definição dos objetivos técnicos, verificação das condições de segurança e meteorologia, planejamento do voo, escolha da altura e sobreposição das imagens, coleta dos dados, processamento fotogramétrico, geração dos produtos cartográficos e interpretação dos resultados. Essa sequência permite avaliar de que forma o uso de drones pode substituir ou reduzir incursões diretas em áreas críticas, preservando a qualidade dos dados e melhorando a organização das operações.

Também foram comparados, de forma qualitativa, os métodos tradicionais de levantamento com estação total, receptores GNSS e caminhamento de campo em relação aos levantamentos apoiados por drones. A comparação considerou segurança, produtividade, abrangência espacial, necessidade de retrabalho, potencial de monitoramento contínuo e custo-benefício. Embora o levantamento tradicional continue indispensável para diversas etapas de precisão e controle, a integração com plataformas aéreas amplia a capacidade de diagnóstico e reduz a exposição desnecessária da equipe.

Resultados e Discussão

A análise indica que o uso de drones representa uma alternativa eficiente para o reconhecimento de áreas de risco antes da entrada da equipe técnica. Em vez de iniciar o serviço por caminhamento direto em terreno desconhecido, a equipe pode realizar um voo preliminar para identificar acessos, obstáculos, linhas de drenagem, áreas alagadas, erosões, encostas instáveis, vegetação densa e interferências que possam comprometer a segurança da operação. Essa etapa melhora o planejamento e permite definir rotas mais seguras, pontos de apoio e medidas preventivas.

No campo da geotecnologia, a principal vantagem do drone está na capacidade de produzir uma visão integrada da área de estudo. A partir de imagens aéreas de alta resolução, é possível gerar ortomosaicos, modelos digitais de superfície, modelos digitais de terreno e curvas de nível, além de identificar feições ambientais relevantes para o monitoramento. Quando associados a sensores multiespectrais ou infravermelhos, os drones também permitem avaliar vegetação, umidade, estresse hídrico e alterações térmicas, contribuindo para análises ambientais e territoriais mais completas.

Em áreas com vegetação densa ou relevo acidentado, o LiDAR se destaca por permitir a obtenção de informações altimétricas de maior detalhamento, inclusive com capacidade de representar o terreno sob cobertura vegetal, a depender das condições de aquisição e processamento. Essa possibilidade é relevante para estudos de bacias hidrográficas, taludes, áreas suscetíveis a erosão e regiões sujeitas a movimentos de massa. Embora o custo do equipamento e do processamento seja mais elevado, a qualidade do dado pode justificar sua adoção em projetos nos quais a precisão altimétrica e a segurança operacional sejam decisivas.

Os resultados também demonstram que os drones contribuem para a redução da exposição ocupacional em situações nas quais o acesso físico ao local oferece risco superior ao benefício da medição direta imediata. Encostas com possibilidade de deslizamento, margens de corpos d'água, áreas pós-desastre, locais com contaminação, trechos com vegetação fechada e terrenos com baixa estabilidade podem ser avaliados inicialmente por sensoriamento remoto. Essa prática não elimina a necessidade de equipe qualificada em campo, mas torna a intervenção mais seletiva, planejada e segura.

Outro ponto relevante é o ganho de produtividade. Um levantamento aéreo planejado pode cobrir áreas extensas em menor tempo quando comparado ao método exclusivamente terrestre, especialmente em levantamentos de reconhecimento, acompanhamento de obras, monitoramento de áreas degradadas e avaliação de alterações ambientais. A rapidez na coleta e no processamento favorece decisões mais ágeis e reduz a necessidade de retorno ao campo, desde que o planejamento de voo, a calibração, os pontos de controle e a qualidade das imagens sejam adequadamente observados.

Do ponto de vista da segurança do trabalho, a adoção dessas tecnologias deve ser compreendida como medida de prevenção e não apenas como inovação operacional. O drone funciona como ferramenta de antecipação do risco, permitindo observar a área antes de expor a equipe. Essa lógica se aproxima dos princípios de gestão preventiva, pois prioriza a identificação dos perigos, a análise do ambiente e o controle da exposição. Assim, a tecnologia contribui para uma cultura de segurança, na qual o planejamento técnico passa a considerar simultaneamente precisão, produtividade e proteção à vida.

Entretanto, a utilização de drones exige responsabilidade técnica, capacitação e observância das regras aplicáveis. O operador deve conhecer limitações meteorológicas, autonomia da aeronave, interferências eletromagnéticas, restrições de voo, privacidade, segurança de terceiros e qualidade dos dados coletados. A simples aquisição do equipamento não garante bom resultado. É necessário integrar conhecimento de agrimensura, cartografia, geoprocessamento, segurança do trabalho e legislação aeronáutica, de modo que o produto final seja tecnicamente confiável e operacionalmente seguro.

A comparação entre métodos tradicionais e tecnologias remotas indica que a melhor estratégia é a integração. A estação total, o GNSS e demais instrumentos terrestres continuam fundamentais para controle, validação e medições específicas. O drone, por sua vez, amplia a percepção espacial, registra a totalidade da área e orienta a tomada de decisão. Quando combinadas, essas ferramentas fortalecem a qualidade técnica dos levantamentos e reduzem a exposição dos profissionais a deslocamentos repetitivos ou desnecessários em áreas de maior risco.

No monitoramento ambiental, os drones também oferecem potencial para avaliações periódicas, permitindo comparar imagens e modelos em diferentes datas. Essa aplicação é útil para acompanhar processos erosivos, recuperação de áreas degradadas, expansão de voçorocas, alterações em taludes, assoreamento, supressão vegetal irregular e impactos de eventos extremos. Com a repetição dos voos em intervalos planejados, é possível construir séries temporais e identificar tendências, o que reforça a importância das geotecnologias na gestão ambiental preventiva.

Como perspectiva futura, destaca-se a integração entre drones, sensoriamento remoto e inteligência artificial. Algoritmos de análise de imagem podem auxiliar na identificação automática de feições de risco, como trincas no terreno, mudança de cobertura vegetal, variação de umidade, focos erosivos e movimentação de massa. Essa integração pode apoiar sistemas de alerta precoce e ampliar a capacidade de resposta em áreas vulneráveis, aproximando a Engenharia de Agrimensura de uma atuação mais preditiva, sustentável e voltada à redução de danos.

Considerações Finais

O uso de drones e tecnologias de sensoriamento remoto apresenta elevada relevância para a Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, especialmente quando aplicado a levantamentos em áreas de risco e ao monitoramento ambiental. As geotecnologias permitem ampliar a coleta de dados, reduzir o tempo de campo, melhorar a visualização do território e diminuir a exposição dos trabalhadores a condições potencialmente perigosas.

Conclui-se que os drones não substituem integralmente os métodos tradicionais de agrimensura, mas os complementam de forma estratégica. Sua maior contribuição está na capacidade de antecipar diagnósticos, orientar a entrada segura da equipe, registrar a área com alta resolução e apoiar decisões técnicas mais precisas. Dessa forma, a aplicação dessas ferramentas fortalece tanto a qualidade dos produtos cartográficos quanto a segurança ocupacional.

A adoção dessas tecnologias deve ser acompanhada de planejamento, capacitação profissional, observância normativa e responsabilidade técnica. Quando bem integrados aos procedimentos de campo, os drones e sensores remotos contribuem para uma prática profissional mais segura, eficiente e sustentável, alinhada às demandas contemporâneas de monitoramento ambiental e inovação na engenharia.

Agradecimentos

A autora agradece à Faculdade Digital Descomplica, aos professores e profissionais da área de Engenharia de Agrimensura, Cartografia, Geotecnologias e Segurança do Trabalho que contribuíram para a construção dos conhecimentos utilizados neste estudo.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, J. P. Aplicação de drones na engenharia de agrimensura e segurança do trabalho. São Paulo: Editora Técnica, 2020.

BENTO, R.; SILVA, M. Tecnologias de sensoriamento remoto e segurança ocupacional. Revista de Engenharia e Segurança, v. 5, n. 2, p. 34-46, 2018.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora nº 6: Equipamento de Proteção Individual - EPI. Brasília, DF: MTE, 2023.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora nº 33: Segurança e saúde nos trabalhos em espaços confinados. Brasília, DF: MTE, 2023.

MOURA, L.; SANTOS, F. Agrimensura e tecnologia: mapeamento seguro com drones e sensores remotos. Engenharia e Tecnologia, v. 22, n. 3, p. 57-63, 2019.

PIROTTI, F.; GUARNIERI, A.; VETTORE, A. State of the art of ground and aerial laser scanning technologies for high-resolution topography of the earth surface. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 120, p. 72-84, 2016.

ANÁLISE DE NDVI EM UM FRAGMENTO FITOGEOGRÁFICO: TERRA RICA - PR

1 Elissandro Voigt Beier, 2 Elenara Beier Rehbein
1 Universidade Estadual de Maringá, e-mail: elissandrovoigt@gmail.com;
2 Universidade Federal de Pelotas, e-mail: beierelenara@gmail.com

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Regeneração fitogeográfica; NDVI

Introdução

O artigo propõe avaliar o ganho de vegetação utilizando o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) por meio do sensoriamento remoto. Esse procedimento tecnológico permite coletar dados de um local ou região específica sem contato direto com a área analisada, possibilitando a obtenção remota de informações.

O local de análise refere-se a um "enclave" elucidado por Ab'Sáber (2002b), designa, para a realidade local, uma mancha de ecossistemas típicos de outras províncias no caso a Savana e a Savana Estépica, respectivamente elementos de cerrado e caatinga compondo a fitogeografia do Morro Três Irmãos, porém, encravadas no interior de um domínio de natureza totalmente diferente, que para a região Noroeste consolida-se como a Floresta Estacional Semidecidual, inserido no município de Terra Rica no Paraná.

Esta situação de isolamento é uma realidade para a área dos Três morrinhos resultando em uma ilha florestal isolada na paisagem de pastagens, fazendeiros que não investem na conservação de suas terras e o adensamento populacional do entorno trazido pela reforma agrária são alguns dos desafios para o manejo conservacionista das duas áreas, agravando, problemas como o já citado isolamento, o fogo, a caça, o abate de grandes predadores que atacam animais domésticos e a provável invasão da UC por doenças ou por espécies exóticas (IF, 2006).

Ainda segundo o (IAP, 1997), a região está situada em sua totalidade na formação fitogeográfica Floresta Estacional Semidecidual Submontana, com uma decidualidade estacional na estação do ano menos favorável, o inverno, que para a região é caracterizado com menores índices pluviométricos com incursões de ar frio de pequena duração e atuação, correspondendo aos meses de inverno.

A adaptação ao ritmo estacional da umidade provoca queda das folhas, que pode ocorrer assincronicamente, onde algumas manchas de floresta perdem as folhas e outras não. O dossel pode ser decíduo, e o estrato, ou camada, inferior é perene (Conti, Furlan, op. cit., 2019).

Desta forma na Floresta Estacional ocorrerem mosaicos de espécies que perdem as folhas e espaços com espécies perenifólias figura 6, de acordo com a capacidade de retenção de água no solo, pois a perda das folhas é um processo para economizar a perda de água e investimento em energia para produção de biomassa, conforme Conti, Furlan, op. cit., 2019.

Aqui pretende-se entender a evolução da vegetação na área do Monumento natural Três irmãos, com base na informação de que a vegetação do parque foi alterada em virtude da implantação de pastagens e incidentes com queimadas é confirmada pela população que tem terras no parque (informação oral), atualmente grande parte do Morro Três Irmãos tem acesso restrito para bovinos que são criados em pastagens ao redor, com cercas e barreiras em muitas partes precárias e sem manutenção, impedindo o acesso destes animais ao Morro Três Irmãos, fato que foi imposto há aproximadamente 15 anos atrás.

Com o imageamento ao longo de um período de anos, levantar-se-á a evolução da vegetação a partir dos dados obtidos nas imagens e somado ao conhecimento histórico que regem sobre a história e o uso do solo no morro e no seu entorno pela população e pela gestão legislativa que serão levantados para elucidar todo o contexto resusltante.

Material e Métodos

A análise cronológica se deu por meio de duas diferentes abordagens. A primeira buscou o resgate histórico para a região de interesse, por meio de entrevistas e conversas não sistêmicas sobre a percepção paisagística do morro e seu entorno. Foram entrevistada uma moradora (aproximadamente 50 anos), os demais entrevistados eram funcionários de donos de terra ao redor do Morro e apresentavam permanência inferior a 15 anos, logo, não conseguiram fazer este resgate cronológico e espectral de alterações visíveis dos aspectos do Morro, haja visto que a partir da homologação como Parque Municipal ocorreram certas transformações restritivas a circulação bovina e diminuição dos incêndios intencionais.

A segunda linha de abordagem dialoga com a regressão espectral pretendida e disponível pelo imageamento satelital para a região, assim projeta-se uma leitura através do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), Índice de Vegetação da Diferença Normalizada a partir do período disponível.

Usou-se de uma cronologia de imageamento disponível por meio de imagens de satélite gratuitas e com resolução favorável, tanto para o quesito histórico como para a aplicação do índice NDVI para a região de estudo, com dados de imagens do espectro visível dos anos de 1985, 2010, 2016 e 2020, para a visualização da vegetação natural.

Para reconstrução e consequentemente entendimento da história fitogeográfica recente do Morro Três Irmãos foi utilizado NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) é um índice espectral utilizado para medir a presença, o vigor e a densidade da vegetação a partir de dados de sensoriamento remoto.

$$NDVI = (\frac{IVP - R}{IVP + R})$$

Ele é calculado pela razão entre a diferença e a soma da refletância registrada nas bandas do infravermelho próximo (IVP) e do vermelho (R):

Intervalo de valores

- Próximo de -1 a 0 → água, neve ou nuvens.
- 0 a 0,2 → áreas sem vegetação significativa (solo exposto, rocha, áreas urbanas).
- 0,2 a 0,5 → vegetação rala ou em estresse.
- 0,5 a 1,0 → vegetação densa e saudável (florestas, áreas agrícolas vigorosas).

Esta análise de NDVI foi aplicada em imagens de satélite a partir do ano de 1984, 2010, 2106 e 2020 e tratadas as informações são abstraídos os índices a respeito da fitossanidade da fitogeografia naquele instante de captura.
Considerando-se as duas formas de análises, seja no quesito histórico pelo espectro visível imageado como pela aplicação de outra imagem de satélite à análise de cobertura de vegetação pelo índice NDVI. Para tanto foram utilizadas as imagens com aspecto visível da vegetação.

Resultados e Discussão

Inicialmente, ressalta-se que a ação da prefeitura no cercamento da base do morro, visando impedir o acesso de bovinos e outros animais de criação, representou um marco fundamental no processo de recuperação da vegetação. Tal medida favoreceu a restauração natural da cobertura vegetal, reduzindo a pressão antrópica direta e permitindo o início da recomposição ecológica.

A análise de reconstituição vegetal pode ser confirmada por meio do acompanhamento de imagens de satélite ao longo de 30 anos, desde as primeiras imagens disponíveis com reduzida resolução espacial até imagens atuais com maior resolução e que evidenciam a reocupação fitogeográfica em espaços abertos, promovidos pelo desmatamento e intensificados pelo pastoreio.

O processo de adensamento vegetal ocorre ao longo da década de 2000, quando segundo informações dos moradores do entorno (informação oral), os animais são privados do acesso ao local e a vegetação apresenta um processo de recomposição natural, visto que não há documento ou informação referente ao processo de recolonização vegetal do parque por parte das autoridades ou proprietários das terras. A recomposição fitogeográfica pode ser reafirmada pela informação acima mencionada quanto ao imageamento espacial ao longo de aproximadamente 30 anos de evolução.

A primeira base de dados analisada corresponde a uma imagem do satélite Landsat 4, 5, capturada em dezembro de 1985, em banda visível. Adicionalmente, utilizou-se uma imagem de setembro de 1984 para aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), cujos valores variaram entre 0,078 e 0,612, imagem (1A). Esse intervalo correspondeu, respectivamente, a áreas de solo exposto e de maior adensamento vegetacional, indicando naquele momento um padrão de cobertura baixo, considerando-se que vegetação em condições saudáveis apresenta valores próximos a 1,0.

Um segundo momento da análise refere-se ao mês de maio de 2010, com imagens do espectro visível. O intervalo temporal de aproximadamente 25 anos justifica-se pela indisponibilidade de imagens gratuitas e com resolução adequada para o período. Neste recorte, constatou-se uma mudança significativa no patamar vegetacional da área, marcada pela expansão da cobertura florestal e pela redução das áreas de solo exposto observadas na década de 1980.

Apesar das diferenças sazonais, uma vez que a imagem de 1984 correspondeu ao mês de setembro (período de déficit hídrico), enquanto a de 2010 foi registrada em maio (período úmido), a comparação evidencia um processo de recolonização vegetal progressiva, associado à proteção legal e às condições ecológicas favoráveis à regeneração.

Ainda no mês de maio de 2010, no espectro visível a vegetação apresenta homogênea cobertura vegetal, exceto pela região do topo dos três morros, onde aparentemente pode ser observada a estrutura superficial do relevo, com pequenas manchas de solo visíveis. O índice de cobertura do solo passa de 0.078, ou seja, solo extremamente exposto para o índice de 0.250, diminuindo significativamente a parcela descoberta na comparação de 1984 com o ano de 2010, imagem (1B).

A imagem tratada pelo índice NDVI, para o mês de julho do mesmo ano reincide sobre a ideia de que as faces outrora descobertas, desde a base do morro até o topo, sendo a face Norte, leste e Sul não mais apresentam índices tão baixos de NDVI e em comparação a imagem de satélite igualmente apresentam uma sobreposição de áreas com menor índice, seja no visível como no índice de vegetação normalizada.

Quando analisamos a relação de densidade vegetacional, entre o mês de setembro de 1984, com o mês de julho de 2010, podemos observar um acréscimo do índice de NDVI, respectivamente passando de 0.0612 para 0.0622, o que repercute sobre a boa cobertura vegetal que ocorre região durante a toda da imagem para o processamento da mesma.

A sequência de análise ocorre para o período de julho de 2016, imagem 1C, passados 6 anos da última análise que aconteceu no mês de maio de 2010.

No espectro visível a paisagem permanece com a condição salutar visual, adensamento de muitas áreas e visível estruturação do dossel em muitos locais, sobressaindo um caráter de dossel emergente em diferentes parcelas da área como um todo.

Quando analisamos os índices na imagem tratada pelo NDVI, que parte de -0.049 com poucas parcelas de solo exposto dentro do perímetro do monumento, porém a captura total da imagem nos evidencia uma parcela de solo recentemente revolvido, aparentemente, pelo alto índice observado neste tratamento.

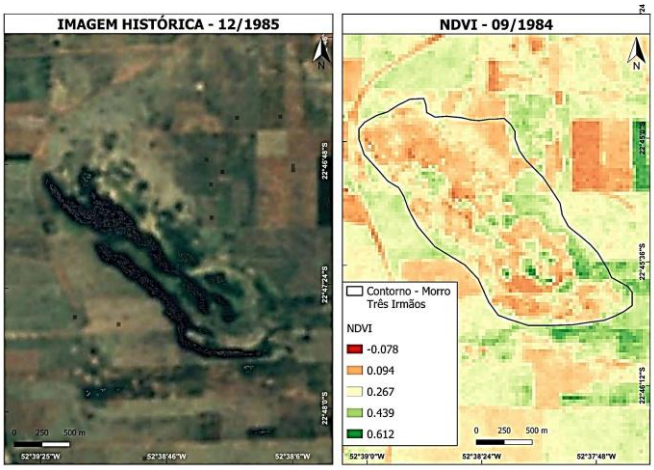


Imagem 1C: Carta de índice de vegetação NDVI em 1984 para o Morro Três Irmãos.
Fonte: Autor, 2020.

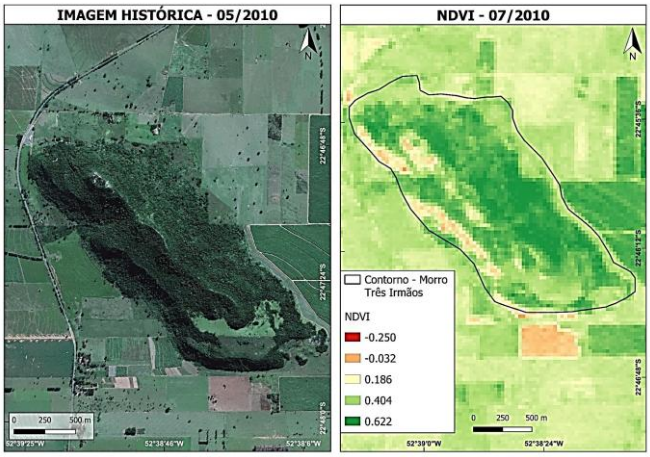


Imagem 1C: Carta de índice de vegetação NDVI em 2010 para o Morro Três Irmãos.
Fonte: Autor, 2020.

O inverso também é observado quando identificamos o índice 0,520, que caracteriza uma vegetação bastante salutar, porém índices melhores já foram observados nas análises anteriores. Atribui-se o supracitado índice ao período do ano, correspondendo ao mês de outubro, finalizando o período de déficit hídrico, e concomitante período de maior deciduidade da vegetação.

Seguindo a cronologia de análise, temos uma imagem de satélite para o mês de junho para o ano de 2020 e uma análise de NDVI para o mês de outubro de 2020, constando imagem 1D.

Nesta análise de satélite do espectro visível pode-se observar que permanecem expostas área com perturbação antrópica junto a pista de pouso livre, e o divisor de águas dos demais morros, com discreta aparência de solo exposto, assim como áreas do entorno com a característica antrópica.

Em análise aos índices de NDVI, que tem o índice de 0.040 para o recorte como um topo, porém prevalece o índice 0.186, com maior discrição de exposição de solos descoberto dentro do polígono, remetendo a uma homogeneidade estrutural da vegetação.

Quando analisamos a outra extremidade dos índices na imagem tratada pelo NDVI, temos o valor de 0.412, o que representa um índice inferior a série histórica encontrada para esta variável, sendo que na análise de 2016, para o mesmo mês foi observado o índice 0.520, podendo inferir para tanto que o resultado desta análise se baseia na sazonalidade da vegetação e na eventual sazonalidade climática.

Como nas demais análises conclui-se que houve um incremento na vegetação, esta por sua vez apresenta o caráter decidual o que pode inferir sobre a análise do índice de NDVI.

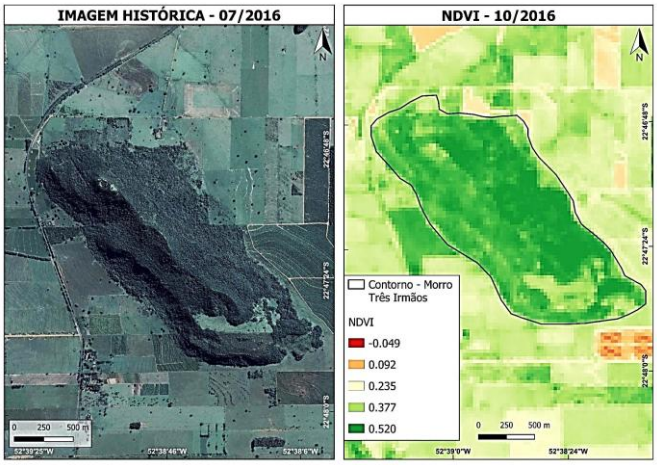


Imagem 1C: Carta de índice de vegetação NDVI em 2016 para o Morro Três Irmãos.
Fonte: Autor, 2020.

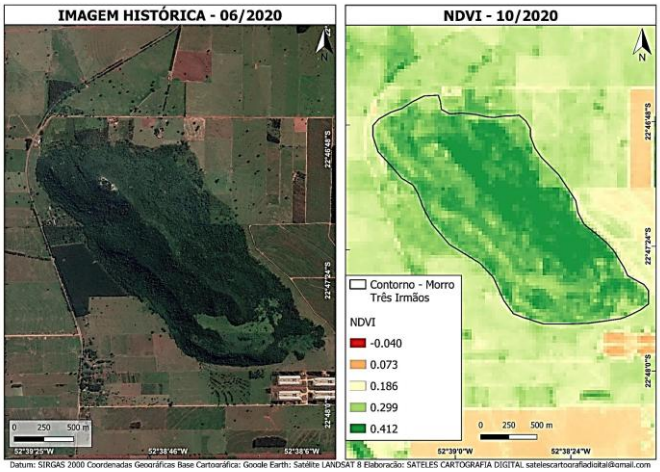


Imagem 1D: Carta de índice de vegetação NDVI em 2020 para o Morro Três Irmãos.
Fonte: Autor, 2020.

Na última análise que foi capturada em maio de 2021, observa-se o índice de vegetação bastante homogêneo na paisagem do monumento representados imagem 1E.

Aqui tem-se apenas a projeção da imagem com o índice NDVI para o período. Comparativamente com as imagens anteriores, passaram-se 37 anos desde a análise de 1984, até a mais recente, 2021.

A paisagem apresenta-se quase completamente fechada, com vegetação ocupando os diferentes níveis do terreno visualmente, recuperando-se ao longo dos anos de ocupação e monitoramento.

Quando analisamos os índices na imagem tratada pelo NDVI, que apresenta o índice 0.394 com muitas parcelas de solo coberto de vegetação dentro do perímetro do monumento. Não se chegou a uma conclusão definitiva quanto ao baixo índice no ano de 2021, sendo que era esperado um valor mais próximo a 1,000.

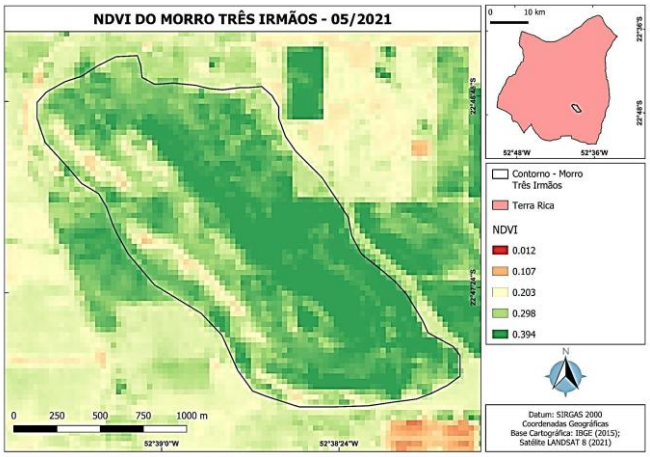


Imagem 1E: Carta de índice de vegetação NDVI em 2021 para a formação geomorfológica Morro Três Irmãos. Fonte: Autor, 2020.

Considerações Finais

Esta miríade fitogeográfica pode ser observa através do espectro temporal, quando foram realizadas amostras da cobertura vegetal por meio de imagens de satélite a partir do ano de 1984, 2010, 2016 e 2020 para o espectro visível, evidenciando uma significativa mudança na concentração e densidade da vegetação. Para confirmar a hipótese da mudança temporal nos índices fitogeográficos foi aplicado o NDVI, a partir do ano de 1984, 2010, 2016, 2020 E 2021 incidindo sobre a mudança visual positiva da vegetação, através da análise do aumento de área e da densidade das concentrações. Os resultados do NDVI evidenciam uma crescente na vegetação pelos índices que apresenta o menor valor (-0,078) representando solo exposto ou pouco coberto, apresentando valores negativos até o ano de 2021, quando o menor valor de NDVI parte de valor positivo (0,012), refletindo em menor partes de solo exposta e vegetação mais densa.

Esta situação corrobora com a informação informal coletada por meio de conversas com vizinhos e lindeiros do parque que pontuam um histórico de uso do solo para o monumento. Do período da ocupação de parcelas do morro pela agricultura (café), posteriormente criação de animais bovinos (pastagem) que se alimentavam da vegetação e causavam pisoteio impossibilitando a regeneração completa da vegetação, desta forma a recuperação da vegetação conseguirá êxito a partir da década de 2000 quando o espaço do monumento foi isolado do convívio de animais bovinos incidindo sobre aspectos positivos da mudança na vegetação. Através da análise pontual, pode-se observar e constatar que o crescimento e a maior densidade da vegetação não correspondem efetivamente a sua condição fitossanitária, sendo comum o domínio de cipós e epífitas de rápido crescimento e que comprometem a estruturação do dossel superior estruturado e de seus componentes em um ambiente vegetal saudável e equilibrado.

A área dos Três Morrinhos apresenta elevado grau de isolamento, configurando-se como uma ilha florestal inserida em uma matriz de pastagens, condição que compromete a conectividade ecológica, o fluxo gênico e a manutenção da biodiversidade. Esse cenário é agravado pela ausência de investimentos conservacionistas por parte de proprietários rurais e pelo adensamento populacional do entorno decorrente da reforma agrária, ampliando as pressões antrópicas sobre o fragmento. Ainda assim, a área demonstra significativa capacidade de regeneração natural, evidenciada pela recomposição da vegetação e pela permanência de espécies nativas de relevância ecológica, reforçando sua importância biológica como refúgio de biodiversidade e elemento fundamental para a manutenção do equilíbrio ambiental regional.

Agradecimentos

A CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão da bolsa de estudos durante todo o período do doutorado. Agradecimentos ao PGE UEM, meu programa de pós graduação EM Geografia pela Universidade estadual de Maringá-PR.

Referências Bibliográficas

AB'SÁBER, A. N. O Nordeste brasileiro e a Teoria dos Refugios. *Trópico e Meio Ambiente*, 24: 35-61. (Anais do Seminario de Tropicologia. Recife: Massangana), 2002b.

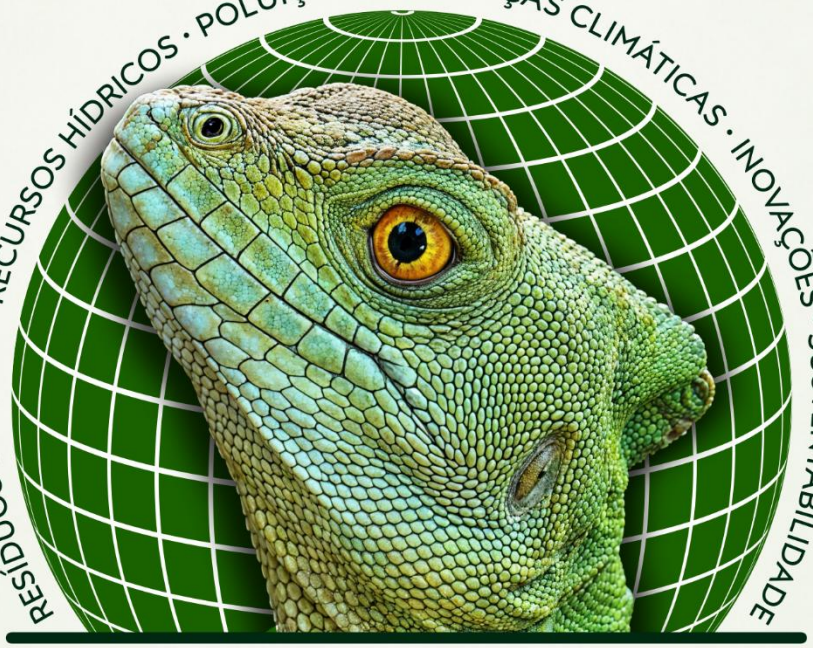
CONTI, J. B. e FURLAN, S. A. **Geoecologia: o clima, os solos e a biota. Geografia do Brasil.** Tradução, São Paulo: EDUSP, 2011 *in* ROSS, J. L. S. (ORG.) Geografia do Brasil. 6ª ed., 3ª reimpr. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, p. 549, 2019.

IAP – INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. **Plano de manejo da Estação Ecológica do Caiuá, Diamante do Norte-PR**. Paranavaí: IAP. 154p, 1997.

INSTITUTO FLORESTAL (IF). 2006. Parque Estadual do Morro do Diabo – Plano de Manejo. Coord. Editorial Helder Henrique de Faria e Andréa Soares Pires. Vários autores. Instituto Florestal. Secretaria de Estado de Meio Ambiente. Editora Viena. Santa Cruz do Rio Pardo, SP. 2006. 311 p.

ÁREA TEMÁTICA 11

GOVERNANÇA CLIMÁTICA E PARTICIPAÇÃO SOCIAL



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

EXPLORAÇÃO DE LÍTIO NA AMÉRICA LATINA FRENTE À TRANSIÇÃO ENERGÉTICA SUSTENTÁVEL: UMA REVISÃO DE ESCOPO SOBRE IMPACTOS ECONÔMICOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS EM BRASIL, ARGENTINA E CHILE

1 Beatricy Cardoso Vieira, 1 Carolina Silva Cuadrado Martin, 1 Gabriel Lobato Cardoso, 2 Iurii Ayaratovitch Farkhitov, 1 Yasmin Micheline Alves, 1 Luis E. Sánchez, 1 Juliana Siqueira-Gay, 2 Andre Cezar Zingano
[1]Universidade de São Paulo (USP)
[2]Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Palavras-chave: Lítio; Transição energética; Sustentabilidade.

Resumo

A transição energética global tem ampliado significativamente a demanda por lítio, mineral estratégico para tecnologias de baixo carbono. Nesse contexto, países da América Latina, especialmente Brasil, Argentina e Chile, assumem papel relevante no fornecimento desse recurso. Este trabalho tem como objetivo analisar como a expansão da extração de lítio nesses países se relaciona com dinâmicas econômicas, sociais e ambientais em escala local, no âmbito da transição energética. Para isso, realizou-se uma revisão de escopo baseada em artigos científicos e documentos institucionais publicados entre 2019 e 2025. Os resultados indicam que o aumento da demanda internacional por lítio tem intensificado transformações territoriais, ampliado pressões sobre recursos naturais e evidenciado desafios de governança, demonstrando que a expansão da mineração associada à transição energética pode aprofundar vulnerabilidades históricas em territórios produtores.

Introdução

A transição energética global busca reduzir a dependência de combustíveis fósseis como estratégia para mitigação do aquecimento global. A mudança para uma matriz energética de baixo carbono pressupõe inovação tecnológica. (UNITED NATIONS, 2022). Entretanto, a expansão das energias renováveis também amplia a demanda por minerais críticos, exigindo maior governança ambiental e social ao longo de suas cadeias produtivas (UN DESA, 2025).

Segundo a International Energy Agency (IEA, 2024), minerais críticos são fundamentais para tecnologias de baixo carbono, e a dinâmica crescente desse mercado demanda maior transparência e disponibilidade de informações sobre seus impactos socioambientais. Entre esses minerais, destaca-se o lítio devido à sua ampla aplicação em baterias para veículos elétricos, associada à elevada capacidade de armazenamento energético e viabilidade econômica. Nesse contexto, o lítio consolida-se como recurso estratégico para a transição energética, apresentando uma das maiores projeções de crescimento da demanda até 2040.

Na América do Sul, entre os principais produtores de lítio destacam-se Chile, Argentina e Brasil, com produções estimadas em 41.400, 15.193 e 8.630 toneladas em 2023, respectivamente (ANM, 2024). Argentina e Chile integram o chamado Triângulo do Lítio, onde a exploração ocorre predominantemente em salares, enquanto no Brasil as reservas concentram-se em depósitos de rochas ígneas do tipo pegmatito (FLEXER; GUTIÉRREZ, 2020; ZORZAL et al., 2024).

Apesar da relevância global do lítio para a transição energética, a exploração mineral nesses países insere-se em dinâmicas historicamente associadas ao modelo extrativista latino-americano, caracterizado por concentração econômica e elevada intensidade ambiental (SILVA et al., 2025). Tal cenário evidencia a dualidade de um ciclo produtivo capaz de promover crescimento econômico, mas também de reproduzir desigualdades socioambientais típicas de economias dependentes da exportação de commodities (MARCIANO, 2005).

Diante desse contexto, o objetivo geral deste trabalho é analisar a relação entre a expansão da extração de lítio na América Latina e seus impactos locais frente à crescente demanda global associada à transição energética. Como objetivos específicos, busca-se identificar e discutir os impactos econômicos, sociais e ambientais da exploração de lítio no Brasil, Argentina e Chile.

Contexto

O Chile é considerado o líder em produção de lítio na América latina. A extração de lítio no Chile ocorre por meio do bombeamento de salmouras subterrâneas ricas em lítio, que passam por extensas etapas de evaporação solar destinadas à concentração do mineral (CABELLO, 2021). A produção chilena foi estimada em aproximadamente 41.400 toneladas em 2023 e 49.000 toneladas em 2024, consolidando o país entre os maiores produtores globais do mineral (USGS, 2025). A Sociedad Química y Minera de Chile (SQM), principal operadora no Salar do Atacama, tem anunciado a expansão da capacidade produtiva e investimentos no refino e na produção de hidróxido de lítio, indicando a intensificação das operações ao longo da cadeia de valor.

A Argentina consolidou-se como um dos principais produtores globais de lítio. A exploração comercial teve início na década de 1990, com o projeto do Salar del Hombre Muerto, e intensificou-se a partir de 2010, com a entrada de capitais estrangeiros, aliada a políticas provinciais de incentivo à mineração (FLEXER; BINI; GUTIÉRREZ, 2018; KUHAR et al., 2024). Atualmente, projetos como Olaroz e Cauchari-Olaroz encontram-se em fase produtiva, atraindo novos investimentos e

consolidando uma cadeia técnico-industrial voltada à exploração, ao processamento e à exportação do mineral (USGS, 2024; IEA, 2023). O método predominante de extração baseia-se no bombeamento de salmouras subterrâneas para grandes bacias de evaporação solar, onde ocorre a concentração progressiva do lítio na solução, seguida por etapas de precipitação e conversão química em carbonato ou hidróxido de lítio (FLEXER; GUTIÉRREZ, 2020).

No Brasil, o lítio ocorre predominantemente em pegmatitos graníticos, associado a minerais como espodumênio, lepidolita, ambligonita e petalita (ANM, 2024). As principais províncias pegmatíticas com potencial exploratório localizam-se nos estados da Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará, Bahia, Minas Gerais e São Paulo (ANM, 2024). Segundo o United States Geological Survey (USGS, 2025), o país detém a sétima maior reserva mundial de concentrados de lítio, com destaque para as jazidas situadas no Vale do Jequitinhonha, nos municípios de Araçuaí e Itinga, em Minas Gerais (SEDE, 2020). Nesse contexto, foi lançado, em 2023, o projeto denominado "Vale do Lítio", que marca a recente intensificação das atividades minerárias e o crescente interesse econômico pelo setor.

Aspectos econômicos, sociais e ambientais das atividades minerais

Do ponto de vista econômico, Jenkins e Yakovleva (2006) destacam o papel da responsabilidade corporativa na mineração, discutindo desde a necessidade de geração de riqueza capaz de compensar a exaustão dos recursos minerais até a crescente pressão de investidores por transparência e redução de riscos reputacionais e financeiros. Nesse sentido, a dimensão econômica integra-se à sustentabilidade, uma vez que empresas precisam manter crescimento produtivo, assegurar empregos e reinvestir receitas para garantir a viabilidade de longo prazo das regiões mineradoras.

Sob a perspectiva social, Franks et al. (2014) argumentam que a atividade minerária promove a reorganização de territórios e modos de vida, aumentando o risco de conflitos entre empresas e comunidades locais.

Paralelamente, Tost et al. (2020) indicam que os impactos ambientais associados à mineração frequentemente atuam como catalisadores de conflitos, são percebidas pelas comunidades como ameaças à integridade dos ecossistemas e à qualidade de vida. Destacam-se, nesse contexto, a poluição, a competição pelo uso da água e alterações em sistemas hidrológicos.

Materiais e Métodos

Este trabalho adotou uma revisão de escopo (*scoping review*), baseada na estrutura metodológica proposta por Arksey e O'Malley (2005). O procedimento seguiu cinco etapas principais: (1) identificação da questão de pesquisa; (2) identificação dos estudos relevantes; (3) seleção dos estudos; (4) extração dos dados; e (5) compilação, síntese e apresentação dos resultados.

A questão norteadora do estudo foi: quais são os principais impactos locais, nos âmbitos econômico, social e ambiental, da exploração de lítio na América Latina, com foco no Brasil, Argentina e Chile?

A coleta de dados foi realizada entre outubro e dezembro de 2025, considerando publicações do período de 2019 a 2025. Foram consultadas as bases científicas Scopus, Google Scholar e o Portal de Periódicos da CAPES. A busca incluiu artigos acadêmicos, relatórios técnicos institucionais, documentos governamentais, teses e dissertações. Utilizaram-se combinações de palavras-chave em português e inglês, incluindo: "*lithium mining*" AND "social impacts"; "lithium extraction" AND "*environmental impacts*"; "mineração de lítio" AND "impactos sociais"; "*lithium*" *AND* "*Brazil OR Argentina OR Chile*".

Os critérios de inclusão contemplaram estudos que abordassem a exploração de lítio com foco em impactos econômicos, sociais ou ambientais nos países analisados. Foram excluídos trabalhos voltados exclusivamente a aspectos tecnológicos de baterias, estudos centrados em outros países ou minerais, análises estritamente jurídicas e documentos sem relação direta com os objetivos da pesquisa. A seleção ocorreu em três etapas: leitura de títulos, análise de resumos e avaliação do texto completo.

A análise dos dados seguiu abordagem qualitativa, organizada por eixos temáticos (econômico, social e ambiental) e por país (Brasil, Argentina e Chile). Essa estrutura permitiu identificar similaridades e singularidades entre os contextos nacionais, considerando suas particularidades geológicas, institucionais e territoriais, em consonância com o objetivo de compreender os impactos locais associados à expansão da mineração de lítio no contexto da transição energética.

Análises e Discussões

Chile

Uma análise do período entre 1997 e 2017 no Salar de Atacama evidenciou significativa expansão das operações de mineração de lítio, com taxa média anual de crescimento de 7,07%. Esse avanço esteve associado a alterações ambientais relevantes. Indicadores obtidos por sensoriamento remoto demonstraram degradação ambiental progressiva, redução da cobertura vegetal e da umidade do solo, além do aumento das temperaturas superficiais diurnas, indicando que a expansão das áreas de extração está relacionada à intensificação de processos de aridez e perda de qualidade ecológica (LIU; AGUSDINATA; MYINT, 2019).

Sob a perspectiva socioambiental, Roche et al. (2024) realizaram uma Avaliação do Ciclo de Vida Social (S-LCA) da produção de lítio no Salar de Atacama, examinando seus efeitos sobre o uso da água e as comunidades locais. Embora a empresa Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) mantenha projetos sociais e iniciativas de sustentabilidade, persistem desafios relacionados ao acesso à água doce, à disponibilidade de recursos agrícolas, à migração populacional e ao respeito aos direitos indígenas. A escassez hídrica emerge como o aspecto mais sensível, uma vez que parte das comunidades associa a redução da disponibilidade de água à intensificação da extração de salmouras, recurso que possui também valor cultural e espiritual. Os autores destacam, portanto, a necessidade de maior transparência, equidade na distribuição de benefícios e fortalecimento do diálogo com comunidades indígenas.

Em resposta a esses desafios, a Estrategia Nacional del Litio (CHILE, 2023) estabelece uma política de Estado voltada ao fortalecimento da governança pública e ao desenvolvimento sustentável da cadeia produtiva, reconhecendo o lítio como recurso estratégico para a transição energética global. O plano propõe um modelo de participação estatal majoritária em parceria com o setor privado, a criação de uma Empresa Nacional do Lítio e a adoção de padrões mais rigorosos de transparência, sustentabilidade e participação social.

Na dimensão social, a estratégia busca enfrentar o histórico de assimetrias territoriais por meio da ampliação da participação das comunidades locais e dos povos indígenas, incorporando instrumentos de consulta prévia, livre e informada, em consonância com a Convenção 169 da OIT e o Acordo de Escazú. O documento também prevê mecanismos de redistribuição de receitas, incluindo royalties e fundos sociais destinados aos municípios próximos às operações minerárias, com o objetivo de fortalecer a legitimidade institucional da atividade extrativa.

Do ponto de vista econômico, o modelo chileno procura ampliar a captura de renda mineral por meio de parcerias público-privadas e da criação de instrumentos fiscais contracíclicos, como fundos soberanos voltados ao financiamento de investimentos sociais, tecnológicos e industriais. A estratégia também incentiva a agregação de valor, estimulando etapas de refino, produção de precursores e manufatura associada à cadeia de baterias, buscando posicionar o país como referência internacional em mineração de baixo carbono.

A criação do Instituto Público de Tecnologia e Pesquisa em Lítio e Salares reforça essa orientação, ao integrar produção científica, inovação tecnológica e sustentabilidade ambiental. O instituto deverá atuar em cooperação com universidades e centros de pesquisa, promovendo o desenvolvimento de modelos hidrogeológicos e ecológicos, além de avanços em processos de extração, reciclagem e economia circular do lítio. Dessa forma, a estratégia chilena sinaliza uma tentativa de superar padrões estritamente extrativistas por meio da articulação entre governança estatal, ciência e desenvolvimento tecnológico

Argentina

No âmbito econômico, a Argentina possui uma das maiores reservas globais de lítio, exploradas predominantemente por meio de salmouras, método considerado de menor custo operacional e que tem atraído investimentos estrangeiros, além de impulsionar melhorias em infraestrutura e serviços regionais. Esse modelo favoreceu a rápida expansão produtiva e a inserção do país no mercado internacional de lítio (HEREDIA; MARTINEZ; SURRACO URTUBEY, 2020). Contudo, a limitada promoção de políticas voltadas ao desenvolvimento de tecnologias para produção de cátodos e ânodos mantém o país concentrado nas etapas iniciais da cadeia de suprimento, restritas à extração e processamento primário do mineral.

O carbonato de lítio produzido localmente apresenta características típicas de commodity, com baixo valor agregado quando comparado aos produtos da cadeia, como componentes eletroquímicos e baterias. Esses produtos são majoritariamente desenvolvidos em países como China, Coreia do Sul e Japão, onde se concentra a maior parcela da geração de riqueza associada ao chamado “triângulo das baterias”. Em nível local, observa-se ainda distribuição desigual dos benefícios econômicos, na qual os custos ambientais permanecem concentrados nas comunidades próximas às áreas de extração, enquanto os ganhos financeiros se concentram nas empresas mineradoras, frequentemente gerando expectativas de desenvolvimento apenas parcialmente concretizadas (DÍAZ PAZ et al., 2023).

Do ponto de vista social, a atividade minerária contribui para a geração de empregos diretos e indiretos, promove capacitação profissional e dinamiza economias locais, resultando em melhorias pontuais nas condições de vida da população (OBAYA; MURGUÍA; SÁNCHEZ-LÓPEZ, 2021). Entretanto, a extração em salmouras tem sido associada à redução da disponibilidade de água doce em regiões áridas, comprometendo o abastecimento hídrico das comunidades locais e intensificando conflitos socioambientais, conforme discutido na literatura sobre governança minerária (DÍAZ PAZ et al., 2025).

No contexto ambiental, análises de ciclo de vida indicam que a mineração em salmouras é frequentemente considerada menos intensiva em água quando comparada à mineração convencional de rocha dura. Contudo, evidências empíricas demonstram impactos significativos em escala local. No projeto Fénix, por exemplo, a pegada hídrica estimada foi cerca de 70 vezes superior ao consumo anual de água de aproximadamente 2.100 habitantes de Antofagasta de la Sierra, elevando riscos para ecossistemas sensíveis, como os humedales da Puna (DÍAZ PAZ et al., 2025). Dessa forma, os benefícios ambientais locais da extração permanecem limitados, enquanto sua principal contribuição ocorre no suporte à transição energética em escala global (HEREDIA; MARTINEZ; SURRACO URTUBEY, 2020).

Brasil

No contexto da transição energética, o Vale do Jequitinhonha configura-se como um caso representativo de como a expansão da mineração de lítio pode reorganizar economias locais e redefinir dinâmicas territoriais. A região, historicamente marcada por baixos indicadores socioeconômicos, elevada pobreza e limitada diversificação produtiva, passou a receber fluxos crescentes de investimentos e a estabelecer novas conexões com o mercado global (FJP, 2017; GONÇALVES; MARINHO; SOARES, 2025). Contudo, esse processo ocorre simultaneamente ao surgimento de tensões sociais persistentes, incluindo conflitos territoriais, pressões sobre comunidades tradicionais e manutenção de condições de trabalho desiguais em determinados segmentos da cadeia mineral (MURGUÍA et al., 2024; ZORZAL et al., 2025).

Dados da Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais indicam investimentos previstos de aproximadamente R$ 5 bilhões, com projeções que podem alcançar R$ 30 bilhões até 2030 na cadeia produtiva do lítio no Vale do Jequitinhonha (SEDE-MG, 2023). Entretanto, a intensificação do ciclo minerário também amplia a dependência econômica regional, expondo os municípios à volatilidade típica de economias baseadas em commodities, caracterizadas por ciclos de expansão e retração associados às oscilações do mercado internacional (ZORZAL et al., 2025).

A atividade minerária já contabiliza cerca de 1.200 empregos diretos e 3.600 indiretos, com remunerações superiores à média regional (TELES; OLIVEIRA, 2025). Em 2023, municípios como Araçuaí e Itinga registraram exportações expressivas, alcançando US$ 236 milhões e US$ 69 milhões, respectivamente, consolidando-se como polos emergentes do setor (GONÇALVES; MARINHO; SOARES, 2025). Por outro lado, evidências recentes apontam riscos socioambientais relevantes: aproximadamente 3.200 pessoas residentes próximas aos afluentes do rio Jequitinhonha apresentaram exposição a alumínio acima dos limites considerados aceitáveis, com 68% dos indivíduos analisados apresentando concentrações superiores a 3 µg/L em análises plasmáticas (SILVA et al., 2025; ATSDR, 2008).

A estrutura produtiva do lítio no Brasil insere-se em um padrão histórico de extrativismo caracterizado pela exportação de matérias-primas com baixo valor agregado e limitada verticalização industrial no território nacional (MARCIANO, 2025). Assim, apesar de deter recursos estratégicos para a transição energética, o país enfrenta o desafio de evitar a reprodução de um modelo de dependência baseado na exportação de commodities, conforme discutido por Ebraim Neto (2020) e Gudynas (2012).

Do ponto de vista ambiental, mais de 80% das amostras de água e 60% dos solos analisados no Vale do Jequitinhonha apresentaram níveis elevados de alumínio, indicando a suscetibilidade dos ecossistemas locais à intensificação da atividade extrativa (SILVA et al., 2025).

A crescente demanda global por lítio tende, portanto, a aprofundar contradições entre os benefícios associados à transição energética e os impactos locais da mineração, especialmente em territórios historicamente vulneráveis. Nesse contexto, observa-se o avanço de práticas de monitoramento ambiental, fortalecimento de normas de licenciamento e debates sobre modelos de desenvolvimento capazes de articular exploração mineral e sustentabilidade territorial (FJP, 2017; GONÇALVES; MARINHO; SOARES, 2025; MARCIANO, 2025).

Critério	Chile	Argentina	Brasil
Econômico	Líder, busca agregar valor;	Forte exportador, cadeia primária;	Crescimento recente, baixa agregação de valor
Social	Conflitos indígenas, maior participação social;	Benefícios desiguais, conflitos hídricos	Empregos, conflitos locais;
Ambiental	Degradação e escassez hídrica;	Alto uso de água	Poluição e pressão local

Tabela 1: Síntese comparativa dos impactos da mineração de lítio no Chile, Argentina e o Brasil.

Evolução da produção de lítio frente à demanda da transição energética

Ao longo da última década, o mercado global de lítio passou por um processo contínuo de expansão, impulsionado principalmente pela eletrificação dos transportes, pela adoção de políticas climáticas internacionais e pela redução dos custos das tecnologias de baterias. Desde meados da década de 2010, o *Mineral Commodity Summaries* do USGS já indicava que o setor de baterias havia se tornado o principal destino do lítio, respondendo por aproximadamente um terço da demanda mundial, proporção que continuou a crescer ao longo dos anos seguintes (ANM, 2016).

O Gráfico 1 apresenta a evolução da produção de lítio (em toneladas) e da participação no mercado mundial de Brasil, Argentina e Chile entre 2014 e 2024. Observa-se crescimento produtivo nos três países, ainda que acompanhado por oscilações na participação relativa no mercado global. O Chile mantém-se como principal produtor ao longo de todo o período, com expansão mais acentuada a partir de 2020, refletindo a consolidação de sua infraestrutura produtiva e posição estratégica no mercado internacional. A Argentina apresenta trajetória relativamente estável até 2022, seguida por crescimento mais acelerado, associado à ampliação de investimentos e à entrada de novos projetos em operação. O Brasil, por sua vez, parte de níveis produtivos reduzidos, mas demonstra aceleração significativa a partir de 2018, intensificada entre 2022 e 2024, indicando inserção recente, porém crescente, na cadeia global do lítio.

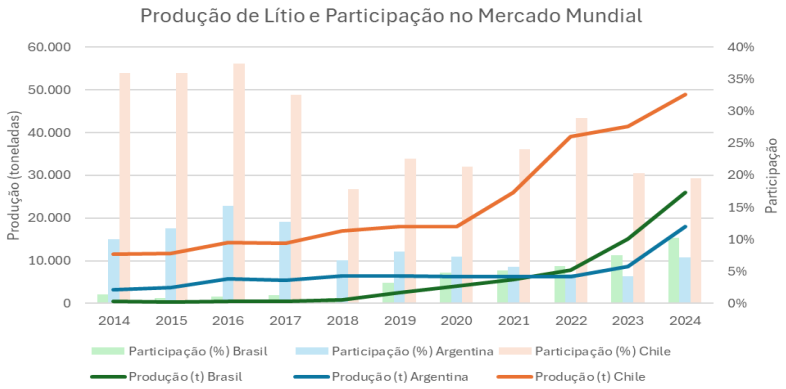


Gráfico 1: Produção de Lítio e Participação no Mercado Mundial da Argentina, Chile e Brasil. (Fonte: Sumérios de Minerais 2016 - 2025, ANM)

Entre 2015 e 2024, os preços dos compostos de lítio registraram sucessivos picos decorrentes da combinação entre oferta limitada, aumento da demanda e expectativas de escassez futura (ANM, 2015–2024). Paralelamente, mais de vinte países anunciaram cronogramas para a eliminação progressiva de veículos movidos a combustíveis fósseis, impulsionando investimentos no setor automotivo elétrico (ANM, 2021). Projeções da International Energy Agency indicam que a demanda por lítio pode multiplicar-se entre 13 e 51 vezes até 2035, impulsionada por metas globais de neutralidade climática e redução de emissões (IEA, 2021).

Conforme discutido por Franks et al. (2014) e Tost et al. (2020), a mineração não constitui apenas um processo técnico de extração, mas um agente estruturante de transformações territoriais profundas. Nesse contexto, a expansão produtiva associada à transição energética intensifica pressões sobre recursos hídricos, ecossistemas e condições de saúde das populações locais, ao mesmo tempo em que amplia conflitos relacionados à distribuição desigual de riscos e benefícios.

Sob a perspectiva econômica, embora o lítio seja frequentemente apresentado como oportunidade estratégica de inserção no mercado global, a literatura demonstra que, na ausência de mecanismos robustos de governança, transparência e agregação de valor, há risco de reprodução de padrões históricos de dependência extrativista e fragilização econômica regional (JENKINS; YAKOVLEVA, 2006; GUDYNAS, 2012). Assim, o crescimento produtivo observado não representa automaticamente desenvolvimento sustentável, evidenciando as contradições inerentes à expansão dos minerais críticos no contexto da transição energética global

Comentários Finais

A expansão da demanda global por lítio, impulsionada pela transição energética, tem consolidado a mineração desse mineral como atividade estratégica, promovendo transformações econômicas e territoriais significativas nos países produtores. Entretanto, os resultados desta revisão de escopo demonstram que o crescimento produtivo não ocorre de forma homogênea nem necessariamente associado à sustentabilidade local, sendo acompanhado por pressões sociais e ambientais crescentes, especialmente sobre recursos hídricos, ecossistemas e comunidades locais em Brasil, Argentina e Chile.

A análise comparativa evidencia que tais impactos assumem configurações distintas conforme os contextos nacionais. Enquanto o Chile busca fortalecer mecanismos de governança estatal e agregação de valor, a Argentina permanece concentrada nas etapas iniciais da cadeia produtiva, e o Brasil apresenta inserção recente marcada por rápida expansão produtiva e desafios relacionados à dependência exportadora. Essas diferenças indicam que os efeitos da mineração de lítio são fortemente condicionados por fatores institucionais, tecnológicos e territoriais, e não apenas pela disponibilidade geológica do recurso.

Nesse sentido, a sustentabilidade da cadeia do lítio depende menos da expansão da produção em si e mais da capacidade de implementação de mecanismos eficazes de governança, participação social, inovação tecnológica e agregação de valor econômico. Na ausência desses elementos, a exploração do mineral tende a reproduzir padrões históricos de extrativismo e desigualdade, mesmo quando vinculada a objetivos globais de mitigação das mudanças climáticas.

Por fim, o estudo evidencia a necessidade de políticas públicas que integrem planejamento territorial, transparência institucional e fortalecimento da participação comunitária, bem como de futuras pesquisas que aprofundem análises comparativas sobre governança mineral e justiça socioambiental no contexto da transição energética. Assim, a mineração de lítio apresenta-se simultaneamente como oportunidade estratégica e desafio socioambiental, exigindo abordagens que conciliem segurança energética global e sustentabilidade local.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade de São Paulo (USP), ao Prof. Luis E. Sánchez e à Profa. Juliana Siqueira-Gay pelas contribuições no âmbito da formação acadêmica que subsidiaram a realização deste trabalho, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e à FLE.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). *Sumário mineral 2016*. Brasília: ANM, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). *Sumário mineral 2017*. Brasília: ANM, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). *Sumário mineral: lítio – 2018*. Brasília: ANM, 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). *Sumário mineral: lítio – 2019*. Brasília: ANM, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). *Sumário mineral: lítio – 2020*. Brasília: ANM, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). *Sumário mineral: lítio – 2021*. Brasília: ANM, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). *Sumário mineral: lítio – 2022*. Brasília: ANM, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). *Sumário mineral: lítio – 2023*. Brasília: ANM, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). *Sumário mineral brasileiro: lítio – 2024*. Brasília: ANM, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). *Sumário mineral brasileiro 2025*. Brasília: ANM, 2025.

ANLAUF, A. Lithium in Argentina: governance and resource politics. *The Extractive Industries and Society*, v. 7, n. 4, p. 1235–1243, 2020.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY (ATSDR). *Toxicological profile for aluminum*. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, 2008.

BATISTA, F. O.; MOREIRA JR., H. As exportações de minério de ferro brasileiro para a China: atração de investimentos externos e impactos para o território e sociedade paraense. *Fronteira: Revista de Iniciação Científica em Relações Internacionais*, v. 21, n. 41, p. 179–203, 2022.

BEARD, K. W. *Linden's handbook of batteries*. 5. ed. Columbus, OH: McGraw-Hill Education, 2019.

CABELLO, J. Lithium brine production, reserves, resources and exploration in Chile: an updated review. *Ore Geology Reviews*, v. 128, p. 103883, 2021.

CHILE. *National lithium strategy – for Chile and its people*. Santiago: Government of Chile, 2023. Disponível em: https://www.gob.cl/litiumnacional/. Acesso em: 1 nov. 2025.

COMPANHIA BRASILEIRA DE LÍTIO (CBL). *Relatório institucional 2020*. Belo Horizonte: CBL, 2020.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG). *Plano de desenvolvimento da distribuição 2023–2027*. Belo Horizonte: CEMIG, 2023.

DÍAZ PAZ, W. F. et al. Lithium mining, water resources, and socio-economic issues in northern Argentina: we are not all in the same boat. *Resources Policy*, v. 81, p. 103288, 2023.

DÍAZ PAZ, W. F. et al. The water footprint of lithium extraction technologies: insights from environmental impact reports in Argentina's salt flats. *Heliyon*, v. 11, n. 4, p. e42523, 2025.

EBRAIM NETO, M. C. *Causas e efeitos dos ciclos econômicos brasileiros: uma revisão bibliográfica*. 2020. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Econômicas) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, 2020.

EUROBAT. *Battery innovation roadmap 2035: white paper innovation roadmap*. 2024. Disponível em: https://www.eurobat.org/wp-content/uploads/2024/07/white-paper-innovation-roadmap-2024-web-version.pdf. Acesso em: 29 out. 2025.

FAN, X. et al. Battery technologies for grid-level large-scale electrical energy storage. *Transactions of Tianjin University*, v. 26, n. 2, p. 92–103, 2020.

FERREIRA, R.; GUIMARÃES, L. *Impactos socioeconômicos da mineração de lítio no Vale do Jequitinhonha*. Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro, 2024.

FLEXER, V.; BINI, R.; GUTIÉRREZ, A. Lithium recovery from brines: a vital raw material for energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 97, p. 188–197, 2018.

FLEXER, V.; GUTIÉRREZ, A. Lithium extraction from the Argentinean Puna: processes and challenges. *Minerals*, v. 10, n. 2, p. 1–15, 2020.

FRANKS, D. M. et al. Conflict translates environmental and social risk into business costs. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, n. 21, p. 7576–7581, 2014.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO (FJP). *Nota técnica n. 3/2025: a exploração do lítio e as possibilidades para o desenvolvimento do Vale do Jequitinhonha*. Belo Horizonte: FJP, 2017.

GARCIA, A. C. *Estudo do beneficiamento de espodumênio em pegmatitos do Vale do Jequitinhonha*. Belo Horizonte: UFMG, 2017.

GARCIA, I. J. *Lítio – sumário mineral*. Belo Horizonte: DNPM, 2017.

GLOBALDATA. *Production of lithium in Argentina, 2021–2029*. 2025. Disponível em: https://www.globaldata.com/data-insights/mining/production-of-lithium-in-argentina-1092531/. Acesso em: 10 dez. 2025.

GOMES, A. A. Estudo de caso: planejamento e métodos. *Nuances: Estudos sobre Educação*, v. 15, n. 16, 2008.

GONÇALVES, F.; MARINHO, L.; SOARES, P. *Desenvolvimento populacional e socioeconômico nos municípios com potencial de exploração do lítio no Vale do Jequitinhonha em Minas Gerais*. Belo Horizonte: FJP, 2025.

GUDYNAS, E. O novo extrativismo progressista na América do Sul: teses sobre um velho problema sob novas expressões. In: _____. *Enfrentando os limites do crescimento: sustentabilidade, decrescimento e prosperidade*. p. 303–318, 2012.

GUDYNAS, E. *Extractivismos: ecología, economía y política de un modo de entender el desarrollo y la naturaleza*. 3. ed. Montevideo: CLAES, 2021.

GUTIÉRREZ, G.; RUIZ-LEÓN, D. Lithium in Chile: present status and future outlook. *Materials Advances*, v. 5, n. 20, p. 7850–7861, 2024.

HEREDIA, F.; MARTINEZ, A. L.; SURRACO URTUBEY, V. The importance of lithium for achieving a low-carbon future: overview of the lithium extraction in the "Lithium Triangle". *Journal of Energy & Natural Resources Law*, v. 38, n. 3, p. 213–236, 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Global critical minerals outlook 2021*. Paris: IEA, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Global critical minerals outlook 2023*. Paris: IEA, 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *The role of critical minerals in clean energy transitions*. Paris: IEA, 2024.

JENKINS, H.; YAKOVLEVA, N. Corporate social responsibility in the mining industry: exploring trends in social and environmental disclosure. *Journal of Cleaner Production*, v. 14, n. 3–4, p. 271–284, 2006.

KUHAR, L. et al. Lithium in the Lithium Triangle: geology, extraction and market dynamics in Argentina. *Resources Policy*, v. 86, p. 103–129, 2024.

LAI, X. et al. Comprehensive assessment of carbon emissions and environmental impacts of sodium-ion batteries and lithium-ion batteries at the manufacturing stage. *Journal of Cleaner Production*, v. 423, p. 138674, 2023.

LINDEN, D.; REDDY, T. B. *Linden's handbook of batteries*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

LITHIUM ARGENTINA AG. *Lithium Argentina reports fourth quarter and full year 2024*. Buenos Aires: Lithium Argentina, 2025. Disponível em: https://investors.lithium-argentina.com/news-releases/news-release-details/lithium-argentina-reports-fourth-quarter-and-full-year-2024. Acesso em: 10 dez. 2025.

LIU, W.; AGUSDINATA, D. B.; MYINT, S. W. Spatiotemporal patterns of lithium mining and environmental degradation in the Atacama Salt Flat, Chile. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 80, p. 145–156, 2019.

MA, Y. et al. LCA/LCC analysis of starting-lighting-ignition lead-acid battery in China. *PeerJ*, v. 6, p. e5238, 2018.

MARCIANO, F. R. *Caminhos para uma estratégia política de exploração sustentável do lítio no Brasil*. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) – Universidade de Brasília, Brasília, 2025.

MIAO, Y. et al. Current Li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. *Energies*, v. 12, n. 6, p. 1074, 2019.

MURGUÍA, D. I.; BASTIDA, A. E. The elephant in the mine: why voluntary sustainability standards are insufficient to ensure responsible mining. *The Extractive Industries and Society*, v. 19, p. 101485, 2024.

NASCIMENTO, M.; BRAGA, P. F. A.; SOARES, P. S. Potential impact of primary lithium produced in Brazil on global warming. *Mining*, v. 5, n. 3, p. 45, 2025.

OBAYA, M.; LÓPEZ, A.; PASCUINI, P. Curb your enthusiasm: challenges to the development of lithium-based linkages in Argentina. *Resources Policy*, v. 70, p. 101912, 2021.

PAZ, W. F. D. et al. Lithium mining, water resources, and socio-economic issues in northern Argentina: we are not all in the same boat. *Resources Policy*, v. 81, p. 103288, 2023.

PEIRÓ, L. T.; HERRERO, F.; AYRES, R. Direct lithium extraction: technologies and challenges. *Journal of Cleaner*

Production, v. 420, p. 138–152, 2024.

PEÑALOZA-PACHECO, L.; TRIANTAFYLLOU, V.; MARTÍNEZ, G. The non-green effects of "going green": local environmental and economic consequences of lithium extraction in Chile. *Journal of Environmental Economics and Management*, v. 136, 2023.

PETERS, J. et al. Life cycle assessment of sodium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, v. 9, n. 5, p. 1744–1751, 2016.

ROCHE, L. et al. S-LCA of lithium mining in Chile and its potential impacts on water and the local community. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 30, n. 6, p. 1201–1228, 2025.

RODRIGUES, A.; PADULA, M. *Indústria 4.0 e tecnologias sustentáveis no setor mineral*. São Paulo: Editora Técnica, 2017.

SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS (SEDE-MG). Governo de Minas firma mais uma parceria para gerar empregos, renda e desenvolvimento no Vale do Lítio. Belo Horizonte: SEDE-MG, 21 jul. 2023.

SILVA, C. et al. Exposure of aluminum in the Araçuaí-Itinga lithium pegmatite district, Minas Gerais, Brazil: contaminant and toxicological effects on populations established nearby mining activities. *Journal of the Geological Survey of Brazil*, v. 8, n. 2, p. 77–91, 2025.

SISTEMA DE INFORMAÇÃO DE MINERAÇÃO DE MINAS GERAIS (SIMINE). *Processos minerários de requerimento de pesquisa*. Belo Horizonte: SIMINE, 2018.

SVAMPA, M. *Neo-extractivismo na América Latina: da dependência ao consenso dos commodities*. São Paulo: Elefante, 2019.

TELES, R.; OLIVEIRA, M. *Mineração de lítio no Vale do Jequitinhonha: empregos, infraestrutura e regulação*. Belo Horizonte: FJP, 2025.

TOST, M. et al. Ecosystem services costs of metal mining and pressures on biomes. *The Extractive Industries and Society*, v. 7, n. 1, p. 79–86, 2020.

UNITED NATIONS. *Renewable energy – powering a safer and prosperous future*. United Nations, 2022.

U. S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). *Mineral commodity summaries 2024: lithium*. Reston, VA: USGS, 2024.

U. S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). *Mineral commodity summaries 2025: lithium*. Reston, VA: USGS, 2025.

VENTURA, M. M. O estudo de caso como modalidade de pesquisa. *Revista SoCERJ*, v. 20, n. 5, p. 383–386, 2007.

VERA, M. L. et al. Environmental impact of direct lithium extraction from brines. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 4, n. 3, p. 149–165, 2023.

VIELER, C. et al. Advances in direct lithium extraction technologies for brine resources. *Hydrometallurgy*, v. 219, p. 105–276, 2023.

VOSS, P. et al. Benchmarking state-of-the-art sodium-ion battery cells – modeling energy density and carbon footprint at the gigafactory-scale. *Energy & Environmental Science*, v. 18, n. 17, p. 8104–8129, 2025.

YIN, R. K. *Estudo de caso: planejamento e métodos*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

YUDHISTIRA, R.; KHATIWADA, D.; SANCHEZ, F. A comparative life cycle assessment of lithium-ion and lead-acid batteries for grid energy storage. *Journal of Cleaner Production*, v. 358, p. 131999, 2022.

ZORZAL, C. et al. An overview of lithium mining in Brazil: from artisanal extraction to large-scale production. *Resources Police*, v. 100, p. 105440, 2025.

CEPAL – COMISSÃO ECONÔMICA PARA A AMÉRICA LATINA E O CARIBE. *Recursos naturais e desenvolvimento produtivo na América Latina*. Santiago: CEPAL, 2023.

UN DESA – UNITED NATIONS DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS. *Harnessing the potencial of critical minerals for sustainable development*. New York: United Nations, 2023.

O USO DE TECNOLOGIAS MÓVEIS COMO FERRAMENTA DE CONTROLE SOCIAL E ENGAJAMENTO COMUNITÁRIO NA GESTÃO AMBIENTAL URBANA: O CASO DO APLICATIVO LIMPAÍ

Michelle Carneiro Razanauskas Miele, Murilo Daniel de Mello Innocentini , Flavia Matias Oliveira da Silva, Miguel Vieira Pizzamiglio, Carla Cristina Moraes

1 Universidade de Ribeirão Preto, e-mail: michelle.miele@sou.unaerp.edu.br; 2 Universidade de Ribeirão Preto, e-mail: minnocentini@unaerp.br; 3 Escola Superior Agrária-IPBeja, e-mail: flavia.silva@ipbeja.pt; 4 Universidade de Ribeirão Preto, e-mail: miguel.pizzamiglio@sou.unaerp.edu.br, 5 Universidade Federal de São Carlos -UFSCAR, e-mail:moraes.carlasjb@gmail.com

Palavras-chave: Cidadania Digital; Governança Climática; Educação Ambiental.

Introdução

A gestão ambiental urbana contemporânea exige uma abordagem integrada que contemple tanto a destinação correta de resíduos sólidos quanto o monitoramento da qualidade do ar, fatores que impactam diretamente a resiliência das cidades frente às mudanças climáticas. No município de Orlândia (SP), a localização estratégica às margens da Rodovia Anhanguera (SP-330) expõe a comunidade a um fluxo contínuo de emissões atmosféricas e desafios logísticos de limpeza urbana. Historicamente, o descarte irregular e a falta de dados empíricos sobre poluentes dificultavam a governança participativa. Surge, então, a necessidade de fortalecer a cidadania digital, utilizando tecnologias móveis e dispositivos de Internet das Coisas (IoT) para transformar o cidadão em um sensor ativo de seu território. O aplicativo Limpaí consolida-se como essa interface, integrando o projeto de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos que colabora e interage com o monitoramento atmosférico do Projeto ARES. Fundamentalmente, esta iniciativa é sustentada por um robusto pilar de educação ambiental, que busca, através da sensibilização escolar e comunitária, promover a responsabilidade compartilhada e a transparência na gestão pública.

Material e Métodos

A presente investigação fundamenta-se em um estudo de caso descritivo de natureza qualitativo-quantitativa, alicerçado em uma execução multissetorial no município de Orlândia (SP). A metodologia estruturou-se em três eixos interdependentes e sinérgicos que visam a integração entre dados técnicos e engajamento social. O primeiro eixo centrou-se na Educação Ambiental (EA) crítica e participativa, abrangendo ações de sensibilização em 40 instituições de ensino e 28 organizações empresariais promovendo seis mutirões de coleta de resíduos na cidade, além de orientação nas escolas e empresas. Para sensibilização foi incorporado no aplicativo metodologias ativas baseadas em gamificação, notadamente através de ferramentas pedagógicas como o "Tabuleiro da Poluição" e o "Jogo da Memória Ambiental", visando fomentar a compreensão sistêmica acerca da poluição do ar e resíduos.. Adicionalmente, foram aplicados desafios lúdicos, missões colaborativas e questionários de aferição de conhecimento (*quizzes*), conforme ilustrado na Figura 1, visando estimular o protagonismo de docentes, discentes e da comunidade local na resolução de problemas ambientais territoriais.



Figura 1: Exemplos de desafios, missões e questionários lúdicos utilizados para o engajamento comunitário e escolar. Fonte: Projeto Limpaí (2026)

O segundo eixo consistiu no aporte tecnológico por meio da implementação do aplicativo Limpaí. A plataforma opera via computação em nuvem (*cloud computing*) para assegurar a rastreabilidade de descartes e estabelecer um canal de comunicação bidirecional para o registro de denúncias e proposições. A integração de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) à interface móvel permite o georreferenciamento de passivos ambientais mediante o registro de ocorrências via marcadores geolocalizados (*pins*) e registros fotográficos em tempo real, conforme ilustrado na Figura 2. Tal interação digital visa subsidiar

a gestão pública na otimização da zeladoria urbana, fornecendo dados geoespaciais que norteiam o direcionamento estratégico de recursos para a manutenção da salubridade municipal e o controle social efetivo.



Figura 2: Plataforma digital Limpaí como ferramenta de suporte à gestão pública e ao controle social em Orlândia-SP.
Fonte: Projeto Limpaí (2026)

O terceiro eixo compreendeu a instalação de uma rede de sensores de monitoramento atmosférico em pontos estratégicos, incluindo o Jardim Vale Formoso, Jardim das Flores e unidades escolares, como a EMEB José Luiz Parreira, conforme ilustrado na Figura 3. A distribuição espacial dos dispositivos visou a cobertura de áreas representativas do perímetro urbano, com planejamento para expansão futura da malha sensorial. A viabilidade financeira e técnica dos dispositivos foi assegurada por meio de cooperação com o setor privado, utilizando-se a infraestrutura tecnológica do Projeto Ares. A coleta, o tratamento e a análise dos dados atmosféricos são conduzidos pela pesquisadora com o intuito de fundamentar cientificamente os planos de expansão da arborização urbana e otimizar os índices de qualidade do ar, promovendo o bem-estar e a saúde ambiental dos habitantes.



Figura 3: Mapa de distribuição dos sensores em Orlândia-SP.
Fonte: Projeto Limpaí (2026)

Esses dispositivos capturam dados a cada 30 segundos sobre poluentes (CO_2, NOx, VOC) e material particulado (PM2.5). A integração pedagógica ocorre através da apresentação do aplicativo para professores como uma ferramenta educativa interativa, onde os dados reais do monitoramento são transformados em conteúdo didático em sala de aula, utilizando um sistema de semáforo (gradiente cromático) para facilitar a interpretação dos indicadores de saúde ambiental.

Resultados e Discussão

Os resultados do projeto LimpAí demonstram um impacto social e educativo profundo. A mobilização escolar permitiu que a mensagem de conservação atingisse milhares de famílias, resultando em mutirões que reuniram 200 voluntários e removeram aproximadamente 750 m³ de resíduos de canteiros centrais, além da triagem de 1.000 kg de materiais recicláveis, conforme ilustrado na Figura 4 pode ser verificado a mobilização. A inserção da educação ambiental nas escolas foi o diferencial para que o uso do aplicativo não fosse apenas técnico, mas cultural; os alunos passaram a atuar como multiplicadores da cidadania digital em suas casas. Paralelamente, o monitoramento atmosférico revelou picos de material particulado em áreas de baixa arborização, dado que foi utilizado para fundamentar ações de plantio e incentivos fiscais, como o desconto no IPTU para residências com árvores. A discussão indica que a transparência dos dados coletados pelos sensores e visualizados no App Limpaí fortalece o controle social, pois permite que a população confronte a realidade ambiental com evidências técnicas. A parceria entre a empresa privada, a Associação de Moradores de Orlândia (AMO) e as instituições de ensino consolidou uma rede de governança que utiliza a inovação digital para mitigar riscos de enchentes e promover a descarbonização urbana, elevando a maturidade ESG do município.



Figura 4: Mobilização da Ação Limpaí
Fonte: Projeto Limpaí (2026)

Considerações Finais

A integração entre educação ambiental, gerenciamento de resíduos e monitoramento da qualidade do ar no aplicativo Limpaí comprova que a governança climática local depende da união entre consciência e tecnologia. As palestras nas escolas e empresas foram essenciais para dar significado aos dados técnicos, transformando o aplicativo em uma ferramenta de empoderamento social. Conclui-se que a cidadania digital em Orlândia promove uma mudança de comportamento sustentável e duradoura, onde o cidadão deixa de ser um observador para se tornar um agente operativo da gestão urbana. Este modelo de responsabilidade compartilhada apresenta alta replicabilidade para cidades de pequeno e médio porte que buscam alinhar inovação tecnológica à participação social, garantindo um ambiente mais limpo, seguro e resiliente para as futuras gerações.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado; à Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP); à ISEQ, à Prefeitura Municipal de Orlândia; ao Grupo Intelli; à Associação de Moradores de Orlândia (AMO) pelo suporte fundamental nas ações educativas e operacionais.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2010.

FGV – FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS. Gestão de resíduos e cidades sustentáveis: desafios e oportunidades na perspectiva ESG. Rio de Janeiro: FGVces, 2023. Disponível em: https://bibliotecadigital.fgv.br. Acesso em: 23 jun. 2025.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2023: Synthesis Report – Summary for Policymakers. Geneva: IPCC, 2024. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr. Acesso em: 23 jun. 2025.

PAES, M. A.; PUPPIM DE OLIVEIRA, J. A. Governança multissetorial e sustentabilidade urbana: um olhar sobre cidades médias brasileiras. Revista Brasileira de Gestão Urbana, Curitiba, v. 15, e023006 , 2023. DOI: https://doi.org/10.1590/2175-3369.015.e023006.

RESOLUÇÃO CONAMA nº 491/2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Brasília, DF, 2018.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Diagnóstico Temático: Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2023. Brasília: Ministério das Cidades, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/cidades. Acesso em: 23 jun. 2025.

MODELAGEM PARTICIPATIVA: UMA METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA GESTÃO DE DESASTRES SOCIOAMBIENTAIS EM MUNICÍPIOS DO RIO GRANDE DO SUL

1Susan da Silva, 2Roberta Plangg Riegel, 3Daniela Muller de Quevedo, 4Marcelo Pereira de Barros, 5 Danielle Paula Martins

1 Universidade FEEVALE, susaan.dasilva@gmail.com, 2Universidade FEEVALE, robertariegel@feevale.br, 3Universidade FEEVALE, danielamq@feevale.br, 4Universidade FEEVALE, marcelopb@feevale.br, 5Universidade FEEVALE, daniellepm@feevale.br

Palavras-chave: Governança Híbrida; Maturidade Institucional; Cartografia Temática;

Introdução

As mudanças climáticas globais têm intensificado a ocorrência de eventos extremos (IPCC, 2021), impondo novos desafios aos sistemas de gestão de riscos e desastres em diferentes escalas de governo e estado. Kobiyama *et al*. (2006), destacam que prevenção e preparação são etapas centrais na gestão de desastres, exigindo estruturas institucionais mais flexíveis, colaborativas e integradas com a sociedade civil. Documentos como o Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres (2015–2030), a Agenda 2030 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável reforçam a importância de modelos de governança inclusivos, com forte participação social e articulação entre múltiplos atores (ONU, 2015). No contexto brasileiro, ainda que exista um arcabouço normativo robusto em proteção e defesa civil, as emergências climáticas recentes no Rio Grande do Sul (2023–2024) evidenciaram fragilidades institucionais, lacunas operacionais e dificuldades de coordenação entre diferentes esferas de governo (Plano Rio Grande, 2025). Segundo a Organização das Nações Unidas para Redução de Riscos de Desastres (UNDRR, 2019), o voluntariado é elemento essencial na governança colaborativa e na resiliência comunitária ao fortalecer a capacidade adaptativa das populações vulneráveis frente a eventos adversos. Infere-se que há casos em que a fragmentação de informações, a sobreposição de esforços e a falta de planejamento conjunto resultaram em ineficiências na gestão das crises, mesmo em municípios com instrumentos formais instituídos (IFRC, 2022). Nesse cenário, a literatura sobre vulnerabilidade e gestão de riscos destaca a importância de abordagens multidimensionais que integrem fatores físicos, sociais, econômicos, institucionais e ambientais (Voinov *et al.*, 2016; Heltberg e Bonch-Osmolovskiy, 2011). Para esta pesquisa, maturidade institucional é compreendida como o grau de implementação, integração e uso efetivo de instrumentos de gestão de riscos e desastres como elemento norteador buscando identificar empiricamente por que alguns territórios respondem de forma mais eficiente do que outros. Para esta pesquisa, maturidade institucional é compreendida como um elemento norteador, para a implementação, integração e uso efetivo de instrumentos de gestão de riscos e desastres, buscando-se identificar, empiricamente, por que alguns territórios respondem de forma mais eficiente do que outros a eventos extremos. Dessa forma, o uso de ferramentas de modelagem participativa e processos coletivos de interpretação de dados possibilitam discussão, com diferentes atores, do grau de efetividade dos instrumentos formais existentes, bem como identificar barreiras e potencialidades para o fortalecimento da gestão de riscos (Voinov *et al*., 2016). Diante disso, modelagem participativa torna-se a estratégia para diagnosticar a maturidade institucional de oito municípios gaúchos e, ao integrar análise documental, construção de indicador e interpretação coletiva, busca-se produzir informação legitimada socialmente, capaz de subsidiar aprimoramentos em instrumentos normativos de gestão de riscos e desastres existentes, contribuindo para o fortalecimento da resiliência socioambiental em nível local. Nesse contexto, a questão central é: municípios que possuem a maior disponibilidade de instrumentos formais de gestão de riscos e desastres, apresentam, um maior preparo institucional frente à resposta aos eventos extremos?

Material e Métodos

A partir de uma abordagem qualitativa e quantitativa, este estudo estrutura-se em três etapas (A, B e C), articulando análise documental, discussão participativa (workshops) e representação cartográfica dos resultados. As técnicas e procedimentos estão organizadas de modo a permitir comparações entre municípios e a construção de um índice de maturidade institucional, integrando informações normativas, operacionais e perceptivas sobre Gestão de Riscos e Desastres. Abaixo, a Figura 1 apresenta a delimitação espacial da área de estudo, correspondente à Região Hidrográfica do Guaíba, localizada no estado do Rio Grande do Sul. Essa região foi selecionada por concentrar parte expressiva dos impactos associados aos eventos climáticos extremos ocorridos em 2023 e 2024, que afetaram amplamente o território, e exigiram ações emergenciais articuladas entre Estado, municípios e sociedade civil.

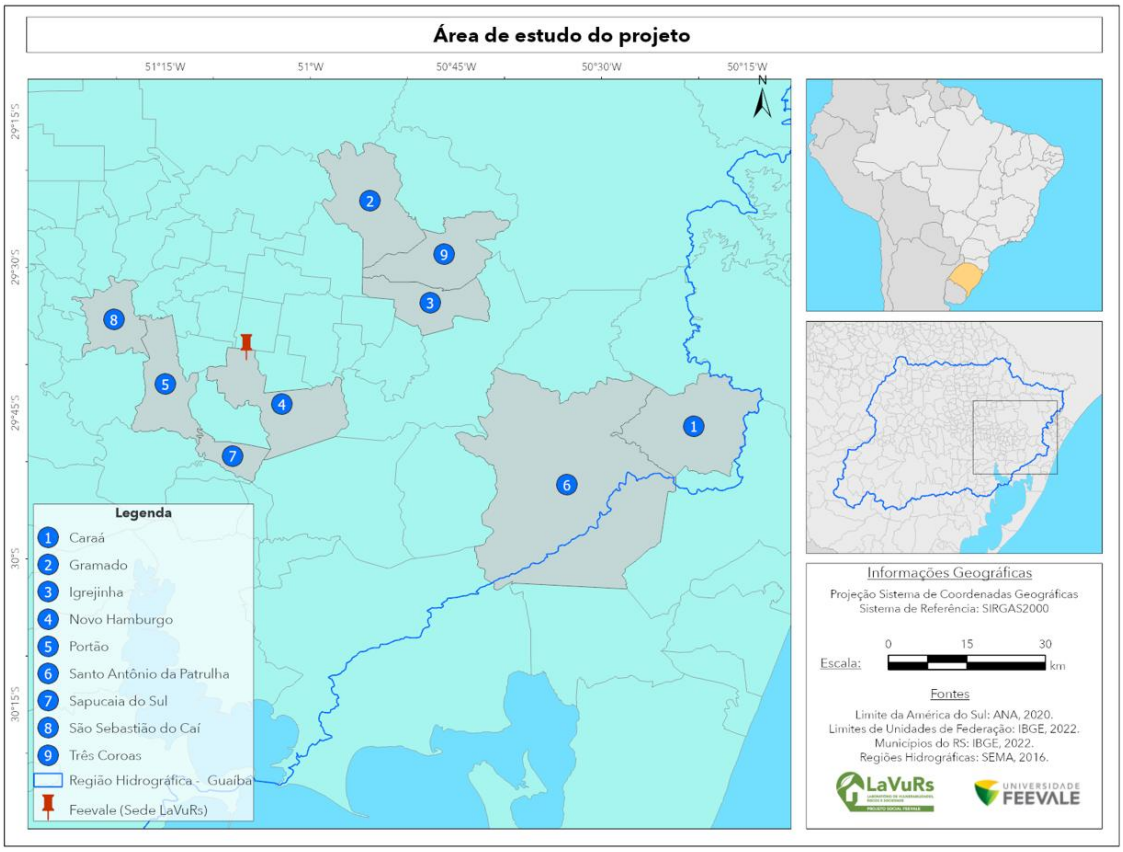


Figura 01: Mapa da área do estudo.
Fonte: Autora (2025)

No mapa, destacam-se os municípios (1) Caraá, (2) Gramado, (3) Igrejinha, (5) Portão, (6) Santo Antônio da Patrulha, (7) Sapucaia do Sul, (8) São Sebastião do Caí e (9) Três Coroas, que integram o projeto "Agente Mirim de Defesa Civil", uma iniciativa de extensão desenvolvida pela Universidade Feevale (Novo Hamburgo), por meio do Laboratório de Vulnerabilidades, Riscos e Sociedade (LaVuRS) que, dentre suas atividades, promove educação preventiva e cultura de gestão de riscos desde a infância. A seleção dos municípios fundamenta-se na relação de cooperação prévia entre as administrações municipais, suas respectivas Defesas Civis e a Universidade Feevale, o que possibilita um ambiente propício à análise da integração entre instrumentos formais e informais de gestão e à aplicação da proposta metodológica do projeto. Assim, infere-se que o estudo de casos múltiplos (Yin, 2014) definidos neste trabalho poderá configurar um microcosmo da governança híbrida, no qual estruturas institucionais e práticas sociais convergem de forma assertiva e alinhada às demandas atuais de resiliência climática, participação cidadã e gestão adaptativa do risco no estado do Rio Grande do Sul. Na etapa A, será realizado levantamento e análise documental sistematizada (BARDIN, 2016) de instrumentos formais relacionados à proteção e defesa civil, gestão ambiental e gestão climática. Serão consideradas a existência de: Planos de Contingência Municipal (PLANCON); leis de criação ou regulamentos das Defesas Civis municipais; planos diretores com ênfase em áreas de risco; documentos de integração interinstitucional (como atuação em comitês de bacia hidrográfica); relatórios de realização de simulados (práticos ou "de mesa") PLANCON; e projetos institucionais de educação para redução de riscos. A coleta será feita em fontes oficiais, como sites institucionais de prefeituras, câmaras municipais (leis, decretos e normas), página web institucional da Defesa Civil RS e o Portal Plano Rio Grande, podendo ser complementada por contato formal com coordenadorias municipais ou diferentes secretarias, se necessário. Após, os documentos serão classificados por meio de uma escala ordinal adaptada de Cardona (2005) e Bollin *et al*. (2003), que considera, para parametrização, a existência dos instrumentos, onde: 0 = inexistente; 1 = em desenvolvimento; e 2 = existente. As pontuações atribuídas aos diferentes instrumentos serão estruturadas em tabela (formato .csv) e, posteriormente, agregadas na forma de um índice de maturidade institucional por município, permitindo futuras análises comparativas entre os territórios. Na etapa B, será conduzida uma análise qualitativa e participativa, com realização de workshops com grupos focais (amostra intencional) para cada município, contemplando ao menos um representante de cada grupo de *stakeholders*, onde o Grupo 01 são gestores públicos ou técnicos municipais vinculados à gestão ambiental, o Grupo 02 são coordenadores municipais de Proteção e Defesa Civil (COMPDEC), e o Grupo 03 são lideranças comunitárias e/ou coordenadores de redes de voluntariado atuantes durante as emergências climáticas de 2023 a 2024, especialmente nas frentes de abrigamento e logística humanitária. A seleção dos participantes irá priorizar sujeitos que possuam experiência direta na gestão de desastres ou que tenham atuado durante os eventos climáticos de 2023 a 2024. Serão considerados os seguintes critérios: a existência de vínculo institucional ou comunitário com os grupos definidos; o tempo mínimo de atuação de seis meses em funções relacionadas à gestão de riscos e desastres; e a disponibilidade e consentimento formal para participação do *workshop*. O estudo está submetido ao Comitê de

Ética em Pesquisa em atendimento à Lei nº 14.874/2024 e ao Decreto nº 12.651/2025, que regulamentam a pesquisa com seres humanos e instituem o Sistema Nacional de Ética em Pesquisa com Seres Humanos (SINEPSH). Serão observadas as diretrizes da Resolução nº 510/2016 do Conselho Nacional de Saúde, assegurando o consentimento livre e esclarecido, o anonimato dos participantes, a confidencialidade das informações e a proteção dos dados pessoais, conforme a Lei Geral de Proteção de Dados (Lei nº 13.709/2018), reforçando o compromisso ético e a responsabilidade social na condução da pesquisa. Ainda, os conteúdos tratados por meio de análise de conteúdo (Bardin, 2016) integram percepções, narrativas e avaliações dos atores ao conjunto de dados quantitativos da etapa anterior. Essa integração permitirá atribuir graus de eficiência (alta, média, baixa ou não aplicável) à resposta institucional, articulando evidências documentais e interpretações dos envolvidos. Por fim, na etapa C, os resultados das etapas A e B serão integrados para construção de um índice de maturidade institucional por município e sua representação cartográfica. Esse índice resultará da combinação das pontuações atribuídas aos documentos e instrumentos avaliados com os graus de eficiência da resposta institucional discutidos nos grupos focais (Tabela 01). Serão utilizados softwares de geoprocessamento (QGIS ou ArcGIS) para elaboração de mapas temáticos, com gradientes de cor que expressem diferentes níveis de maturidade institucional. Para fins de representação cartográfica, os graus de eficiência serão codificados em cores no mapa, sendo a cor verde para alta eficiência, amarelo para média eficiência, vermelho representando a baixa eficiência, e a cor cinza em casos em que não se aplica a relação. Espera-se que esse processo contribua para o aprimoramento dos PLANCONs e demais instrumentos de gestão local, bem como para o fortalecimento da governança híbrida e da resiliência socioambiental nos municípios estudados.

COR (LEGENDA NO MAPA)	GRAU DE EFICIÊNCIA
Verde	Alta eficiência na resposta
Amarelo	Média eficiência na resposta
Vermelho	Baixa eficiência na resposta
Cinza	Não se aplica

Tabela 01: Legenda de cores do mapa segundo o grau de eficiência.
Fonte: Autora (2025)

Resultados e Discussão

O estudo está em fase de desenvolvimentos, então, é esperado que a combinação entre análise documental e modelagem participativa permita obter um diagnóstico robusto da maturidade institucional dos municípios frente à gestão de desastres socioambientais associados às emergências climáticas de 2023 e 2024. A integração das perspectivas de gestores públicos, defesas civis e lideranças comunitárias tende a revelar tanto convergências quanto tensões entre a existência formal dos instrumentos e sua efetiva operacionalização em contextos de crise. A construção do índice de maturidade institucional deverá possibilitar a comparação entre municípios, evidenciando diferentes níveis de preparo e apontando fragilidades prioritárias a serem enfrentadas em planos, protocolos e arranjos de cooperação. A representação cartográfica desses níveis de maturidade, em mapa temático, constitui ferramenta potencial para subsidiar o planejamento territorial e as decisões de investimento em redução de riscos. Ao tornar visíveis os contrastes e padrões de capacidade institucional em escala local, os mapas poderão apoiar estratégias de cooperação intermunicipal, de regionalização de serviços e de fortalecimento de redes de governança híbrida. Dessa forma, os resultados esperados dialogam com agendas nacionais e internacionais de resiliência climática, ao enfatizar a importância de sistemas locais de gestão de riscos mais integrados, participativos e adaptativos.

Considerações Finais

Ancorado em referenciais como o Marco de Sendai, a Agenda 2030, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, o estudo propõe o uso da modelagem participativa como estratégia norteadora para diagnosticar a maturidade institucional de municípios gaúchos frente a desastres socioambientais recentes. Mais do que verificar a existência formal de normas e instrumentos, busca-se compreender em que medida tais instrumentos são efetivamente operacionalizados e capazes de orientar respostas eficientes a eventos extremos. Espera-se que o índice e o mapa de maturidade institucional produzidos contribuam para identificar fragilidades prioritárias, subsidiar decisões de planejamento e investimento em gestão de riscos e fortalecer a governança híbrida entre Estado e sociedade civil. Ao produzir informação legitimada socialmente e comparável entre municípios, a proposta visa apoiar o aprimoramento de planos de contingência, protocolos operacionais, arranjos de cooperação e ações de educação para redução de riscos, contribuindo para o aumento da resiliência socioambiental em escala local.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade FEEVALE, aos colaboradores do Laboratório de Vulnerabilidades, Riscos e Sociedade (LaVuRS) e aos atores envolvidos pelo apoio institucional e pelas parcerias estabelecidas no âmbito deste estudo. A autora Susan da Silva agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de mestrado, que viabilizou o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ANSSELL, C.; GASH, A. Collaborative governance in theory and practice. *Journal of Public Administration Research and Theory*, v. 18, n. 4, p. 543-571, 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/31311629_Collaborative_Governance_in_Theory>. Acesso em: 14 abr. 2026.

BARDIN, L. *Análise de conteúdo*. Lisboa: Edições 70, 2016. Disponível em: <https://madmunifacs.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/08/anc3a1lise-de-contec3bado-laurence-bardin.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2026.

BOLLIN, C.; CÁRDENAS, C.; HAHN, H.; VÁSQUEZ, J. *Disaster risk management by communities and local governments*. Washington, DC: Inter-American Development Bank, 2003. Disponível em: <https://publications.iadb.org/pt/node/11309>. Acesso em: 14 abr. 2026.

BRASIL. Lei n. 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, 11 abr. 2012. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm>. Acesso em: 14 abr. 2026.

CARDONA, O. D. A system of indicators for disaster risk management in the Americas. In: *250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake*, 2005, Lisbon. *Proceedings [...]*
Lisbon, 2005. Disponível em: <https://www.unisdr.org/2005/HFdialogue/download/tp3-paper-system-indicators.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2026.

HELTBERG, R.; BONCH-OSMOLOVSKIY, M. *Mapping vulnerability to climate change*. Washington, DC: The World Bank, 2011. (Policy Research Working Paper, 5554). Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/2d369dc1-b9f2-5574-a516-4d00c85d760f/content>. Acesso em: 14 abr. 2026.

IFRC. *World Disasters Report 2022: trust, equity and local action*. Geneva: IFRC, 2022. Disponível em: <https://www.ifrc.org/document/world-disasters-report-2022>. Acesso em: 14 abr. 2026.

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. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-11/>. Acesso em: 14 abr. 2026.

KOBIYAMA, M. et al. *Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos*. Curitiba: Organic Trading, 2006. Disponível em: <https://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2014/07/Livro_Prevencao_de_Desastres_Naturais.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2026.

ONU (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS). *Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastre 2015-2030*. Sendai: UNDRR, 2015. Disponível em: <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>. Acesso em: 14 abr. 2026.

OSTROM, E. *Governing the commons: the evolution of institutions for collective action*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

OSTROM, E. *Understanding institutional diversity*. Princeton: Princeton University Press, 2005.

VOINOV, A. et al. Modelling with stakeholders – next generation. *Environmental Modelling & Software*, Amsterdam, v. 77, p. 196-220, 2016. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez310.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1364815215301055?via%3Dihub>. Acesso em: 14 abr. 2026.

UNDRR. *Words into action: engaging volunteers in disaster risk reduction*. Geneva: United Nations, 2020. Disponível em: <https://www.undrr.org/media/43008/download?startDownload=20251023>. Acesso em: 14 abr. 2026.

YIN, R. K. *Estudo de caso: planejamento e métodos*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014. Disponível em: <http://maratavarespsictics.pbworks.com/w/file/fetch/74304716/3-YIN-planejamento_metodologia.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2026.

RIO JURUBATUBA COMO ARENA DE DISPUTA E A MOBILIZAÇÃO POPULAR PELO PARQUE LINEAR

1 Mainara Bendini, 2 Cintia Elisa de Castro Marino
1 PPG-CIS, UNINOVE, SP, Brasil, e-mail: mainarabendini@uni9.edu.br;
2 PPG-CIS, UNINOVE, SP, Brasil, e-mail: cintiacmarino@uni9.pro.br

Palavras-chave: Participação social; Disputas urbano-ambientais; Parque linear urbano.

Introdução

O processo de urbanização das cidades gerou impactos socioambientais que reverberam até os dias atuais, influenciando na relação que se estabelece com os recursos naturais e na forma de organização dos centros urbanos. Os autores Alvim, Izaga e Claps (2024), apontam que as últimas décadas foram marcadas pelo uso intensivo do transporte individual, e que apesar das críticas sobre este modelo de transporte, o investimento em infraestrutura viária ainda é maior do que em transportes públicos. Além disso, historicamente, a urbanização tem contribuído para a degradação dos rios e córregos urbanos, por meio de processos como canalização, impermeabilização do solo e lançamento de poluentes (Silva-Sánchez e Jacobi, 2012).

Os autores Carvalho, *et al*., (2025), abordam a necessidade de repensar o modelo de desenvolvimento urbano integrando a infraestrutura verde e as Soluções Baseadas na Natureza (SbN). Essas são soluções inovadoras que visam a restauração e o aproveitamento dos sistemas naturais para enfrentar desafios urbanos. A busca por resiliência urbana, ou seja, pela capacidade de enfrentamento e adaptação das cidades diante dos impactos das mudanças climáticas, tem tomado grande proporção em debates, iniciativas políticas e adoção de agendas urbanas voltadas à reintegração da natureza às cidades.

A ampliação desta temática no debate público e políticas urbanas se alinha ao marco regulatório brasileiro. A Lei nº 10.257/2001, conhecida como Estatuto da Cidade, em seu Art. 2º aborda a garantia do direito à cidade sustentável e da gestão democrática por meio da participação da população no desenvolvimento urbano (Brasil, 2001). Mais recentemente, a Lei nº 14.904/2024, estabelece diretrizes para a elaboração de planos de adaptação à mudança do clima no Brasil, orientando a integração de políticas públicas e a consideração das vulnerabilidades territoriais, sociais e ambientais (Brasil, 2024).

O conflito ambiental analisa disputas na produção do espaço urbano, especialmente em lutas por infraestrutura e direito à cidade. Essas disputas envolvem a sobreposição de interesses entre grupos sociais, que podem ser representados por moradores que defendem seus territórios, e o poder público ou privado que visam à valorização econômica do espaço (Carneiro e Pereira, 2015).

A relação entre rios, córregos e a arborização urbana constitui um elemento indissociável em cidades que buscam se adaptar aos efeitos das mudanças climáticas, como as chuvas intensas. Nesse sentido, a arborização desempenha papel fundamental na promoção da saúde e da resiliência urbana, ao contribuir para a regulação térmica, melhoria da qualidade do ar, além de exercer função estratégica na proteção dos recursos hídricos e na qualidade da vida urbana (Caiche, Peres e Schenk, 2021).

Ao analisar o cenário do Rio Jurubatuba, em São Paulo, um dos objetos do Plano de Intervenção Urbana Arco Jurubatuba (PIU AJ), percebe-se uma grande mobilização popular em torno da criação de um parque linear em suas margens, que se posiciona contra a expansão viária prevista pela gestão municipal. O presente estudo analisa o debate sobre a criação do Parque Jurubatuba, enquanto arena de disputa urbano-ambiental no planejamento da cidade. A análise considera a relevância dos conflitos contemporâneos, principalmente no momento de enfrentamento às mudanças do clima.

A pesquisa adota abordagem qualitativa, buscando articular os dados empíricos obtidos sobre participação popular na construção do projeto municipal com a literatura teórica. A análise concentra-se na interpretação dos posicionamentos institucionais e das formas de manifestação pública relacionadas aos projetos de transformação urbana no entorno do Rio Jurubatuba.

Material e Métodos

Em termos metodológicos, a pesquisa adota uma abordagem qualitativa, orientada pela análise de documentos e pela pesquisa-ação definida por Michel Thiollent (2025). Essa abordagem metodológica articula a produção de conhecimento com a intervenção prática na realidade, envolvendo de forma participativa os sujeitos pesquisados na identificação de problemas e na construção de soluções. Isso permitiu a coleta de dados a partir do envolvimento com os agentes atuantes na disputa territorial, no período de dezembro de 2023 a dezembro de 2025. O acompanhamento em campo ocorreu por meio da participação presencial em atos e audiências públicas, e no ambiente digital pelo monitoramento das redes sociais, que geraram grande mobilização.

Os documentos foram coletados nos ambientes virtuais, em sites institucionais da gestão pública e na página do Instagram “Parque Jurubatuba”, dos ativistas envolvidos. A seguir estão listados os documentos consultados em ordem cronológica: Nota Técnica PIU AJ (São Paulo, 2018); PMSP abre licitação da extensão da Marginal Pinheiros (São Paulo, 2023); Abaixo-assinado em defesa da última área verde do Rio Jurubatuba (Gallego, 2024); 1º e 2º Ato Bicicletada e Caminhada em defesa da criação do Parque Jurubatuba (Parque Jurubatuba, 2024); Carta aberta ao Prefeito em defesa do Parque Jurubatuba (Movimento em Defesa do Parque Jurubatuba, 2024); Suspensão de licitação da nova marginal (São Paulo, 2024d); PL nº158/2024 prevê a criação do Parque Jurubatuba (São Paulo, 2024a); Audiências públicas para apresentação do RIMA da Nova Marginal (São Paulo, 2024c); Proposta de expansão da Marginal Pinheiros (São Paulo, 2025b); Propostas de criação do Parque Jurubatuba (São Paulo, 2025d e 2025c); Audiência pública para criação do Parque Jurubatuba (São Paulo, 2025a e Marinho, 2025).

A análise dos dados foi realizada por meio da interpretação das narrativas associadas aos posicionamentos em disputa no território, com base em documentos institucionais da gestão pública, e propostas e ações do movimento popular pelo Parque Jurubatuba. A partir desse material, estabeleceu-se um diálogo com a literatura científica, buscando compreender avanços e contradições entre a demanda popular e as ações da administração pública em relação ao objeto em questão.

Resultados e Discussão

A área em disputa, caracterizada como Zona Especial de Proteção Ambiental (ZEPAM), pela Lei nº 18.177 de 2024 (São Paulo, 2024b), alvo de discussões entre a sociedade e a Prefeitura Municipal de São Paulo, fica localizada na margem oeste do Rio Jurubatuba, na Zona Sul do município de São Paulo, e pode ser observada na Figura 01. Além disso, a área é objeto de estudo do Plano de Intervenção Urbana do Arco Jurubatuba, que cita em seu projeto a criação de um parque às margens do rio e a criação de uma "via parque" sem nomear como uma extensão da Marginal (São Paulo, 2018).

Conforme o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), a expansão viária prevista no projeto de expansão da Marginal Pinheiros, inicia nas proximidades da Ponte João Dias e termina na Ponte Vitorino Goulart da Silva. Porém, a área verde afetada é remanescente da Mata Atlântica, e caracterizada pela permeabilidade do solo na região (Multiplano Engenharia, 2023).

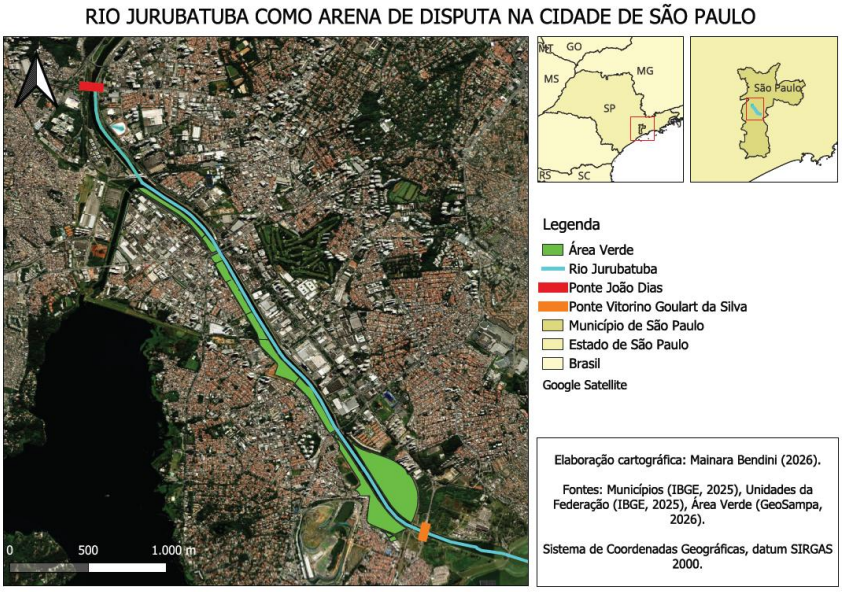


Figura 01: Mapa da área de disputa no Rio Jurubatuba. Fonte: Elaboração própria (QGIS) com base nos dados do IBGE (2025) e Geosampa (2026).

Foi possível observar a força no discurso ativista ambientalista em defesa da preservação da área verde como alternativa para promoção de resiliência climática da cidade (Parque Jurubatuba, 2024). Em contraposição, a Prefeitura Municipal de São Paulo prevê o prolongamento viário da Marginal Pinheiros às margens do rio, dando prioridade ao sistema viário (São Paulo, cidade, 2023). A Prefeitura divulgou em dezembro de 2023, a abertura de licitação para o prolongamento viário de 8 quilômetros da Marginal Pinheiros pela margem oeste do Rio Jurubatuba, com o intuito de ampliar o acesso, melhorar a fluidez da circulação viária e eliminar os conflitos de tráfego na região (São Paulo, 2023). Apesar do processo de licitação ter sido suspenso em março de 2024 (São Paulo, 2024d), foram realizadas duas audiências públicas para apresentação do RIMA, com a finalidade de apresentar o projeto para a população (São Paulo, 2024c).

Por outro lado, houve uma intensa mobilização da sociedade civil pela criação do Parque Jurubatuba, sendo o primeiro marco em janeiro de 2024, com a criação de um abaixo-assinado por um ativista, que no decorrer do tempo tomou grande proporção e atualmente possui uma média de 27 mil assinaturas (Gallego, 2024).

Posteriormente, com a criação da página Parque Jurubatuba nas redes sociais, diversas pessoas aderiram à causa e se organizaram, contando com o apoio de outros movimentos, como o dos ciclistas. Dessa forma, o movimento realizou dois atos chamados de "Bicicletada e Caminhada", em março e junho de 2024 (Parque Jurubatuba, 2024). Além disso, o movimento enviou uma carta aberta para a Prefeitura com 20 mil assinaturas solicitando a suspensão da licitação da Marginal Pinheiros, devido ao custo bilionário e pelos riscos à drenagem e à área verde do rio (Movimento em Defesa do Parque Jurubatuba, 2024).

Em apoio a reivindicação popular, no dia 20 de março de 2024 foi criado o Projeto de Lei nº158/2024 que prevê a criação do Parque Municipal Jurubatuba na margem oeste do Rio Pinheiros, entre a Represa Billings e o Canal Guarapiranga (São Paulo, 2024a). A Câmara Municipal de São Paulo aprovou o projeto em primeira votação, uma etapa inicial de deliberação em plenário. Porém ainda segue em tramitação a votação definitiva, que determina a análise do projeto pelo Poder Executivo (Marinho, 2025).

Como reflexão, a atenção se volta ao perceber a ampliação do debate público na pauta urbano-ambiental, porém a dificuldade na efetivação de políticas públicas. Em 2025 foram apresentadas propostas em consultas públicas para o Programa de Metas, Plano Plurianual e Planos de Ação das Subprefeituras, sendo duas propostas para a criação do Parque Jurubatuba, a primeira

com 170 votos (São Paulo, 2025d) e a com 58 votos (São Paulo, 2025c). Enquanto a proposta para a Expansão da Marginal Pinheiros teve 28 votos (São Paulo, 2025b). Ainda assim, nenhuma das propostas foram incluídas no Programa e nos Planos.

Em novembro de 2025 foi realizada uma audiência pública para debate da criação do Parque Municipal Jurubatuba, pela Comissão de Administração Pública da Câmara Municipal de São Paulo (São Paulo, 2025a). Estiveram presentes movimentos sociais, arquitetos e moradores da região, porém nenhum representante do Poder Executivo compareceu no dia (Marinho, 2025).

Este cenário evidencia um conflito urbano-ambiental territorial, pois enquanto o poder público defende a expansão viária como uma solução de melhoria do tráfego na região, a área escolhida é uma ampla área verde que possui valor social e ambiental para a população local. Além disso, a ausência de respostas oficiais após as consultas públicas, assim como, a ausência de representantes do Poder Executivo na audiência pública a favor da criação do parque, demonstram uma lacuna na gestão democrática e o esvaziamento do debate pela gestão pública, que não atendeu às manifestações da população.

Conforme Masquete e Chande (2022), os espaços verdes urbanos, como parques, praças e vias arborizadas, constituem tipologias de infraestrutura verde que oferecem serviços ecossistêmicos que contribuem para o bem-estar da população e no equilíbrio ambiental, como a proteção dos recursos hídricos, solo e biodiversidade. No contexto de mudança do clima, a proposta de expansão viária evidencia um conjunto de impactos negativos sobre uma das últimas áreas verdes ribeirinhas da cidade.

Embora o debate, impulsionado por mobilizações populares, sinalize avanços ao incorporar questões da crise do clima, a solução apresentada pela gestão municipal permanece ancorada em parâmetros obsoletos, vinculados a um modelo rodoviarista. Nesse sentido, observa-se a ausência de abordagens integradas, como a articulação de múltiplas funções urbanas e ambientais, configurando uma oportunidade potencialmente perdida de alinhar a transformação urbana a agendas contemporâneas.

Considerações Finais

Atualmente, o Rio Jurubatuba se tornou uma arena de disputa urbano-ambiental. A intensa mobilização popular em torno da criação do Parque Jurubatuba demonstra grandes preocupações com a situação da cidade frente às mudanças climáticas, defendendo a infraestrutura verde como a melhor alternativa para o meio ambiente e a população da região. Em contraposição, a Prefeitura defende o modelo histórico de planejamento que prioriza o sistema viário. Diante de manifestações do movimento pela criação do parque, através de mobilizações presenciais e virtuais, incluindo processos legislativos, a gestão pública não se posicionou perante a sociedade, o que evidencia um descompasso entre a ampliação dos espaços e debates e sua efetivação na agenda pública urbana que atenda às questões ambientais e climáticas da cidade.

Referências Bibliográficas

Alvim, A.T.B.; Izaga, F.G; Claps, R.F. Mobilidade urbana em perspectiva: novos olhares sobre as dinâmicas da cidade contemporânea. *Cadernos Metrópole*, São Paulo, v. 26, n. 60, maio/ago. 2024. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/2236-9996.2024-6000.

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 e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm. Acesso em: 21 jan. 2026.

Brasil. Lei nº 14.904, de 27 de junho de 2024. Estabelece diretrizes para a elaboração de planos de adaptação à mudança do clima; altera a Lei nº 12.114, de 9 de dezembro de 2009; e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14904.htm. Acesso em: 21 jan. 2026.

Caiche, D.T.; Peres, R.B.; Schenk, L.B.M. Floresta urbana, soluções baseadas na natureza e paisagem: planejamento e projeto na cidade de São Carlos (SP). *Revista LABVERDE*, São Paulo: FAUUSP, v. 11, n. 1, e189316, 2021. DOI: https://doi.org/10.11606/issn.2179-2275.labverde.2021.189316.

Carneiro, E.J.; Pereira, V.P. A dimensão ambiental dos conflitos urbanos: reflexões a partir do estudo de caso da formação de um bairro periférico. ENANPUR, 16, Belo Horizonte, 2015. ST 4: Natureza, reprodução social e bens comuns.

Carvalho, G.L.L.; Lira, A.H.C.; Oliveira, J.X.A.; Silveira, J.A.R. Estratégias integradas de soluções baseadas na natureza como potencializadoras de centralidades. *Revista Projetar - Projeto e Percepção do Ambiente*, v. 10, n. 1, jan. 2025.

Gallego, D. EM DEFESA da última área verde sem avenidas nas margens do canal do rio Pinheiros! Change, 2024. Disponível em: https://www.change.org/p/em-defesa-da-%C3%BAltima-%C3%A1rea-verde-sem-avenidas-nas-margens-do-canal-do-rio-pinheiros. Acesso em: 07 fev. 2026.

Movimento em Defesa do Parque Jurubatuba. *Carta aberta ao Prefeito de São Paulo em defesa do Parque Jurubatuba.* São Paulo (SP), 04 de março de 2024. Disponível em: https://participemais.prefeitura.sp.gov.br/system/documents/attachments/000/002/974/original/303320bceb3e79248f2222acad1a3d1a97b2354a.pdf. Acesso em: 07 fev. 2026.

Thiollent, M. *Metodologia da pesquisa-ação*. 19. ed. São Paulo: Cortez, 2025. Edição comemorativa dos 40 anos da 1ª edição (1985). ISBN 978-65-5555-578-3.

Marinho, K. Movimentos sociais e moradores da zona sul participam de Audiência Pública sobre criação do Parque Jurubatuba. *Blog da Câmara Municipal de São Paulo*, 1 nov. 2025. Disponível em: https://www.saopaulo.sp.leg.br/blog/movimentos-sociais-e-moradores-da-zona-sul-participam-de-audiencia-publica-sobre-criacao-do-parque-jurubatuba/. Acesso em: 07 fev. 2026.

Masquete, J.A.; Chande, G.M.C. Integração da infraestrutura verde no ordenamento da cidade de Lichinga: potencialidades e condicionantes. *Paisagem e Ambiente*, v. 33, n. 49, e186480, São Paulo, 2022. DOI: https://doi.org/10.11606/issn.2359-5361.paam.2022.186480.

Multiplano Engenharia. *Relatório de Impacto Ambiental – Obras Nova Marginal Pinheiros.* São Paulo, 2023. Disponível em: https://drive.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/meio_ambiente/arquivos/eia/6027-2024_0003413_4_RIMA.pdf. Acesso em: 07 fev. 2026.

Parque Jurubatuba. Perfil criado pelos ativistas em defesa da área verde e criação do Parque Linear do Rio Jurubatuba – Instagram. São Paulo, 2025. Disponível em: https://www.instagram.com/parquejurubatuba/. Acesso em: 07 fev. 2026.

SÃO PAULO (Município). Câmara Municipal. *Projeto de Lei nº 158/2024.* Dispõe sobre a criação do Parque Municipal Jurubatuba e dá outras providências. Autores: Vereador Professor Toninho Vespoli e outros. Secretaria Geral Parlamentar, 2024a. Disponível em: https://www.saopaulo.sp.leg.br/iah/fulltext/projeto/PL0158-2024.pdf. Acesso em: 07 fev. 2026.

SÃO PAULO (Município). Câmara Municipal. *Audiência Pública de Administração Pública | PL 158/24: Criação do Parque Municipal Jurubatuba | 01/11/2025*. 2025a. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=dTuLDqIQBzY. Acesso em: 07 fev. 2026.

SÃO PAULO (Município). *Lei nº 18.177 de 25 de julho de 2024*. Compatibiliza a redação do art. 2º da Lei nº 18.081, de 19 de janeiro de 2024, para tornar expressa a metodologia aplicada ao MAPA I, adequa legendas do MAPA I e a redação de outros dispositivos constantes da Lei nº 18.081, de 2024. 2024b. Disponível em: https://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-18177-de-25-de-julho-de-2024. Acesso em: 07 fev. 2026.

SÃO PAULO (Município). Secretaria Especial de Relações Institucionais. *Expansão Sul da Marginal Pinheiros: proposta 3821*. São Paulo: Portal Participe+, 9 abr. 2025b. Disponível em: https://participemais.prefeitura.sp.gov.br/legislation/processes/323/proposals/3821. Acesso em: 07 fev. 2026.

SÃO PAULO (Município). Secretaria Especial de Relações Institucionais. *Criação do Parque Jurubatuba: proposta 4825.* São Paulo: Portal Participe+, 12 ago. 2025c. Disponível em: https://participemais.prefeitura.sp.gov.br/legislation/processes/339/proposals/4825. Acesso em: Acesso em: 07 fev. 2026.

SÃO PAULO (Município). Secretaria Especial de Relações Institucionais. *Parque Jurubatuba: proposta 3892.* São Paulo: Portal Participe+, 15 abr. 2025d. Disponível em: https://participemais.prefeitura.sp.gov.br/legislation/processes/323/proposals/3892. Acesso em: 07 fev. 2026.

SÃO PAULO (Município). Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras. *Prefeitura de São Paulo anuncia licitação para o Prolongamento Viário da Marginal do Rio Pinheiros, na Zona Sul*. São Paulo, 2023. Disponível em: https://prefeitura.sp.gov.br/web/obras/w/sp_obras/noticias/359645. Acesso em: 07 fev. 2026.

SÃO PAULO (Município). Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente. *Audiências Públicas 2024: editais e atas de EIA/RIMA e RIV*. São Paulo, 2024c. Disponível em: https://prefeitura.sp.gov.br/web/meio_ambiente/w/audi%C3%AAncia-p%C3%BAblica-2024. Acesso em: 07 fev. 2026.

SÃO PAULO (Cidade). *Projeto de Intervenção Urbana Arco Jurubatuba PIU ACJ Nota Técnica. 2018.* Disponível em:https://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/wp-content/uploads/2018/03/NOTA_TECNICA_PLANO_URBANISTICO.pdf. Acesso em: 24 mai. 2025.

SÃO PAULO (Município). São Paulo Obras - SPObras. Gerência de Licitações e Contratos. *Comunicado: Licitação SPObras nº 214/2023*. Processo SEI nº 7910.2023/0003014-8. São Paulo, 5 mar. 2024d. Disponível em: https://diariooficial.prefeitura.sp.gov.br/md_epubli_visualizar.php?hTg6Vm8SVnYhgol0nf1e9DHtoHqCo-7rYVAXGodBEQ2_-4to98W2-D6qvDUHOhCqPr2dxcsVLUHAJ3mxg7QEqQ. Acesso em: 07 fev. 2026.

SILVA-SÁNCHEZ, S.; JACOBI, P.R. Políticas de recuperação de rios urbanos na cidade de São Paulo: possibilidades e desafios. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, v. 14, n. 2, nov. 2012. DOI: http://dx.doi.org/10.22296/2317-1529.2012v14n2p119.

AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE OPERACIONAL DAS MEDIÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E FLUVIOMÉTRICAS POR MEIO DE INDICADORES DE DESEMPENHO

1 César Campos da Silva, 2 Rossano Belladona
1 Engenheiro Hídrico da Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do Rio Grande do Sul – SEMA/RS, e-mail: campos.campos10@gmail.com; 1 Professor do ProfÁgua – IPH/UFRGS, e-mail: rbelladona101@gmail.com

Palavras-chave: Confiabilidade hidrológica; Séries temporais; Correlação.

Resumo

Este estudo tem como objetivo avaliar a confiabilidade de séries hidrológicas por meio da aplicação integrada de indicadores de completude (ICm), estabilidade (ICs) e índice composto (ICO), associados à análise de correlação entre estações e à detecção de mudanças estruturais por meio do teste de Pettitt. Foram analisadas as estações Passo do Sarmento, Passo do Dias e Passo Santa Maria, localizadas na sub-bacia do rio Piratini, utilizando séries históricas de cota e vazão.

Os resultados demonstraram que a disponibilidade de dados não garante, por si só, a confiabilidade das séries. Embora as estações apresentem valores semelhantes de ICO (≈ 0,84), observou-se diferença significativa no desempenho hidrológico. A estação Passo Santa Maria apresentou maior consistência e forte correlação com a estação de referência (r = 0,87), enquanto a estação Passo do Dias apresentou menor estabilidade e correlação moderada (r = 0,55). O teste de Pettitt indicou mudanças estruturais nas séries, com destaque para alterações no regime de vazão em torno de 1982.

Conclui-se que a avaliação da confiabilidade de dados hidrológicos deve considerar, de forma integrada, a disponibilidade, a consistência, a coerência hidrológica e o grau de associação entre as séries.

Introdução

A confiabilidade de séries hidrológicas constitui elemento fundamental para a gestão de recursos hídricos, uma vez que decisões relacionadas ao planejamento e à operação de sistemas hídricos dependem diretamente da qualidade dos dados disponíveis. Embora redes de monitoramento apresentem elevada disponibilidade de dados, a simples presença de registros não garante sua consistência ou representatividade hidrológica, conforme discutido nas diretrizes da WMO (2018) e em estudos clássicos de hidrologia aplicada, como Tucci (2009).

Nesse contexto, a utilização de indicadores quantitativos torna-se essencial para avaliar a qualidade das séries. O Índice de Completude (ICm) permite quantificar a disponibilidade de dados, enquanto o Índice de Similaridade ou Estabilidade (ICs) avalia a consistência temporal e a coerência entre séries. A integração desses indicadores por meio do Índice Composto (ICO) possibilita uma avaliação global da confiabilidade, embora sua interpretação isolada possa mascarar diferenças relevantes entre quantidade e qualidade dos dados.

Adicionalmente, a análise de correlação entre estações e a aplicação de testes estatísticos, como o teste de Pettitt, permitem identificar mudanças estruturais nas séries e avaliar o grau de associação hidrológica entre diferentes pontos de monitoramento. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar a confiabilidade de séries hidrológicas por meio de uma abordagem integrada.

Área de estudo

A área de estudo corresponde à sub-bacia do rio Piratinim, inserida na Região Hidrográfica da Bacia do Rio Uruguai, no estado do Rio Grande do Sul. A região apresenta clima subtropical úmido, com regime hidrológico influenciado por eventos pluviométricos distribuídos ao longo do ano.

A distribuição espacial das estações fluviométricas analisadas ao longo da sub-bacia do rio Piratini é apresentada na Figura 1.

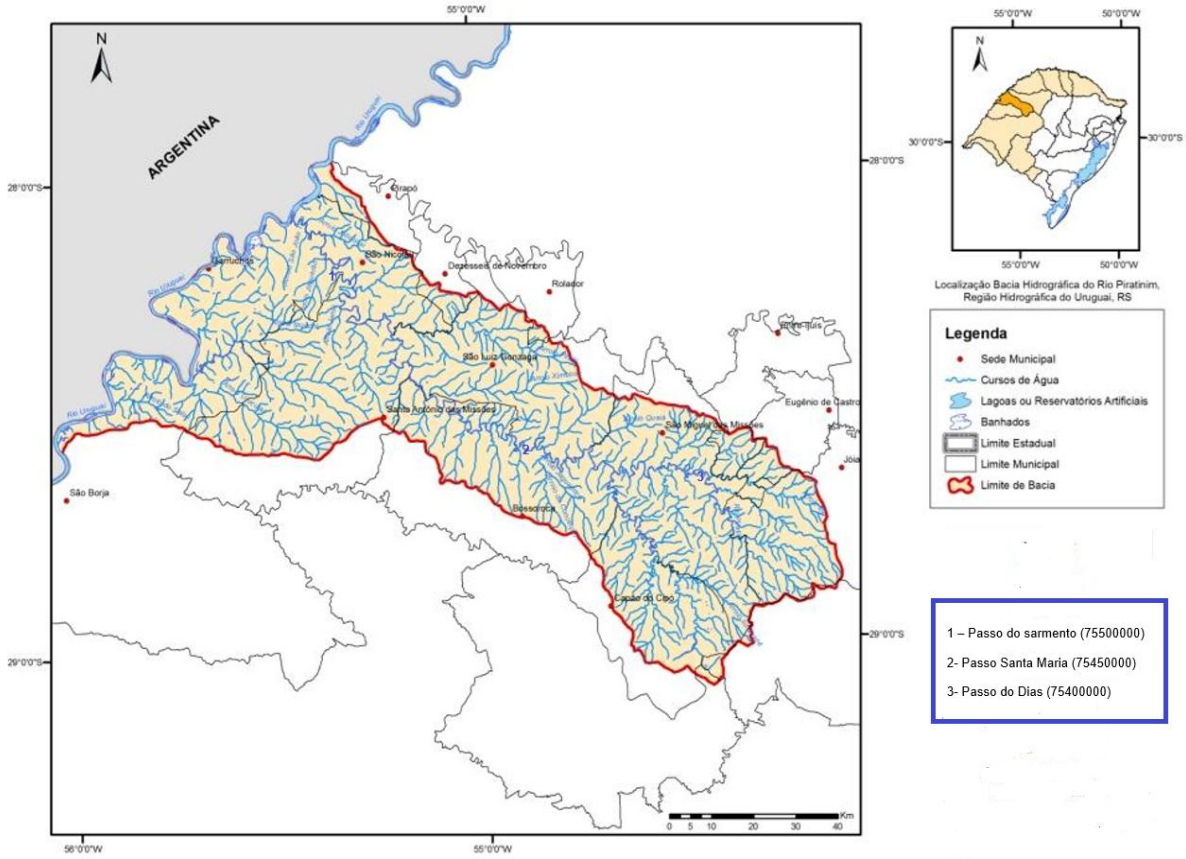


Figura 1: Mapa da sub-bacia do rio Piratinim com localização das estações fluviométricas.
Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

Foram analisadas três estações fluviométricas: Passo do Sarmento (75500000), adotada como referência, Passo do Dias (75400000) e Passo Santa Maria (75450000), localizadas em diferentes trechos da bacia, permitindo a avaliação comparativa do comportamento hidrológico.

Materiais e Métodos

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza exploratória, com abordagem quantitativa e descritiva, voltado à proposição e análise de indicadores operacionais capazes de representar a confiabilidade das medições pluviométricas e fluviométricas. Considerando a inexistência de indicadores formalmente consolidados para essa finalidade, o estudo não se limita à validação de modelos preexistentes, mas busca avaliar a viabilidade de diferentes métricas e métodos analíticos aplicáveis às séries hidrológicas analisadas.

A metodologia baseou-se na análise de séries históricas de cota e vazão obtidas da base Hidroweb da Agência Nacional de Águas. Os dados foram tratados e padronizados por meio de rotinas computacionais, garantindo consistência temporal e integridade das séries.

A confiabilidade das séries foi avaliada por meio do Índice de Completude (ICm), definido como a razão entre dados válidos e o total esperado, do Índice de Similaridade (ICs), obtido a partir do coeficiente de correlação de Pearson entre as séries, e do Índice Composto (ICO), calculado como combinação ponderada desses indicadores.

A análise foi complementada pelo coeficiente de correlação de Pearson (r), utilizado para avaliar o grau de associação entre as séries, e pelo teste de Pettitt, aplicado para identificar mudanças estruturais ao longo do tempo.

Resultados e Discussão

Os resultados evidenciaram diferenças significativas entre as estações analisadas. A análise da curva de permanência e dos hidrogramas indicou que a estação Passo do Sarmento apresenta maior disponibilidade hídrica, enquanto a estação Passo do Dias apresenta menor magnitude de vazões e maior irregularidade no comportamento hidrológico.

A análise de correlação demonstrou que a estação Passo Santa Maria apresenta forte associação com a estação de referência ($r = 0,87$), indicando elevada coerência hidrológica. Em contraste, a estação Passo do Dias apresentou correlação moderada ($r = 0,55$), evidenciando maior dispersão dos dados e menor sincronismo entre as séries. A relação entre as séries de vazão das estações analisadas pode ser observada por meio do gráfico de dispersão apresentado na Figura 2.

Conforme observado na Figura 2, há forte associação entre as séries, evidenciada pela concentração dos pontos ao longo de uma tendência definida, indicando elevado grau de coerência hidrológica entre as estações.

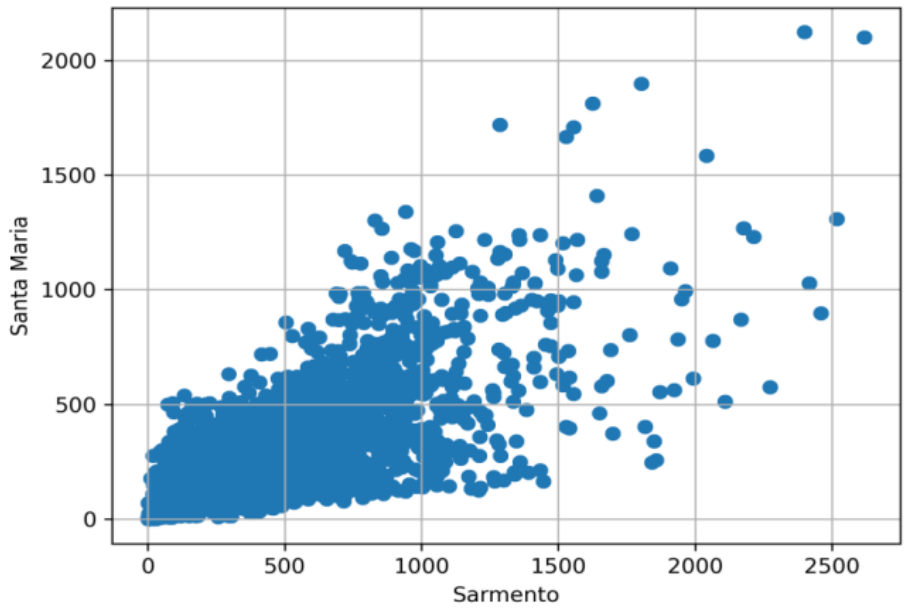


Figura 2: Correlação Sarmento X Santa Maria (r = 0,87).
Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

Embora as estações apresentem valores semelhantes de ICO (≈ 0,84), a análise integrada demonstrou diferenças no desempenho hidrológico. A estação Passo do Dias apresentou elevada completude, porém baixa estabilidade, enquanto Passo Santa Maria apresentou melhor equilíbrio entre os indicadores. A comparação entre os indicadores de confiabilidade das estações é apresentada na Figura 3.

Observa-se, na Figura 3, que embora os valores de ICO sejam semelhantes, existem diferenças significativas entre os indicadores de completude e consistência, evidenciando distintos desempenhos hidrológicos entre as estações analisadas.

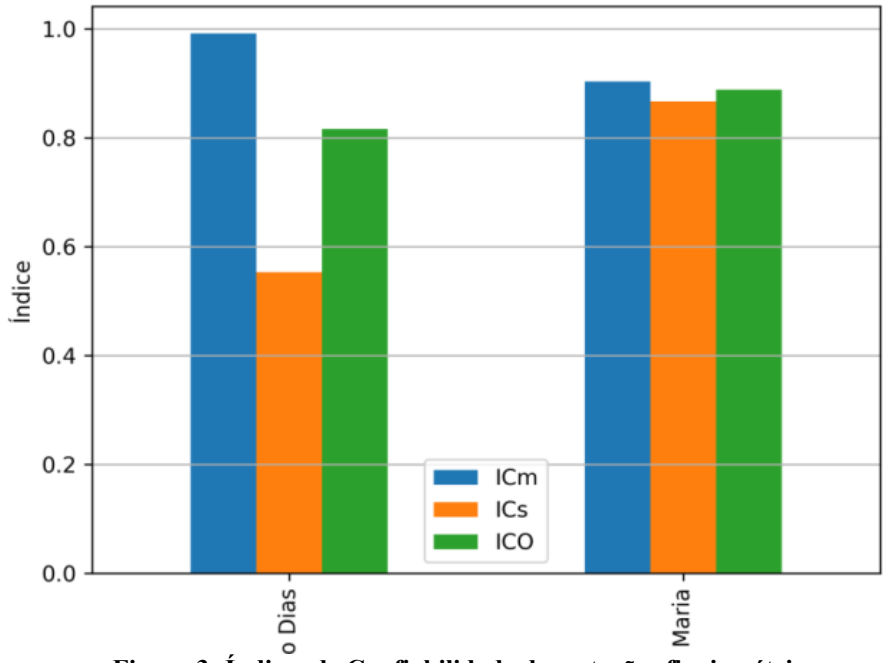


Figura 3: Índices de Confiabilidade das estações fluviométricas.
Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

A integração entre completude e consistência, expressa pelo índice composto (ICO), resulta em valores semelhantes entre as estações analisadas, porém com desempenhos hidrológicos distintos. A estação Passo Santa Maria apresenta melhor equilíbrio entre os indicadores, refletindo maior coerência hidrológica, enquanto a estação Passo do Dias, apesar da elevada completude, apresenta menor consistência e maior variabilidade no comportamento das séries.

Os resultados do teste de Pettitt indicaram mudanças estruturais nas séries, com destaque para a ocorrência de alterações no regime de vazões em torno de 1982 em todas as estações analisadas. Esse comportamento sugere a presença de modificações

no regime hidrológico em escala regional. Ressalta-se que o teste permite identificar alterações na estrutura das séries, porém a atribuição das causas dessas mudanças requer análise complementar de fatores climáticos e antrópicos.

Verifica-se, na Tabela 1, que as estações Passo do Sarmento e Passo do Dias apresentam elevada completude dos dados, com valores próximos de 1,00, enquanto a estação Passo Santa Maria apresenta menor disponibilidade de dados (≈ 0,82). Entretanto, a análise conjunta dos indicadores evidencia que a maior quantidade de dados não implica, necessariamente, maior confiabilidade, uma vez que a estação Passo do Dias apresenta menores valores de consistência (ICs ≈ 0,53), comprometendo a coerência hidrológica da série.

Indicadores de Confiabilidade e Dados

Estação	N (Cota/Vazão)	ICm	ICs	ICO	Pettitt (Cota)	Pettitt (Vazão)
Passo do Sarmento	30653 / 30623	0,999	-	-	31/05/1970	30/06/1982
Passo do Dias	30450 / 30389	0,992	0,53	0,81	31/05/1970	30/06/1982
Passo Santa Maria	25172 / 25111	0,820	0,86	0,84	30/06/1982	30/06/1982

Tabela 1: Síntese dos Índices de Confiabilidade.
Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

A integração entre completude e consistência, expressa pelo índice composto (ICO), resulta em valores semelhantes entre as estações (≈ 0,84), porém com desempenhos distintos. A estação Passo Santa Maria apresenta melhor equilíbrio entre os indicadores, enquanto a estação Passo do Dias, apesar da elevada completude, apresenta menor coerência hidrológica, ou seja, a confiabilidade das séries não depende apenas da quantidade de dados, mas da sua consistência e coerência hidrológica.
Os resultados obtidos reforçam a importância da utilização de abordagens integradas na avaliação da confiabilidade de séries hidrológicas, permitindo uma análise mais consistente e representativa do comportamento dos dados ao longo do tempo.

Considerações finais

A análise realizada demonstrou que a confiabilidade de séries hidrológicas deve ser avaliada de forma integrada, considerando simultaneamente a disponibilidade de dados, a consistência temporal, a coerência hidrológica e o grau de associação entre as séries. Nesse sentido, verificou-se que a utilização isolada de indicadores pode conduzir a interpretações incompletas, reforçando a necessidade de abordagens combinadas.

Os resultados evidenciaram que a estação Passo Santa Maria apresenta melhor desempenho hidrológico em relação à estação Passo do Dias, mesmo com menor completude dos dados, destacando a importância da consistência e da correlação entre séries como fatores determinantes na avaliação da confiabilidade. Por outro lado, a estação Passo do Dias, embora apresente elevada disponibilidade de dados, demonstrou menor estabilidade e coerência hidrológica, evidenciando limitações na qualidade da série.

A aplicação do teste de Pettitt indicou mudanças estruturais nas séries, com destaque para alterações no regime hidrológico em torno de 1982, observadas de forma consistente entre as estações analisadas. Esses resultados indicam a possibilidade de ocorrência de mudanças regionais no comportamento hidrológico, as quais devem ser consideradas em análises de longo prazo.

Adicionalmente, a análise de correlação mostrou-se fundamental para a interpretação dos resultados, permitindo identificar o grau de sincronismo entre as séries e reforçando a relação entre consistência estatística e coerência hidrológica. Dessa forma, a integração entre indicadores de desempenho, análise estatística e interpretação hidrológica mostrou-se uma abordagem robusta para a avaliação da qualidade dos dados.

Nesse contexto, a metodologia adotada apresenta potencial para aplicação em outras estações da rede hidrometeorológica, contribuindo para o aprimoramento de protocolos de monitoramento, manutenção e validação de dados. Além disso, os resultados obtidos fornecem subsídios importantes para a gestão de recursos hídricos, especialmente no que se refere à utilização de séries históricas confiáveis em processos de planejamento e tomada de decisão.

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. Os Autores agradecem ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua pelo apoio técnico científico aportado até o momento. Também, agradecemos à Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do Rio Grande do Sul – SEMA/RS pela cooperação, bem como à Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo apoio institucional.

Referências bibliográficas

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Guide to Hydrological Practices. Geneva: WMO, 2018.

TUCCI, Carlos E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Hidrologia básica. Brasília: ANA, 2017.

BEVEN, Keith J. Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. 2. ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2012.

CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R.; MAYS, Larry W. Applied Hydrology. New York: McGraw-Hill, 1988.

MAIDMENT, David R. (ed.). Handbook of Hydrology. New York: McGraw-Hill, 1993.

MAYS, Larry W. Water Resources Engineering. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

BRUTSAERT, Wilfried. Hydrology: An Introduction. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

NAGHETTINI, Mauro; PINTO, Éber José de Andrade. Hidrologia estatística. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos E. M. Ajuste e controle de qualidade de dados hidrológicos. Porto Alegre: UFRGS, 2008.

MCMILLAN, Hilary et al. Data uncertainty in hydrology: a review. Hydrological Processes, v. 26, p. 3373–3382, 2012.

MONTANARI, Alberto et al. “Panta Rhei—Everything Flows”: Change in hydrology and society. Hydrological Sciences Journal, v. 58, n. 6, p. 1256–1275, 2013.

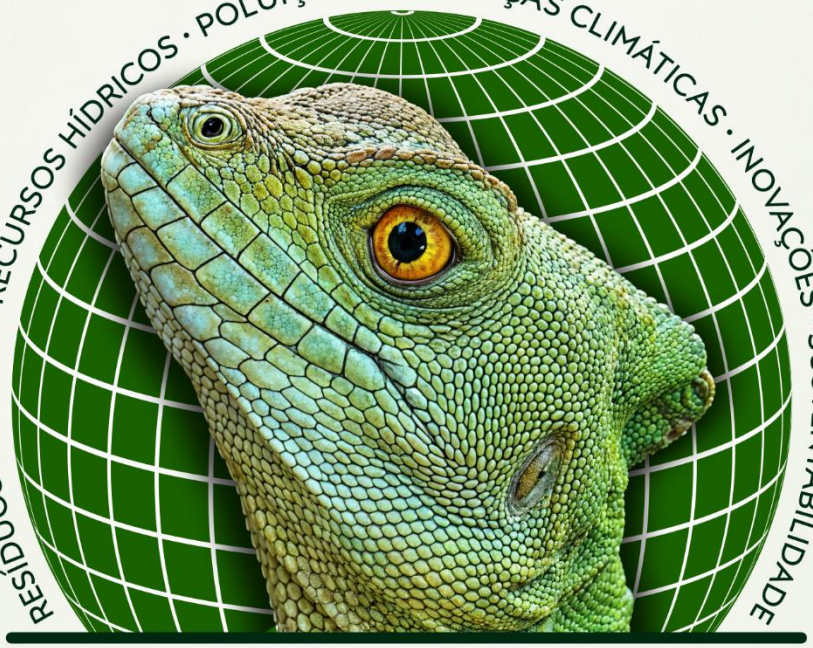
BLÖSCHL, Günter et al. Runoff prediction in ungauged basins. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.

KIANG, Julie E. et al. USGS guidelines for streamflow measurement uncertainty. U.S. Geological Survey, 2018.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2020. Brasília: ANA, 2020.

ÁREA TEMÁTICA 12

HIDROSSEDIMENTOLOGIA



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

PERDAS DE SOLO EM ÁREA DE PLANTIO DIRETO EM ESCALA DE ENCOSTA

1 Graziela Moraes de Cesare Barbosa, 2 Luiz Gustavo Fernandes Julião, 3 José Francirlei de Oliveira, 4 Rafael Jioconda Rodrigues, 5 Paola Rodrigues, 6 Peterson Almeida arcanjo dos Santos, 7 Ana Lucia Londero

1 IDR - Paraná, e-mail: graziela_barbosa@idr.pr.gov.br; 2 IDR - Paraná, e-mail: luizgustaveo.fernandesjuliao@gmail.com; 3 IDR - Paraná, e-mail: jfoliveira79@gmail.com; 4 IDR – Paraná, email: rafael.tecni@gmail.com; 5 IDR – Paraná, email: rodriguespaola2015@gmail.com; 6 IDR – Paraná, email: petersonasantoss@gmail.com; 7 IDR – Paraná, email: londeroanalucia@gmail.com

Palavras-chave: monitoramento hidrossedimentológico; erosão hídrica; sistema de manejo

Introdução

A erosão hídrica representa um dos principais processos de erosão do solo em escala global, podendo comprometer a sustentabilidade da produção agrícola e a segurança alimentar, principalmente em regiões tropicais, onde apresentam alta vulnerabilidade devido à combinação de solos mais frágeis, regimes de chuvas intensas e práticas indevidas de manejo. Além disso, as mudanças climáticas, intensificam esse processo ao aumentar a repetição de eventos extremos, como secas e inundações, agravando a perda de solo. De acordo com a FAO, cerca de 75 bilhões de toneladas de solo fértil de áreas cultivadas são transportadas pela chuva anualmente. Em países de forte aptidão agrícola, como o Brasil, a produção de cereais e grãos oleaginosos configura como um dos principais fatores associados às perdas expressivas de solo (Carr et al., 2021).

O advento do Sistema Plantio Direto (SPD) promoveu uma diminuição das perdas de solo por erosão hídrica. No entanto, problemas de erosão têm sido observados em várias áreas sob plantio direto no sul do Brasil, combinados à reduzida cobertura de resíduos culturais, à remoção de práticas mecânicas de controle do escoamento superficial (terraços), ao cultivo em declive e à compactação do solo, todos esses fatores intensificam a suscetibilidade à perda de solo (Didone et al., 2014).

A intensificação da degradação do solo em áreas de SPD podem ser quantificadas através do monitoramento dos processos hidrológicos e da produção de sedimentos no sistema hídrico de bacia hidrográfica (Figueiredo et al., 2024).

Projetos acompanhados sob condições controladas de monitoramento em parcelas experimentais e pequenas bacias hidrográficas, possibilitam compreender, de forma mais segura e integrada, os processos que controlam a relação entre práticas conservacionistas e a extensão das perdas de solo por erosão hídrica.

O objetivo desse trabalho é avaliar a perda de solo em duas diferentes parcelas sob plantio direto, uma com terraço e outra sem terraço, monitoradas por um período de aproximadamente 6 anos.

Material e Métodos

A unidade experimental fica alocada numa propriedade rural que está localizada no município de Cambé, Paraná, Brasil. Nessa área de estudo o produtor rural realiza as operações de semeadura, manejo fitotécnico e colheita dos grãos. O sistema de manejo do solo adotado é o de plantio direto, com cultivo de soja no verão e de milho segunda safra por mais de 20 anos. O solo é classificado no topo da encosta como Latossolo Vermelho e na meia encosta como Nitossolo. A declividade da encosta varia de 4% (topo) a 18% (na parte inferior). Na encosta dessa propriedade, foram instaladas duas parcelas pareadas de 2,67 ha, com a máxima semelhança topográfica possível. Em uma delas foram instalados terraços de infiltração (em nível) e a outra mantida sem terraços. A delimitação das parcelas foi realizada com a construção de camalhões de terra em seus limites laterais, superior e inferior (Figura 01). Ressalta-se que a alocação da calha no limite inferior é correspondente ao local onde o próximo terraço deveria ser implantado, representando portanto, a movimentação de água e solo entre terraços localizados na maior declividade da encosta.

O monitoramento hidrossedimentométrico é realizado na extremidade inferior das parcelas por meio de calhas do tipo "H", onde são determinadas as perdas de solo e água. Os dados de precipitação e vazão são coletados a cada 2 minutos, com auxílio de um pluviômetro de báscula e um linígrafo acoplado a um datalogger. A concentração de sedimentos em suspensão é determinada por meio de coletas manuais durante ascensão e recessão da vazão. A precipitação também é quantificada por meio de um pluviômetro *Ville de Paris,* o qual é utilizado na aferição do pluviômetro de báscula. A concentração de sedimentos em suspensão (CSS) é determinada pelo método da evaporação, adaptado pela APHA (American Public Health Association, 1999).

Nesse estudo, foram determinadas as seguintes variáveis: precipitação (P); intensidade máxima ($I_{máx}$) e em intervalos regulares de 30 minutos (I30); vazão máxima ($q_{máx}$); volume total de escoamento superficial (V_T); coeficiente de escoamento superficial (c); infiltração aparente (Ia), concentração máxima de sedimentos em suspenção ($CSS_{máx}$) e perda total de solo (PS).



Figura 01: Imagem aérea das parcelas de 2,67 ha cada uma, com e sem sistema de terraceamento, instaladas numa encosta agrícola no município de Cambé, Paraná, Brasil.
Fonte: Grupo de Pesquisa em Ciências do Solo – IDR-Paraná (2022)

Resultados e Discussão

No período de 2019 a 2025 foram monitorados 77 eventos de chuva-vazão, sendo que na parcela com terraço (PCT) houve escoamento em 36 eventos e na parcela sem terraço (PST) houve escoamento superficial em 41 eventos. Essa diferença de eventos entre as parcelas é função da ausência de escoamento na PCT nos menores eventos de chuva-vazão. Na Tabela 1 estão apresentadas as variáveis de precipitação, vazão e produção de sedimentos do maior evento de chuva de cada ano (2019 a 2025).

Ano	Local	P	$I_{máx}$	I30	$q_{máx}$	V_T	C	Ia	$CSS_{máx}$	PS	PS
		mm	$mm.h^{-1}$		$L.s^{-1}$	mm	%	mm	$g.L^{-1}$	$kg.parcela^{-1}$	$kg.m^{-2}$
2019	PCT	151,40	59,90	95,26	22,29	0,90	0,91	150,50	4,76	87,88	0,00340
	PST				23,60	1,41	0,93	149,99	8,32	179,57	0,00695
2020	PCT	67,90	255,36	73,92	4,29	0,30	0,44	67,60	1,31	2,53	0,00010
	PST				9,97	1,19	1,76	66,71	1,51	5,29	0,00021
2021	PCT	41,99	204,44	65,69	32,18	7,63	28,26	19,37	0,46	0,34	0,00001
	PST				89,54	6,51	15,49	35,48	2,61	151,08	0,00592
2022	PCT	73,50	253,46	103,02	42,26	1,41	2,50	72,09	7,21	109,37	0,00429
	PST				242,08	14,71	41,02	58,79	22,91	4510,81	0,17682
2023	PCT	47,07	102,81	62,58	12,92	0,47	1,55	46,85	0,14	0,88	0,00003
	PST				147,51	8,25	25,33	46,46	8,29	1030,56	0,03990
2024	PCT	49,15	138,55	67,37	48,33	1,82	4,28	47,78	11,42	122,12	0,00473
	PST				319,94	21,02	47,67	43,59	17,50	26384,95	1,02144
2025	PCT	70,00	304,7	115,1	23,1	1,6	3,1	69,4	14,6	10,0	0,00039
	PST				122,5	8,9	17,2	67,3	12,5	415,9	0,01610

Tabela 01. Valores máximos de precipitação (P), intensidade (Imáx), vazão (qmax), volume escoado (Vt), coeficiente de escoamento (C), infiltração aparente (Ia), concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e perda de solo (PS) dos maiores eventos de chuva-vazão monitorados em cada ano do período de 2019 a 2025.

O maior volume de precipitação ocorreu num evento em 2019, com um volume total de 151,40 mm, no entanto, a maior intensidade em 30 minutos consecutivos (I30) ocorreu em um evento em 2025 com 115,1 mm h^{-1} e intensidade máxima instantânea de 304,7 mm h^{-1} (Tabela 01). Nesses eventos a perda total de solo (2019 e 2025) na PST, foram respectivamente de 179,57 e 415,9 kg $parcela^{-1}$, enquanto na PCT, foram respectivamente de 87,88 e 10 kg $parcela^{-1}$.

Na Tabela 02, são apresentadas as correlações entre as variáveis de precipitação, vazão e perda de solo na parcela PCT. Nessa parcela, as perdas de água estão relacionadas ao $I_{máx}$ e as perdas de solo (total ou por área) com o volume de precipitação e a máxima vazão e concentração de sedimentos em suspensão.

No período monitorado, a presença de terraços controlou o escoamento superficial, principalmente, pela redução do comprimento de rampa e, consequentemente, da velocidade e poder de cisalhamento do fluxo superficial, o que reduz CSS no fluxo superficial. A quantidade de solo perdida na PCT demostra a fragilidade do manejo do solo e o potencial assoreamento dos canais dos terraços em áreas de PD. Assim, observa-se a deficiência de proteção da superfície do solo na utilização de sucessão de soja no verão e milho segunda safra.

	P	$I_{máx}$	I30	$q_{máx}$	V_T	C	Ia	$CSS_{máx}$	PS
	mm	$mm.h^{-1}$		$L.s^{-1}$	mm	%	mm	$g.L^{-1}$	$kg.m^{-2}$
P mm	1								
Imáx $mm.h^{-1}$	0,326	1							
I30 $mm.h^{-1}$	0,751	0,735	1						
$q_{máx}$ $L.s^{-1}$	0,391	0,437	0,457	1					
Vt mm	0,117	0,407	0,127	0,579	1				
C %	-0,038	0,340	-0,011	0,428	0,969	1			
Ia mm	0,999	0,308	0,748	0,365	0,070	-0,084	1		
$CSS_{máx}$ $g.L^{-1}$	0,058	-0,207	-0,076	0,390	0,101	-0,023	0,053	1	
PS $kg.m^{-2}$	0,429	-0,022	0,239	0,599	0,167	0,045	0,423	0,675	1

Tabela 02. Correlação entre as variáveis precipitação (P), intensidade máxima (Imax), vazão (qmax), volume escoado (Vt), coeficiente de escoamento (C), infiltração aparente (Ia), concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e perda de solo (PS) monitorados em 77 eventos durante os anos de 2019 a 2025 na parcela com terraço (PCT).

Em contrapartida, na parcela sem terraços, a perda de água está diretamente relacionada à vazão máxima produzida e a perda de solo (total ou por área) está relacionada ao processo erosivo da parcela (vazão máxima, volume total e coeficiente de escoamento) e sem relação direta com as características dos eventos de chuva (Tabela 03).

	P	$I_{máx}$	I30	$q_{máx}$	V_T	C	Ia	$CSS_{máx}$	PS
	mm	$mm.h^{-1}$		$L.s^{-1}$	mm	%	mm	$g.L^{-1}$	$kg.m^{-2}$
P mm	1								
Imáx $mm.h^{-1}$	0,279	1							
I30 $mm.h^{-1}$	0,416	0,883	1						
$q_{máx}$ $L.s^{-1}$	0,232	0,225	0,373	1					
Vt mm	0,233	0,181	0,317	0,978	1				
C %	0,084	0,024	0,169	0,897	0,931	1			
Ia mm	0,982	0,252	0,366	0,049	0,045	-0,094	1		
$CSS_{máx}$ $g.L^{-1}$	0,318	0,199	0,361	0,810	0,780	0,740	0,175	1	
PS $kg.m^{-2}$	0,140	0,176	0,230	0,723	0,645	0,553	0,018	0,423	1

Tabela 03. Correlação entre as variáveis precipitação (P), intensidade (Imax), vazão (qmax), volume escoado (Vt), coeficiente de escoamento (C), infiltração aparente (Ia), concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e perda de solo (PS) monitorados em 77 eventos durante os anos de 2019 a 2025 na parcela sem terraço (PST).

Os resultados das tabelas 2 e 3 demonstram que a utilização de terraços modifica a relação de perda de solo e água na encosta, onde as variáveis relacionadas ao manejo e erodibilidade podem atuar mais intensamente na perda de solo e água na parcela sem terraços e as características de erosividade na parcela com terraços.

Considerações Finais

A área de estudo em encosta agrícola com e sem os terraços, podem apresentar respostas hidrológicas distintas, mesmo sob a mesma precipitação e intensidade de chuva. O uso dos terraços é uma prática conservacionista importante, porém, a perda de solo medida nessas áreas entre os terraços, indicam a necessidade de um manejo adequando. O comportamento hidrológico na parcela com terraço (PCT) está relacionado diretamente pelas características da chuva, ou seja, a precipitação total e a intensidade média em 30 minutos. A perda de solo e água na parcela sem terraços (PST), foi influenciada pela variável hidrológica vazão (vazão máxima) e volume total de escoamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Araucária, Secretaria de Estado da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior (SETI) e ao Sistema FAEP/SENAR pelo apoio financeiro e ao Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná - IAPAR-EMATER (IDR-Paraná) pelo desenvolvimento da pesquisa científica e CNPq.

Referências Bibliográficas

APHA - American Public Health Association. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20th ed. Washington, DC: APHA, AWWA, WEF, 1999

DIDONÉ, E. J. et al. Impacto de sistemas agrícolas de plantio direto na produção de sedimentos em duas grandes bacias hidrográficas no sul do Brasil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, n. 7, p. 1287-1297, 2014.

FIGUEIREDO, R. de O. et al. Monitoramento Hidrológico em Bacias Agrícolas. **In**: MORANDI, M. A. B. et al. (EDITORES). Agricultura & Meio Ambiente: a busca pela sustentabilidade. Brasília. Editora: EMBRAPA, 2024. p. 451 – 485

CARR, T. W. et al. The impact of water erosion on global maize and wheat productivity. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. v. 322, 2021.

OCORRÊNCIA DE MICROPLÁSTICOS EM SEDIMENTOS DO LAGO PARANOÁ – BRASÍLIA, DF

1 Luiza dos Santos Ferreira, 2 Adriano Domingos dos Reis, 3 Elder Yokoyama

1 Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia e-mail:luiza.sferreiraa@gmail.com; 2 Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia, e-mail: adriano.reis@unb.br;3 Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, e-mail: eyokoyama@unb.br.

Palavras-chave: microplástico; sedimento lacustre; Lago Paranoá

Introdução

A presença de microplásticos em ambientes aquáticos continentais tem se tornado uma preocupação crescente devido à sua persistência, ampla distribuição e potencial impacto ambiental. Microplásticos são definidos como partículas plásticas com diâmetro de 0,001 a 5,0 mm (1-5000 µm), compostas por polímeros orgânicos sintéticos oriundos da indústria petroquímica, sendo originados tanto de fontes primárias quanto secundárias, devido à fragmentação de materiais maiores (Crawford e Quinn, 2017; Cera, 2020; Kibria *et al.,* 2021; Hashmi, 2022). São comumente classificados com base nos critérios de origem, material, tamanho e formato (Figura 1; Rani-Borges *et al.*, 2022). Em sistemas lênticos, como lagos e reservatórios urbanos, a baixa energia hidrodinâmica favorece processos de deposição e retenção de partículas, tornando os sedimentos importantes compartimentos de acumulação desses contaminantes (Eriksen *et al.,* 2013; Dusaucy *et al.,* 2021).

O comportamento dos microplásticos em ambiente lacustre está diretamente relacionado à dinâmica de transporte, à floculação e à deposição de partículas finas. A interação entre microplásticos e sedimentos naturais, especialmente silte e argila, pode influenciar processos como agregação e sedimentação diferencial, condicionando sua distribuição espacial e seu registro estratigráfico (Cole *et al.,* 2011; Choi *et al.*, 2019). Portanto, a investigação desses materiais no registro sedimentar permite identificar sua ocorrência e compreender os mecanismos físicos que controlam seu acúmulo ao longo do tempo.

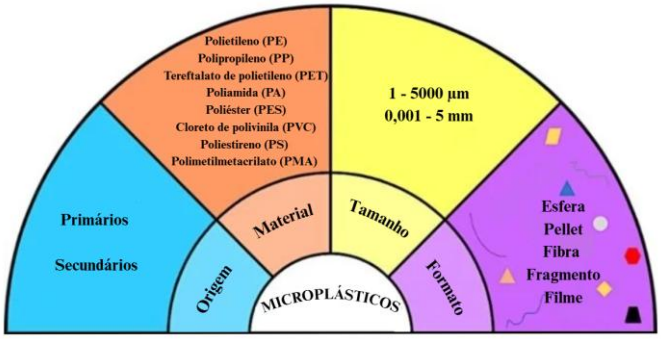


Figura 01: Classificações mais comuns de microplásticos quanto a origem, material, tamanho e formato. Fonte: Adaptado de RANI-BORGES *et al.,* (2022).

O Lago Paranoá, localizado no Distrito Federal (Figura 2), é um reservatório artificial formado pelo barramento do rio Paranoá e apresenta múltiplos usos, incluindo geração de energia, lazer e diluição de efluentes. O sistema é composto por diferentes braços associados às principais sub-bacias de drenagem, destacando-se os braços do Riacho Fundo, a sudoeste; Ribeirão do Torto, ao norte; Bananal, a noroeste; e Gama, ao sul/sudeste. Esses compartimentos apresentam distintas características de uso e ocupação do solo, influenciando diretamente os padrões de aporte sedimentar e dinâmica deposicional. Estudos recentes indicam a presença de microplásticos na coluna d'água do Lago Paranoá (Alves, 2024), porém ainda existem lacunas quanto à sua deposição e preservação no registro sedimentar.

Este trabalho tem como objetivo principal investigar a ocorrência de microplásticos em sedimentos do braço Riacho Fundo, região próxima a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Sul e fortemente influenciado por ações antrópicas. O estudo adota uma abordagem integrada entre caracterização sedimentológica, relações estratigráficas e identificação de microplásticos, buscando contribuir para a compreensão dos processos hidrossedimentares que controlam a deposição dessas partículas em ambientes lacustres urbanos.

Nesta perspectiva, a caracterização de microplástico no sedimento do Lago Paranoá representa uma etapa essencial para compreender a história recente de poluição plástica nesse reservatório, contribuir com o desenvolvimento científico sobre o tema e subsidiar futuras estratégias de monitoramento ambiental.

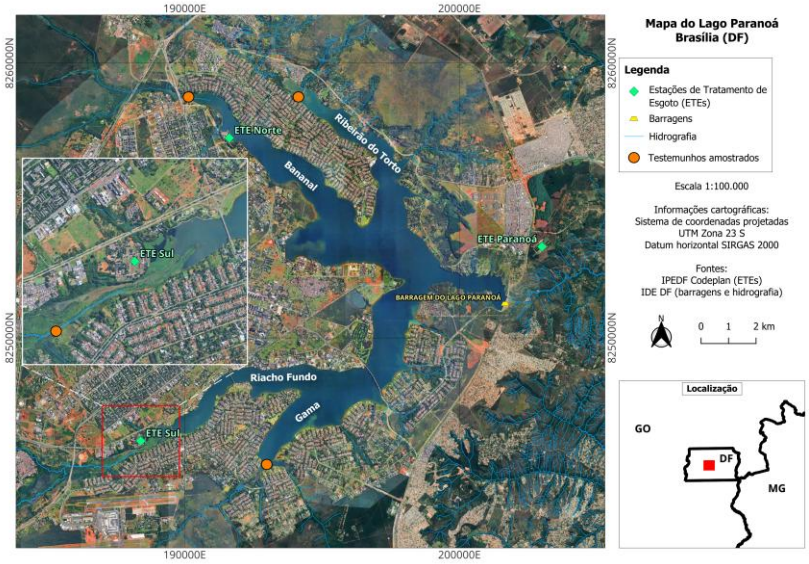


Figura 02: Mapa de localização do Lago Paranoá, no Distrito Federal, com representação da rede hidrográfica, barragem, estações de tratamento de esgoto, pontos dos testemunhos amostrados e destaque para o braço Riacho Fundo, área foco deste estudo. Fonte: Autores (2025), com base em imagem de satélite Google Earth (2025).

Material e Métodos

Uma revisão bibliográfica sistemática foi realizada com foco nas metodologias aplicadas à investigação de microplásticos em sedimentos, especialmente quanto às técnicas de amostragem, separação física, digestão química e caracterização. Os estudos analisados evidenciam grande variabilidade nos protocolos utilizados, reforçando a necessidade de validação metodológica específica para cada tipo de matriz e de ambiente de estudo (Cera *et al.,* 2020).

A área de estudo compreende o braço Riacho Fundo do Lago Paranoá, localizado nas proximidades da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Sul. O procedimento metodológico adotado neste estudo compreendeu duas etapas principais: (i) descrição sedimentológica e análise de fácies e (ii) preparo e fracionamento granulométrico das amostras para análises posteriores.

As amostras sedimentares foram obtidas em testemunhos de sondagem, permitindo a análise vertical dos depósitos. Os testemunhos foram seccionados com auxílio de serra elétrica portátil. Em laboratório, as amostras foram inicialmente descritas sob lupa, com registro de parâmetros sedimentológicos como cor, tamanho de grão, textura e relações estratigráficas, possibilitando a elaboração de perfis colunares estratigráficos.

A Figura 03 ilustra por meio de fluxograma as etapas subsequentes de preparo das amostras. Realizou-se a amostragem individual das fácies, desagregação por maceração em gral e pistilo de ágata e peneiramento. O peneiramento granulométrico, resultou na separação de seis frações modais: >500 µm; 500–250 µm; 250–180 µm; 180–125 µm; 125–63 µm; e <63 µm. A fração granulométrica mais fina (<63 µm) foi analisada em granulômetro a laser, permitindo a quantificação das proporções de silte e argila.

A triagem preliminar de microplásticos foi realizada por inspeção visual sob lupa, considerando critérios morfológicos como forma, cor e tamanho, conforme descrito na literatura. A etapa de digestão química da matéria orgânica e fração mineral constitui fase subsequente do protocolo metodológico, não contemplada na presente análise.

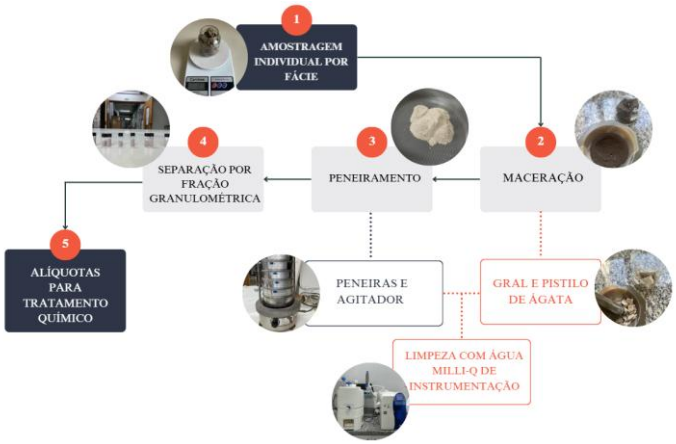


Figura 03: Fluxograma das etapas de preparo das amostras e separação granulométrica. Fonte: Autores (2026).

Resultados e Discussão

A análise sedimentológica e estratigráfica dos testemunhos coletados nos braços Riacho Fundo, Ribeirão do Torto, Bananal e Gama do Lago Paranoá evidencia contrastes composicionais e texturais entre os diferentes compartimentos deposicionais do sistema, observados nos perfis estratigráficos (Figura 04). O braço Riacho Fundo (500 cm), perfil mais espesso entre os analisados, apresenta maiores intervalos de sedimentos finos compostos por heterolitos (intercalações de camadas milimétricas a centimétricas de areia fina a silte), com intercalações arenosas centimétricas. O braço Ribeirão do Torto (400 cm) apresenta alternância entre heterolitos e níveis arenosos com espessuras centimétricas a decimétricas. Em contraste, os braços Bananal (100 cm) e Gama (130 cm) mostram perfis relativamente mais arenosos, representados principalmente por areia quartzosa e areia carbonosa, com níveis finos restritos a camadas centimétricas. Essas diferenças sugerem distintos regimes hidrodinâmicos e padrões de aporte sedimentar entre os braços do reservatório, refletindo a influência das sub-bacias contribuintes, da morfologia local e da energia de transporte atuante em cada setor.

O braço Riacho Fundo, foco principal deste estudo, apresenta sucessão estratigráfica marcada pela predominância de sedimentos finos, intercalados por níveis arenosos ao longo do perfil. Destacam-se intervalos heterolíticos caracterizados pela alternância entre silte, argila e areia muito fina, com predomínio da fração argilosa. A ocorrência de camadas de areia argilosa, carbonosa e quartzosa indica variações nas condições deposicionais, relacionadas a episódios de maior aporte sedimentar resultantes de pulsos hidrodinâmicos mais energéticos. Essa arquitetura estratigráfica sugere fases de decantação de material fino intercaladas com eventos episódicos de transporte e deposição de sedimentos mais grossos, sendo compatível com dinâmica deposicional de sistema deltaico associado ao aporte do tributário Riacho Fundo no Lago Paranoá.

Durante a descrição dos sedimentos do testemunho do Riacho Fundo, foram identificados dois tipos principais de microplásticos: fibras (rosa e azul) e fragmento vermelho. Essas partículas ocorreram em níveis arenosos compreendidos entre 470 cm e 360 cm de profundidade. A associação preferencial com frações mais grossas pode estar relacionada à incorporação mecânica dessas partículas durante eventos deposicionais específicos ou ao retrabalhamento sedimentar local. A presença de microplásticos em porções profundas do testemunho sugere aportes pretéritos vinculados à ocupação urbana e às atividades antrópicas na bacia contribuinte.

As próximas etapas da pesquisa incluem o tratamento químico das alíquotas, utilizando peróxido de hidrogênio para digestão da matéria orgânica e reagentes acidificantes para dissolução da fração inorgânica. Após esse procedimento, o produto residual será analisado em lâmina por microscopia óptica, visando identificar e caracterizar morfologicamente os microplásticos encontrados.

De forma integrada, os resultados indicam que os sedimentos do Lago Paranoá registram a interação entre processos lacustres e fluviais, expressa pela alternância entre depósitos finos e níveis arenosos ao longo dos perfis. Predominam sedimentos compostos por silte e argila, típicos de condições deposicionais de baixa energia em ambiente lacustre, intercalados com aportes episódicos de material mais grosso. No braço Riacho Fundo, essa organização estratigráfica sugere dinâmica compatível com sistema deltaico associado ao aporte tributário local. Essa associação entre matriz fina e pulsos arenosos reflete a dinâmica hidrossedimentológica do sistema e influencia diretamente a retenção, soterramento e distribuição de contaminantes particulados, como os microplásticos.

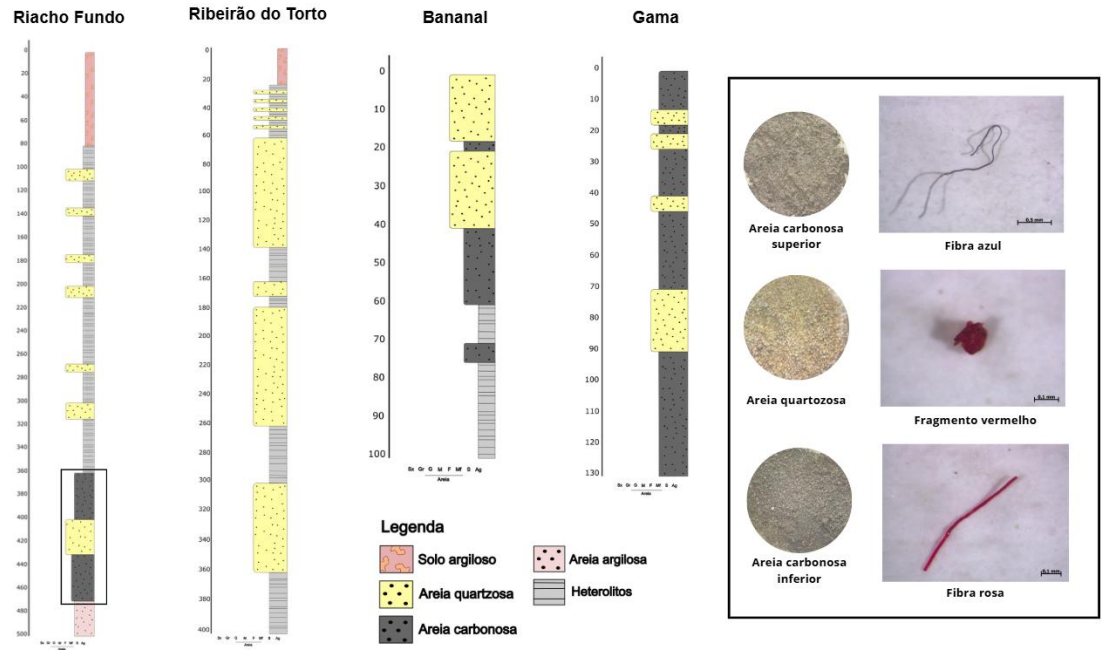


Figura 04: Perfis estratigráficos dos braços do Lago Paranoá com representação das principais fácies sedimentares identificadas. Em destaque, registro de microplástico do tipo fibra e fragmento encontrado no testemunho do braço Riacho Fundo. Fonte: Autores (2026).

Considerações Finais

Os resultados evidenciam a presença preliminar de microplásticos nos sedimentos do Lago Paranoá, especialmente associadas a níveis arenosos do braço Riacho Fundo, indicando que a dinâmica hidrossedimentológica pode exercer influência direta na deposição e preservação desses contaminantes. A abordagem metodológica adotada mostrou-se eficiente para a triagem inicial e para a integração entre análise sedimentológica e investigação ambiental, embora etapas complementares, como digestão química e caracterização espectroscópica, sejam necessárias para validação completa do protocolo. O estudo contribui para o avanço das pesquisas sobre microplásticos em ambientes lacustres urbanos no Brasil e fornece subsídios para o desenvolvimento de protocolos analíticos aplicáveis a sedimentos continentais e ações futuras de monitoramento ambiental.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF), à Universidade de Brasília (UnB) e à organização do 5º Congresso Internacional de Engenharia Ambiental pelo incentivo à pesquisa, apoio institucional e promoção da divulgação científica.

Referências Bibliográficas

ALVES, Isabella de Oliveira. Microplásticos nas águas do Lago Paranoá: da coleta à caracterização. 2024. Dissertação (Mestrado em Química) — Instituto de Química, Universidade de Brasília, Brasília, 2024.

CERA, Alessandra; CESARINI, Giulia; SCALICI, Massimiliano. Microplastics in freshwater: what is the news from the world? Diversity, v. 12, n. 7, p. 276, 2020.

CHOI, Y. et al. Interaction of microplastics with natural particles in aquatic environments: Aggregation, settling, and re-suspension. Environmental Pollution, v. 247, p. 390-399, 2019.

COLE, M. et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. Marine Pollution Bulletin, v. 62, n. 12, p. 2588-2597, 2011.

CRAWFORD, C. B.; QUINN, B. Microplastic pollutants. Amsterdam: Elsevier Inc., 2017

DUSAUCY, Julia et al. Microplastic pollution of worldwide lakes. Environmental Pollution, v. 284, p. 117075, 2021.

ERIKSEN, Marcus et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes. Marine pollution bulletin, v. 77, n. 1-2, p. 177-182, 2013.

HASHMI, M. Z. (Ed.). Microplastic Pollution: Environmental Occurrence and Treatment Technologies. Springer Nature, 2022.

KIBRIA, G. ; HAROON, A. K. Y. ; ROSE, G. ; HOSSAIN, M. M. M. ; NUGEGODA, D. Pollution risks, impacts and management: social, economic and environmental perspectives. Jodhpur: Scientific Publishers, 2021. ISBN 9789389184969. 2021

RANI-BORGES, Bárbara; VICENTE, Eduardo; POMPÊO, Marcelo. Plásticos e microplásticos: poluição em reservatórios. In: POMPÊO, Marcelo; MOSCHINI-CARLOS, Viviane; LÓPEZ-DOVAL, Juan Carlos (org.). *Aspectos da ecotoxicidade em ambientes aquáticos*. 2022. p. 9.

DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA DESCARGA SÓLIDA DE FUNDO NO RIO CUIABÁ: DO PLANALTO À PLANÍCIE PANTANEIRA

1 Luiza Lima Sales, 2 Gabriella Nogueira de Lima, 3 Rosielly Rodrigues Cardoso, 4 Geisiane Barbosa do Carmo, 5 Ibraim Fantin da Cruz

1 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: luiza.sales@sou.ufmt.br; 2 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: gabriella.lima@sou.ufmt.br; 3 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: rosielly.rodrigues08@gmail.com; 4 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: geisiane.barbosa.esa@gmail.com; 5 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: ibraimfantin@gmail.com;

Palavras-chave: Transporte; Bacia Hidrográfica; Erosão;

Introdução

O comportamento sedimentar em ambientes fluviais é essencial para preservar os processos ecológicos, geomorfológicos e hidrológicos que garantem a sustentação dos ecossistemas aquáticos (Downs; Piégay, 2019). Nesse contexto, o material sedimentar é definido como o produto sólido resultante dos processos de erosão, transporte e deposição, cuja dinâmica molda a forma e o comportamento do canal fluvial (Carvalho *et al*., 2000). Por essa razão, a sua compreensão é fundamental para o planejamento e a gestão eficaz dos recursos hídricos (Walczak *et al*., 2018).

Dentre as frações que compõem esse material, destaca-se o sedimento de leito, ou carga de fundo, objeto de estudo desta pesquisa, definido pelo seu modo de transporte junto ao fundo do canal, como saltação ou rolamento (Carvalho *et al*., 2000). Seu comportamento responde a fatores climáticos, hidrológicos e antrópicos, como precipitação e atividades antrópicas na bacia hidrográfica (Wohl; Scott, 2017).

O regime resultante dessas interações naturais e antrópicas é regida por variações espaciais e temporais ao longo da bacia hidrográfica. Temporalmente, o processo apresenta forte sazonalidade, concentrando de 70% a 90% do volume anual de sedimentos transportados durante o período chuvoso (Oliveira; Martins, 2021). Além disso, essa dinâmica varia espacialmente ao longo do sistema fluvial, aspecto observado no estudo conduzido na bacia do Rio Cuiabá em 2024, que utilizou oito pontos de monitoramento com campanhas trimestrais para quantificar essas oscilações (Cardoso; Fantin-Cruz, 2025).

Alterações nos regimes sedimentares e na morfologia dos canais, provocadas por ações antrópicas, têm impactado grande parte dos sistemas fluviais globais (Ekka *et al*., 2020). No que tange à bacia do Rio Cuiabá, localizada no estado de Mato Grosso, grande parte de seu território reflete os impactos decorrentes da ocupação desordenada do solo, especialmente no que diz respeito ao assoreamento de corpos hídricos, problema agravado pela ausência de planejamento ambiental e pela fiscalização deficiente (Figueiredo *et al*., 2018).

Nesse contexto, o monitoramento da carga de fundo no Rio Cuiabá se torna essencial para a compreensão da sua dinâmica hidrossedimentológica e os efeitos das ações antrópicas. O presente estudo visa analisar as variações espaço-temporais desses parâmetros ao longo dos anos de 2024 e 2025. Os resultados observados são quantificados por meio de diagramas de *box plot* (Figuras 2 e 3), fornecendo subsídios consistentes para a gestão ambiental e o planejamento de ações mitigadoras.

Material e Métodos

Área de estudo

A área de estudo abrange a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá (BHRC), localizada no estado de Mato Grosso, fazendo parte da Bacia Hidrográfica do Rio Paraguai (Krolow, 2024). Seguindo a classificação climática de Köppen, o clima é caracterizado como tropical semiúmido, marcado por sazonalidade distinta, com inverno seco e verão chuvoso (Figueiredo *et al*., 2018). O período seco ocorre de maio a setembro, enquanto a estação chuvosa vai de outubro a abril.

A BHRC é constituída por duas unidades geomorfológicas fundamentais e complementares. O planalto, que se origina no Planalto dos Guimarães, apresenta relevo declivoso e rios de elevada energia, sendo o principal responsável por fornecer água e sedimentos para a bacia. Já a planície, que deságua no Pantanal Mato-Grossense, é caracterizada por sua topografia rebaixada e plana, apresentando meandros e feições aluviais que atuam como o principal ambiente de deposição do material sedimentar (Lima *et al*., 2022; Pupim, 2014).

O estudo foi realizado em 7 pontos de monitoramento ao longo do rio Cuiabá, distribuídos estrategicamente por todo seu curso conforme mostrado no mapa abaixo (Figura 1), uma vez que já existem estações fluviométricas em operação realizando análises de qualidade da água. Os pontos localizados nas áreas de planalto da bacia são: Manso Jusante no município de Chapada dos Guimarães, Marzagão no município de Rosário Oeste, Acorizal, Passagem da Conceição no município de Várzea Grande e Santo Antônio. Os pontos localizados na planície alagável da região do Pantanal são: Porto Cercado e Porto Jofre.

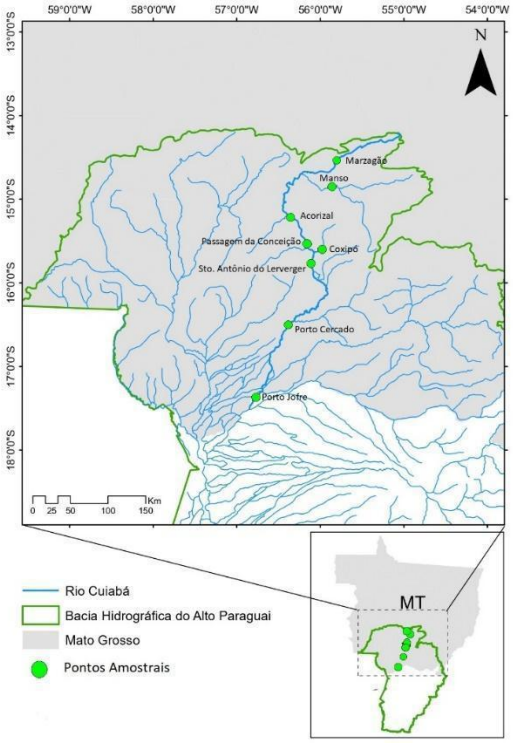


Figura 01: Localização da área de estudo e dos pontos de coleta na bacia hidrográfica do Rio Cuiabá. Fonte: Autoral (2026).

Amostragem e análise de sedimento de fundo

Foram realizadas 8 campanhas de coletas, distribuídas trimestralmente entre 2024 e 2025, totalizando 8 amostras por ponto, com o objetivo de captar as variações sazonais da região e proporcionar uma caracterização abrangente do transporte de sedimentos. A amostragem seguiu a metodologia de Carvalho (2008) para coletar três frações do leito, sendo a carga de arrasto, material constituinte do fundo e sedimento próximo ao fundo não captado por métodos tradicionais, assegurando uma análise representativa do ambiente.

As amostras foram coletadas utilizando o amostrador *Helley-Smith*, adotando-se o método de amostragem de Igual Incremento de Descarga (IID). Essa abordagem permite definir os pontos de amostragem com base na descarga líquida, contemplando a variação da vazão e da concentração de sedimentos ao longo da seção transversal (Carvalho, 2008).

Por fim, as amostras obtidas de cada ponto são acondicionadas em sacos plásticos e transportadas para análise ao Laboratório de Hidrossedimentologia do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMT, sob a coordenação de professor Dr. Ibraim Fantin da Cruz.

Todos os procedimentos laboratoriais, assim como o cálculo da descarga solida sólida de fundo, seguem as metodologias descritas por Carvalho (2008), garantindo a padronização dos resultados obtidos.

Resultados e Discussão

Variabilidade Temporal da Descarga Sólida de Fundo

A análise da variabilidade temporal (Figura 2) revela maiores valores de descarga de sedimentos de leito (qsf) nos meses de janeiro e abril de 2025, apresentando medianas de aproximadamente 0,45 kg/d.m e 0,18 kg/d.m, respectivamente. Tais meses coincidem com o período chuvoso da região (Figueiredo et al., 2018), coincidindo com a teoría de que o incremento das precipitações intensifica o escoamento superficial e potencializa a dinâmica hidrossedimentológica do sistema (Zhang *et al*., 2009).

Nesses períodos, observa-se também grandes amplitudes interquartil e dispersão dos dados, com valores de descarga que variam, aproximadamente, de um mínimo de 0,0006 kg/d.m a um máximo de 0,50 kg/d.m em janeiro, e de um mínimo de 0,006 kg/d.m a um máximo de 0,60 kg/d.m em abril, comportamento similar ao observado no mesmo período de 2024. Em consonância com os achados de Flores (2011), essa ampla variação indica possivelmente que o incremento do escoamento superficial e da vazão líquida potencializa a capacidade de mobilização de sedimentos de leito.

As campanhas de julho e setembro de 2025, correspondentes ao período de menor precipitação, apresentam os menores valores medianos de descarga sólida, estimados em aproximadamente 0,0007 kg/d.m e 0,0050 kg/d.m, respectivamente. Esta redução, possivelmente reflete a baixa energia do fluxo durante a estiagem, que é insuficiente para conseguir manter as elevadas taxas de transporte por arrasto. Esse comportamento está em consonância com a literatura hidrossedimentológica, a qual indica que a capacidade de transporte de sedimentos é diretamente proporcional à vazão e à energia hidráulica do escoamento, apresentando valores reduzidos em períodos de baixa descarga (Stevaux; Latrubesse, 2017).

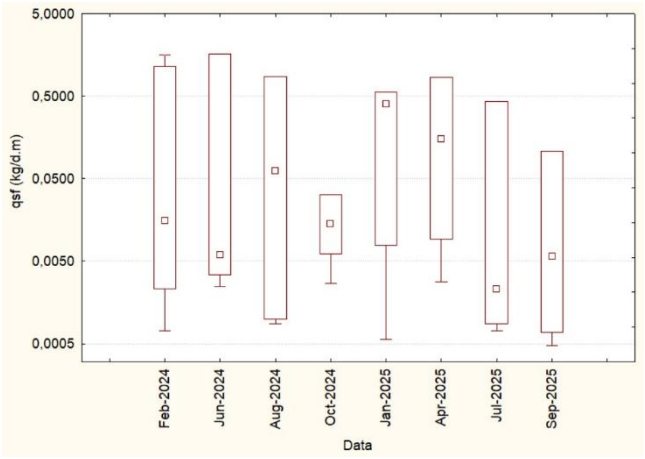


Figura 02: Análise temporal da descarga sólida de fundo por meses de amostragem.
Fonte: Autoral (2026).

Dessa forma, os resultados da análise temporal da descarga de sedimentos de fundo, refletem o comportamento hidrossedimentar característico da bacia do Rio Cuiabá. A correlação direta entre o regime sazonal e o transporte de sedimentos valida as observações de Stevaux e Latrubesse (2017) sobre rios tropicais, demonstrando que a disponibilidade de energia no canal dita a intensidade do transporte sedimentar.

Variabilidade Espacial da Descarga Sólida de Fundo

No que se refere a variabilidade espacial (figura 3), os resultados evidenciam um comportamento distinto entre os trechos de planalto e a planície pantaneira. Nos pontos localizados nas áreas de planalto, como Marzagão, a descarga sólida de fundo manteve-se em ordens de magnitude inferiores em relação aos outros pontos, frequentemente abaixo de 0,0050 kg/d.m. Esse comportamento é típico de áreas de produção e fornecimento de sedimentos, onde, a despeito da maior energia do fluxo, encontram-se menores taxas acumuladas de sedimentos de leito (Carvalho, 2008).

Imediatamente a jusante da UHE Manso, os valores médios de descarga foram consistentemente inferiores aos demais, com média de aproximadamente de 0,0016 kg/d.m. Na análise do gradiente longitudinal, esse resultado, possivelmente, indica retenção de sedimentos pelo barramento e a quebra da conectividade sedimentar, conforme previsto por Jardim et al. (2020). Essa dinâmica está em consonância com os achados de Fantin-Cruz et al. (2020), que constataram uma redução de 62% na carga de sedimentos do Rio Cuiabá devido à hidrelétrica

Contudo, é notável o aumento expressivo no transporte de fundo a partir do ponto Santo Antônio, com os maiores valores registrados em Porto Cercado e Porto Jofre. Esse comportamento está associado à transição morfológica da bacia, uma vez que, ao adentrar o Pantanal, o Rio Cuiabá passa a integrar um sistema de planícies sedimentares (Lima *et al*., 2022).

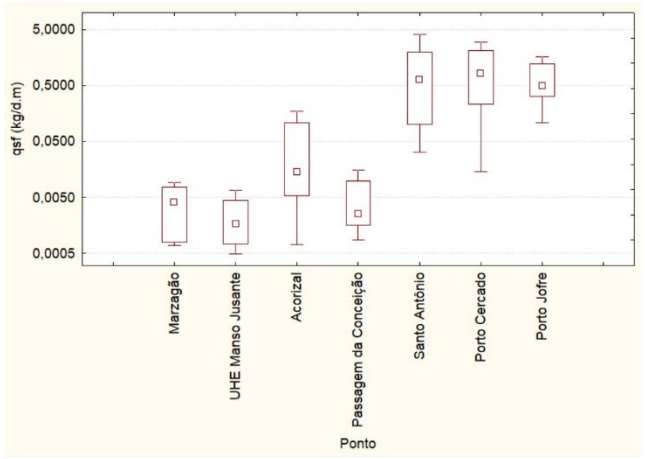


Figura 03: Análise espacial da descarga sólida de fundo por pontos de amostragem.
Fonte: Autoral (2026).

Conforme aponta Carvalho (2008), a maior disponibilidade de sedimentos arenosos no leito facilita a mobilização de partículas por arrasto. Sendo assim, os elevados valores de qsf observados nos pontos de jusante da bacia sugerem que o transporte é favorecido pela oferta de material característica dessas áreas deposicionais, compensando a redução da energia do fluxo típica de regiões de planície.

Considerações Finais

A partir da análise da descarga de sedimentos de fundo da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá, foi possível observar padrões espaço-temporais influenciados pelo regime hidrológico sazonal e por intervenções antrópicas, em especial a UHE Manso.

Temporalmente, o transporte é mais intenso no período chuvoso e reduzido na estiagem, devido à variação na energia do fluxo. Espacialmente, observam-se menores taxas no planalto, com destaque para a retenção a jusante da UHE Manso, enquanto na planície pantaneira ocorre um incremento expressivo impulsionado pela disponibilidade de materiais arenosos.

O conhecimento detalhado desses processos é fundamental para a gestão ambiental, permitindo prever e mitigar impactos como o assoreamento de corpos hídricos e mudanças na morfologia do canal fluvial, problemas que já afetam a região à ocupação desordenada.

Referências Bibliográficas.

CARVALHO, N, O.; FILIZOLA JÚNIOR, N, P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA J, E, F, W. Guia de Práticas Sedimentométricas. Brasília: ANEEL, 154p. 2000.

CARDOSO, R. R.; FANTIN-CRUZ, I. Dinâmica espaço-temporal dos sedimentos fluviais na bacia hidrográfica do rio Cuiabá, do Planalto ao pantanal. *In:* 5° Congresso Internacional de Hidrossedimentologia. Campinas. p. 18-23. 2025.

CARVALHO, Newton de Oliveira**.** Hidrossedimentologia prática. 2. ed. São Paulo: Interciência, p. 599. 2008.

Downs, Peter W.; Piégay, Hervé.; Catchment-scale cumulative impact of human activities on river channels in the late Anthropocene: implications and challenges for geomorphology. Geomorphology, v. 336, p. 73–90. 2019.

Ekka, A.; Pande S**.** *et al*.; Anthropogenic modifications and river ecosystem services: a landscape perspective. Water, v. 12, n. 10, p. 2706. 2020.

FIGUEIREDO, D. M. D.; DORES, E. F. G. D. C.; LIMA, Z. M. D. Bacia do Rio Cuiabá: uma abordagem socioambiental. Ed UFMT, p. 716, 2018.

FLORES, Amon Micael Fernandes. Análise e estimativa do transporte de sedimentos em suspensão durante eventos chuvosos. 129 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2007.

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, v. 8, p. 577748. 2020.

JARDIM, P. F.; Melo M. M. M. et al.; A modeling assessment of large-scale hydrologic alteration in south American Pantanal due to upstream dam operation. Frontiers in Environmental Science, v. 8, p. 567450. 2020.

KROLOW, Cristiane Marafon. Efeitos das mudanças climáticas e do uso e cobertura da terra na disponibilidade hídrica na Bacia do Rio Cuiabá. Dissertação (Mestrado em Desastres Naturais) - Pós-graduação em Desastres Naturais - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), São José dos Campos, 2024.

Lima, E. B. N. R.; Da Silva, J. A. *et al*.; Plano Da Bacia Hidrográfica Da Unidade de Planejamento e Gerenciamento do Alto Rio Cuiabá (UPG P-4): diagnóstico ambiental. Cuiabá: Universidade Federal de Mato Grosso, p. 58. 2022.

OLIVEIRA, R. C.; MARTINS, J. P. Aspectos integrados da erosão hídrica e produção de sedimentos em bacias hidrográficas. Revista de Engenharia Ambiental, v. 29, n. 1, p. 89–107. 2021.

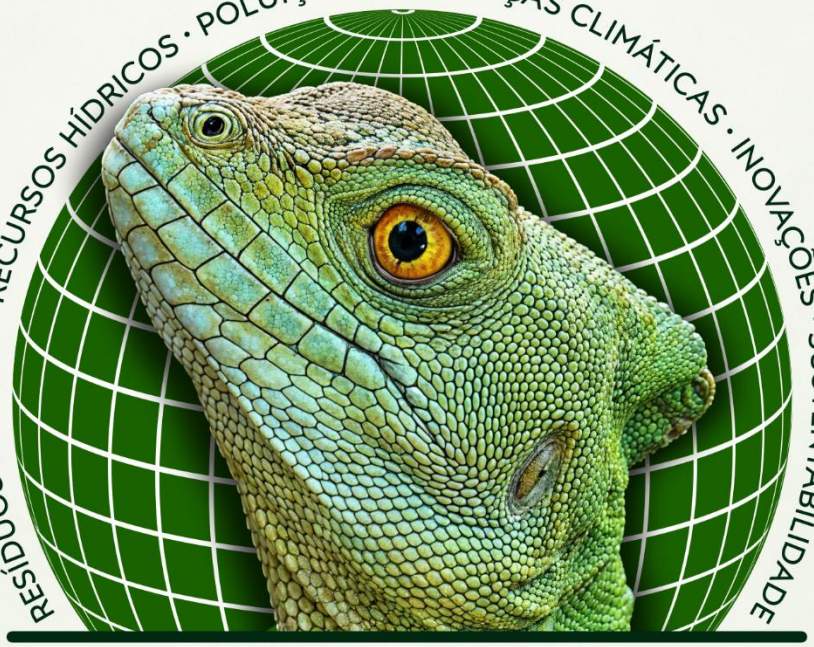
Pupim, F. N.; Geomorfologia e paleo-hidrologia dos megaleque dos rios Cuiabá e São Lourenço, quaternário da bacia do Pantanal. Tese De Doutorado em Geociências e Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, p. 109. 2014.

STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. Geomorfologia fluvial. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

Walczak, N.; Walczak, Z. *et al*.; The Impact of Shrubby Floodplain Vegetation Growth on the Discharge Capacity of River Valleys. Water, p. 556-571. 2018.

ÁREA TEMÁTICA 14

INFRAESTRUTURA VERDE E CIDADES INTELIGENTES



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

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).

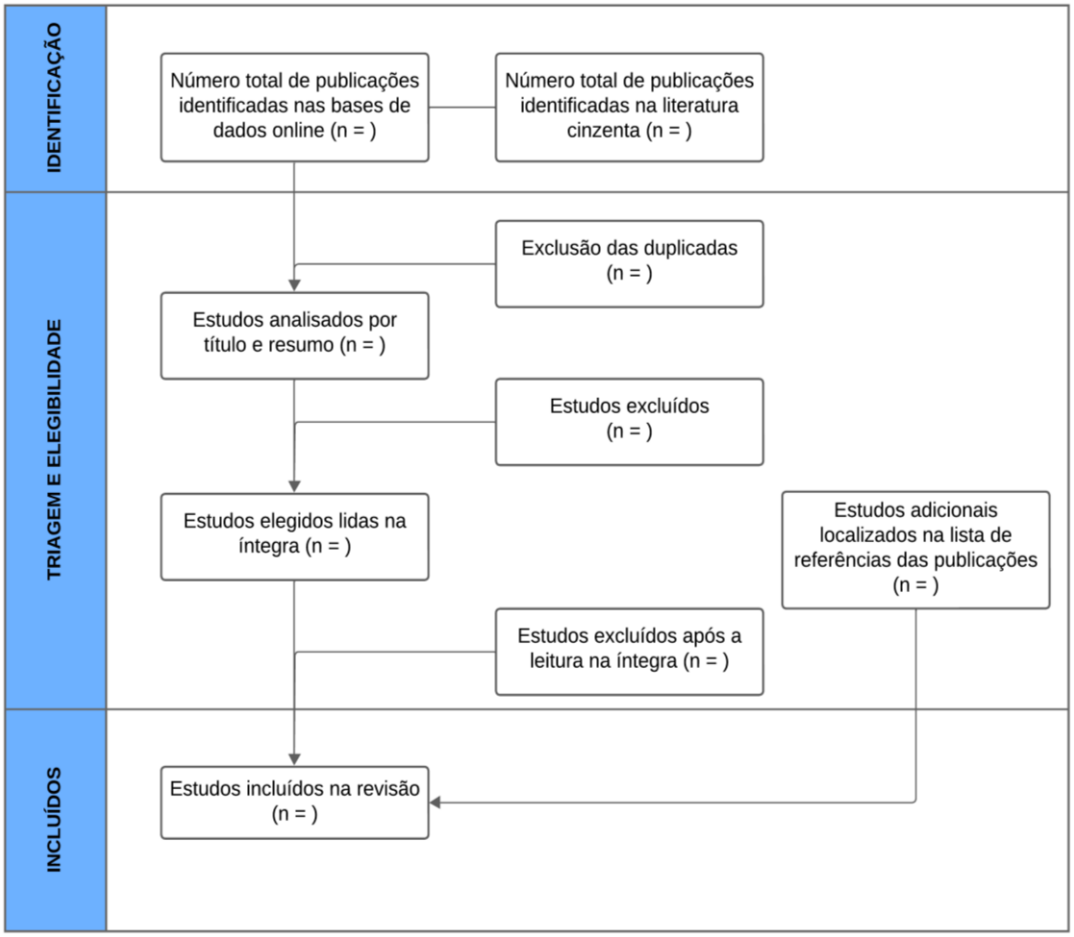


Figura 1: Formulário de extração de dados.
Fonte: Adaptado de TRICCO et al., (2018)

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

CIDADES SUSTENTÁVEIS E INTELIGENTES: DESAFIOS, CONCEITOS E POLÍTICAS PÚBLICAS

Francisco Pujol Filho, Clarissa Bueno Wandscheer
Universidade Positivo - pujo@ufpr.br - clarissa.wandscheer@up.edu.br

Palavras-chave: Cidades Sustentáveis; Desenvolvimento Sustentável; Políticas Públicas Urbanas

Introdução

O processo de urbanização acompanha a trajetória da humanidade desde a Antiguidade, com registros iniciais datados de cerca de 4000 a.C., na região da Mesopotâmia, onde surgiram os primeiros núcleos urbanos organizados (Di Sarno, 2004). Ao longo do tempo, as cidades passaram por transformações significativas, especialmente durante a Idade Média, quando o comércio de longa distância impulsionou o crescimento e a organização dos centros urbanos (Pereira; Simplício; Donadi, 2019).

Com a Revolução Industrial, no final do século XIX, o crescimento das cidades intensificou-se de forma acelerada, resultando em profundas mudanças econômicas e sociais. Entretanto, esse processo também provocou impactos ambientais relevantes, tais como poluição, degradação dos recursos naturais e ampliação das desigualdades sociais, sobretudo em países em desenvolvimento (Di Sarno, 2004; Stefani et al., 2023).

Atualmente, observa-se um cenário de urbanização global sem precedentes. Segundo dados da Organização das Nações Unidas, aproximadamente 55% da população mundial vive em áreas urbanas, com projeção de alcançar cerca de 68% até 2050, o que representa um acréscimo estimado de 2,5 bilhões de pessoas nas cidades (Onu, 2021). Esse crescimento impõe desafios significativos à gestão urbana e ao planejamento territorial.

Nesse contexto, os conceitos de desenvolvimento sustentável, cidades sustentáveis e cidades inteligentes ganham centralidade no debate acadêmico e político, ao buscarem soluções integradas que conciliem crescimento econômico, justiça social e preservação ambiental. Tais conceitos orientam políticas públicas e estratégias de governança voltadas à melhoria da qualidade de vida urbana e à garantia de condições adequadas para as gerações futuras (Zemigala, 2019; Wątróbski, 2022).

Material e Métodos

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza qualitativa, desenvolvido por meio de revisão bibliográfica narrativa. Foram analisados livros, artigos científicos e documentos institucionais que abordam os temas da urbanização, desenvolvimento sustentável, cidades inteligentes, planejamento urbano e políticas públicas.

As fontes consultadas incluem produções de autores reconhecidos na área, bem como relatórios oficiais da Organização das Nações Unidas e de programas voltados à sustentabilidade urbana. A seleção do material baseou-se na relevância teórica, na atualidade das publicações e na contribuição para a compreensão dos conceitos e desafios relacionados às cidades sustentáveis.

A análise dos dados ocorreu de forma interpretativa e comparativa, permitindo identificar convergências e divergências conceituais entre os autores. Como instrumento de sistematização, utilizou-se uma tabela comparativa, que possibilitou organizar os principais enfoques teóricos e metodológicos presentes na literatura, favorecendo uma visão integrada do tema.

Resultados e Discussão

A análise da literatura evidencia que a urbanização se configura como um processo histórico contínuo, marcado por transformações estruturais que impactam diretamente o meio ambiente e a organização social. O crescimento urbano acelerado, intensificado após a Revolução Industrial, contribuiu para o aumento da demanda por serviços, transporte, energia e infraestrutura, resultando em pressões significativas sobre os recursos naturais (Stefani et al., 2023; Pinheiro, 2023).

O conceito de desenvolvimento sustentável consolidou-se como um paradigma orientador das políticas urbanas, ao propor a integração entre as dimensões econômica, social e ambiental. Trata-se de um processo dinâmico, multifacetado e em constante evolução, que busca atender às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de satisfazerem suas próprias demandas (Urli; Frini; Amor, 2020).

Nesse sentido, o conceito de cidade sustentável emerge como aquele que prioriza a inclusão social, a eficiência econômica e a preservação ambiental, promovendo qualidade de vida e bem-estar à população urbana (Oliveira et al., 2024; Koh; Gunawansa; Bhullar, 2010). Paralelamente, a incorporação das Tecnologias da Informação e Comunicação ao espaço urbano impulsionou o desenvolvimento do conceito de cidade inteligente, que utiliza recursos tecnológicos para melhorar a governança, otimizar serviços públicos e tornar as cidades mais resilientes e eficientes (Höjer; Wangel, 2015; Rivera; Bouskela, 2018).

A literatura também aponta a necessidade de mensuração objetiva da sustentabilidade urbana, por meio de critérios claros, indicadores confiáveis e métodos adequados de avaliação. A ausência desses instrumentos compromete a precisão das análises e dificulta a formulação de políticas públicas eficazes (Sikdar, 2020; Yi; Dong; Li, 2019).

Nesse contexto, o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável nº 11, da Agenda 2030 da ONU, destaca-se como um importante instrumento para orientar ações voltadas a cidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis. Programas como o Programa Cidades Sustentáveis contribuem para a territorialização dos ODS no âmbito municipal, fortalecendo a governança local e o planejamento urbano integrado (Nobre, 2025; Instituto Cidades Sustentáveis, 2019).

Considerações Finais

Diante do exposto, conclui-se que a construção de cidades sustentáveis e inteligentes representa um desafio complexo, que exige ações integradas de planejamento urbano, gestão pública eficiente e participação ativa da sociedade. A urbanização contemporânea impõe a necessidade de políticas públicas capazes de articular desenvolvimento econômico, equidade social e proteção ambiental, considerando as especificidades locais e os compromissos globais assumidos pelos Estados.

Os conceitos de cidade sustentável e cidade inteligente mostram-se complementares, especialmente quando associados ao uso responsável das tecnologias, à educação ambiental e à governança participativa. Por fim, destaca-se que a efetivação do desenvolvimento urbano sustentável depende tanto de soluções técnicas quanto do engajamento crítico da população, tornando a participação social e a educação ambiental elementos centrais para a transformação da realidade urbana.

Referências Bibliográficas

ACSELRAD, H. *Sentidos da sustentabilidade urbana*. Rio de Janeiro: DP&A, 1999.

DI SARNO, M. *História das cidades*. São Paulo: Contexto, 2004.

HÖJER, M.; WANGEL, J. Smart sustainable cities: definition and challenges. *Technology in Society*, v. 42, p. 1–11, 2015.

INSTITUTO CIDADES SUSTENTÁVEIS. *Programa Cidades Sustentáveis*. São Paulo, 2019.

KOH, H.; GUNAWANSA, A.; BHULLAR, L. Legal frameworks for urban sustainability. *Environmental Policy and Law*, v. 40, n. 3, p. 125–134, 2010.

MARTINS, A.; BORGES, R.; ZANETI, I. *Educação ambiental e sustentabilidade urbana*. Curitiba: Appris, 2025.

MIOLA, A.; SCHILTZ, F. Measuring sustainable development goals. *Ecological Indicators*, v. 98, p. 679–687, 2019.

NOBRE, P. *Cidades sustentáveis e políticas públicas*. Brasília: UnB, 2025.

OLIVEIRA, L. et al. *Cidades sustentáveis: conceitos e práticas*. Belo Horizonte: UFMG, 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *World Urbanization Prospects*. Nova York, 2021.

PEREIRA, R.; SIMPLÍCIO, M.; DONADI, E. *Gestão urbana sustentável*. São Paulo: Senac, 2019.

STEFANI, R. et al. *Planejamento urbano e sustentabilidade*. Porto Alegre: Bookman, 2023.

URLI, B.; FRINI, T.; AMOR, S. Sustainable development: a dynamic approach. *Sustainability*, v. 12, n. 8, 2020.

WĄTRÓBSKI, J. Sustainable city assessment methods. *Sustainable Cities and Society*, v. 76, 2022.

PERCEPÇÕES SOBRE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS CULTURAIS URBANOS EM CURITIBA, PR

1 Bruno Maciel Pereira, 2 Flavia Ramos Ferrari, 3 Lara Oliveira Custódio, 4 Mariana Guedes de Souza, 5 Rafaella Candida Santana, 6 Helder Marcos Nunes Candido

1 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: bruno.maciel@ufu.br; 2 Núcleo Terrantar, Universidade Federal de Viçosa, e-mail: flaviarferrari@gmail.com; 3 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: lara.oliveirac@ufu.br; 4 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: mariana.guedes@ufu.br; 5 Instituto Federal do Triângulo Mineiro, e-mail: rafaellacandidasantana37@gmail.com; 6 Universidade Federal de Uberlândia; Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, e-mail: heldernunes@ufu.br

Palavras-chave: áreas verdes urbanas; percepção ambiental; uso público de áreas verdes.

Os serviços ecossistêmicos correspondem aos produtos e serviços fornecidos à humanidade por meio dos processos naturais, estando relacionados à capacidade dos ecossistemas de gerar benefícios à sociedade, sendo fundamentais para a manutenção da vida e do bem-estar humano. Esses serviços podem ser classificados em provisão, regulação, suporte e culturais, destacam-se estes últimos por envolverem aspectos imateriais, como lazer, turismo, valores estéticos, espirituais e educacionais.

No contexto urbano, os serviços ecossistêmicos culturais assumem papel relevante na promoção da saúde física e mental da população, especialmente por meio do acesso a áreas verdes. Entretanto, nas cidades, observa-se que a distribuição desses serviços ocorre de forma desigual, estando frequentemente associada a fatores socioeconômicos. Nesse sentido, verifica-se que populações com maior renda e escolaridade tendem a ter maior acesso a áreas verdes urbanas, enquanto grupos historicamente vulnerabilizados, como populações pretas, pardas e periféricas, enfrentam maiores dificuldades de acesso, configurando um cenário que pode ser interpretado à luz do conceito de racismo ambiental.

Diante desse contexto, torna-se fundamental compreender como a população percebe o acesso aos serviços ecossistêmicos culturais, uma vez que tal percepção pode influenciar a valorização desses serviços e a demanda por políticas públicas mais justas e inclusivas.

Portanto, o presente estudo tem como objetivo analisar a percepção da população de Curitiba (PR) acerca da qualidade dos serviços ecossistêmicos culturais presentes em diferentes parques urbanos.

O método de pesquisa foi misto (quantitativo e qualitativo), baseado em um questionário anônimo que avaliou a percepção dos visitantes dos parques em Curitiba, sobre os usos e a compreensão dos serviços ecossistêmicos culturais prestados pelas áreas verdes urbanas.

A coleta de dados ocorreu por meio da aplicação de um questionário semiestruturado (20 perguntas) aos frequentadores dos quatro parques estudados. Os questionários foram aplicados em janeiro de 2026, com indivíduos maiores de 18 anos. Os participantes foram selecionados de acordo com sua disponibilidade para responder à pesquisa, caracterizando uma amostra de conveniência não probabilística. No total, foram realizadas 305 (trezentas e cinco) entrevistas presenciais nos parques Bosque João Paulo II, Parque Barigui, Bosque Zaninelli e Parque Tingui (Figura 1).

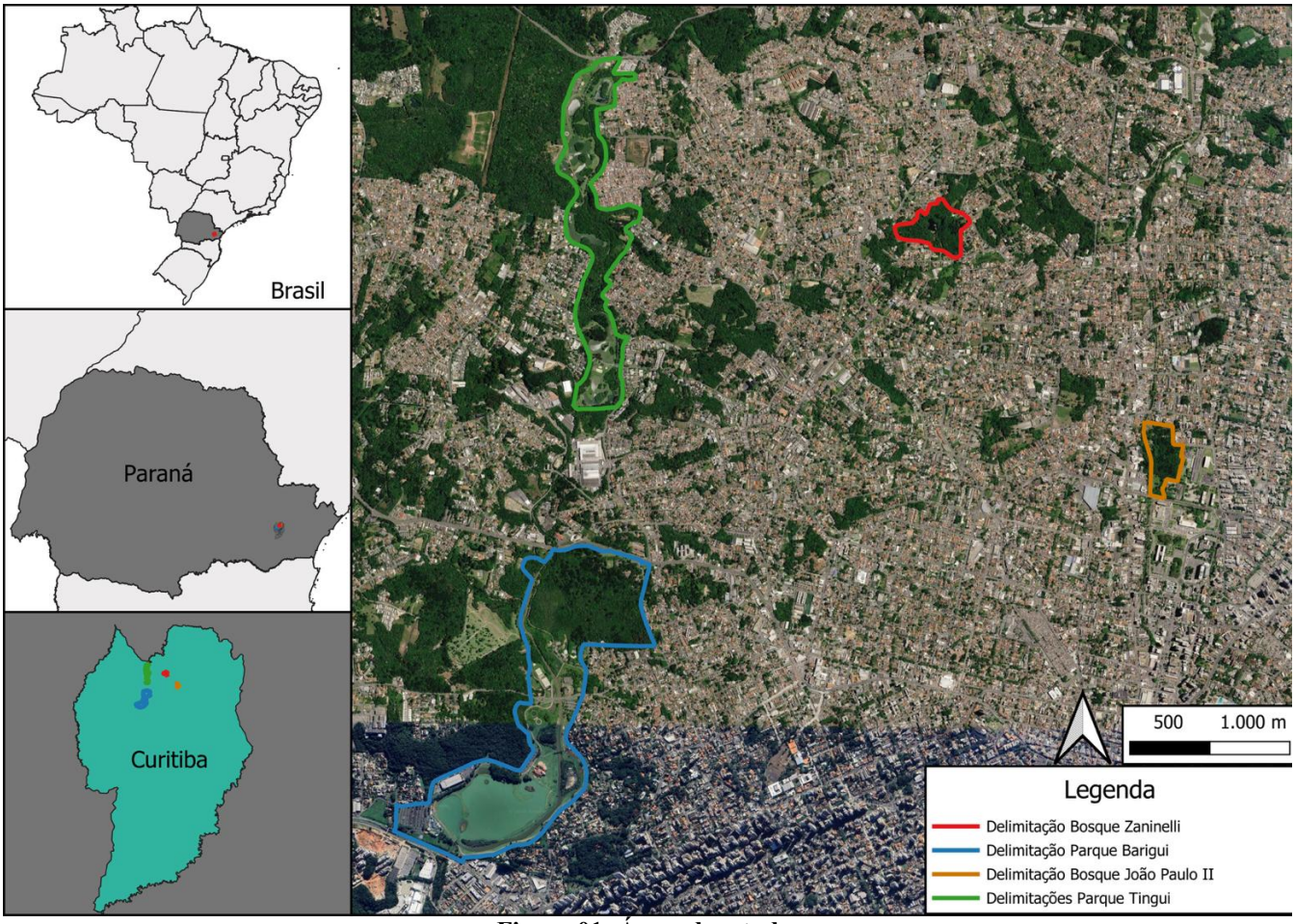


Figura 01: Áreas de estudo.
Fonte: Autoria própria (2026)

O questionário, realizado na plataforma *Google Forms*, foi composto por questões fechadas e abertas, organizadas em três blocos principais: (I) perfil dos respondentes (idade, cor, gênero e escolaridade); (II) padrões de uso das áreas verdes (frequência de visitação, atividades realizadas e tempo de permanência) e (III) avaliação da percepção dos serviços ecossistêmicos culturais ofertados pelo parque. As questões abertas permitiram mais de uma resposta de acordo com as interpretações individuais sobre os usos das áreas verdes urbanas, enquanto as questões fechadas utilizaram, majoritariamente, escalas do tipo *Likert* de cinco pontos para mensurar o grau de importância dada e de concordância dos participantes frente às afirmações apresentadas no formulário. As entrevistas foram iniciadas por uma introdução, por parte dos entrevistadores, sobre os serviços ecossistêmicos e o propósito do estudo e, logo, o entrevistado respondia às perguntas em diálogos com o entrevistador, com duração média de aproximadamente 5 minutos.

Os dados quantitativos foram analisados por meio de estatística descritiva, com o objetivo de identificar padrões de uso. Já os dados qualitativos provenientes das questões abertas foram submetidos à análise de conteúdo, permitindo a categorização das respostas e a identificação de temas recorrentes relacionados aos serviços ecossistêmicos culturais. Por fim, buscou-se integrar os resultados quantitativos e qualitativos, de modo a proporcionar uma compreensão mais abrangente da percepção dos usuários sobre os benefícios culturais das áreas verdes urbanas.

Diante dos dados coletados, o perfil dos respondentes está disposto na faixa de 25 a 34 anos (28,9 %) e 35 a 44 anos (27,5 %); do gênero feminino (55,7 %) se autodeclarando branca (71,1 %) e com ensino superior (60,3 %).

Estima-se que parte dos respondentes deste questionário são constituídos de turistas que visitavam Curitiba ou de estudantes advindos de outras cidades para estudar nas universidades curitibanas, visto que 35,4 % visitavam os parques pela primeira vez e 23,6% disseram que visitavam apenas uma vez por ano. Tais evidências não interferem nos resultados alcançados por serem pontos turísticos da cidade e pelo fato do objetivo do estudo ser entender a percepção dos visitantes no que diz respeito aos serviços ecossistêmicos disponibilizados pelos parques e bosques.

Chama-se a atenção o grande número de respondentes com ensino superior, fato esse que pode ser explicado devido a presença de instituições públicas de ensino superior presentes na cidade de Curitiba, como a Universidade Federal do Paraná (UFPR), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e o Instituto Federal do Paraná (IFPR). O ensino superior faz com que as pessoas tenham um olhar mais amplo e profundo relacionado às áreas verdes urbanas e aos serviços ecossistêmicos culturais, de modo que eles não enxerguem essas áreas apenas como um lugar para o seu uso, mas entendendo também a complexidade da temática, a necessidade de aumentar a quantidade desses espaços, sua importância e os benefícios que elas nos

trazem. verdes urbanas e aos serviços ecossistêmicos culturais, de modo que eles não enxerguem essas áreas apenas como um lugar para o seu uso, mas entendendo também a complexidade da temática, a necessidade de aumentar a quantidade desses espaços, sua importância e os benefícios que elas nos trazem.

Outro fator percebido foi que as pessoas se utilizam das áreas verdes urbanas como um refúgio devido à rotina extremamente corrida e cansativa presente nas grandes cidades brasileiras, visto que Curitiba é a oitava maior cidade do Brasil, de acordo com o Censo de 2022 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Esse fato foi verificado ao se perguntar sobre visitar as áreas verdes urbanas para relaxar ou recarregar a energia; onde 94,7% dos respondentes concordaram totalmente ou parcialmente (Figura 2).

Testou-se a percepção dos serviços ecossistêmicos culturais com relação à saúde da população, ao se afirmar que espaços verdes são fundamentais para a saúde das pessoas. Diante deste questionamento, a maioria dos respondentes concordou parcialmente ou totalmente (99,7%) com a afirmação (Figura 2).

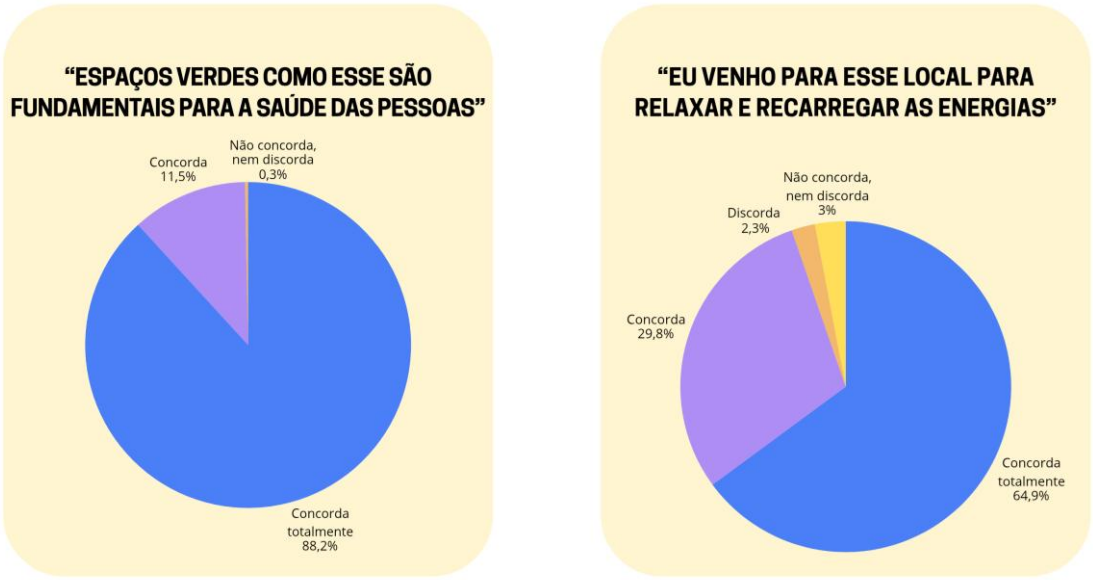


Figura 02: Respostas de duas afirmações apresentadas relacionadas à saúde da população durante a entrevista.
Fonte: Autoria própria (2026)

Quando perguntados sobre os motivos para se visitar o parque, podendo marcar mais de uma alternativa, recreação e ecoturismo foram os mais escolhidos. Com relação ao motivo específico para visitar o parque, também podendo marcar mais de uma alternativa, oportunidade para se conectar com a natureza e oportunidade de lazer e diversão foram os mais apontados (Figura 3).

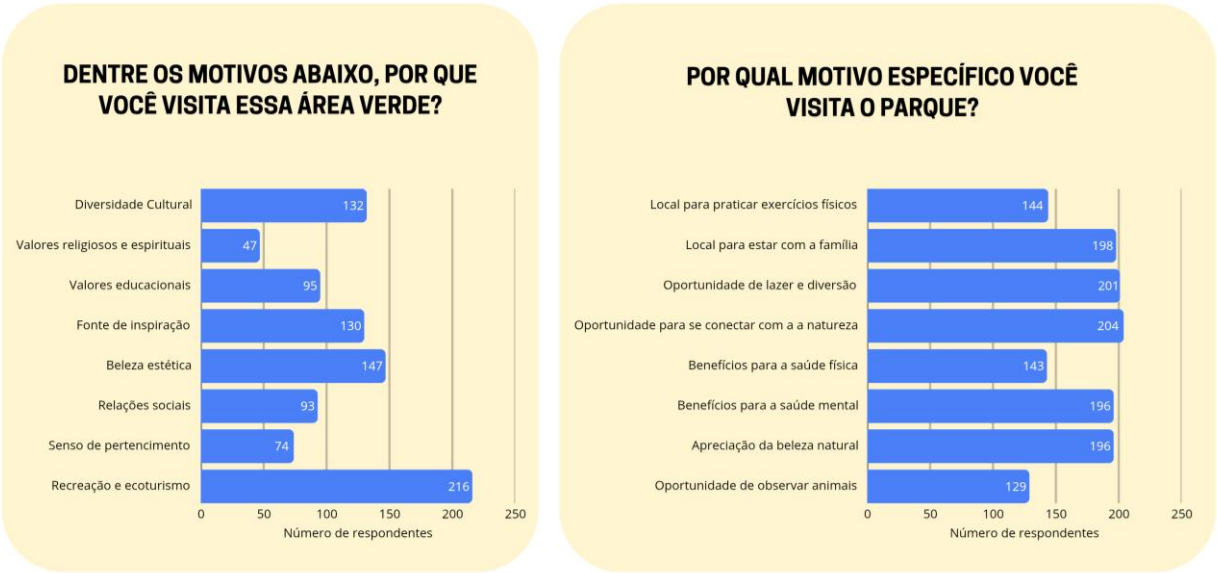


Figura 03: Motivações para visitar o parque.
Fonte: Autoria própria (2026)

A Figura 3 evidencia que a população apresenta uma percepção fortemente concentrada em benefícios concretos, como recreação, lazer, saúde e interação social. Os serviços culturais mais abstratos, como valores espirituais, educacionais e identitários, apresentam menor reconhecimento, indicando certa dificuldade em suas percepções.

Por fim, pode-se concluir que o presente trabalho atingiu seus objetivos ao ressaltar com seus dados coletados da cidade de Curitiba, conseguindo identificar o perfil dos entrevistados e suas características. Os resultados evidenciam que a percepção dos serviços ecossistêmicos culturais está concentrada em benefícios mais imediatos, como lazer e saúde, com menor reconhecimento de dimensões abstratas. Esse padrão indica uma compreensão parcial desses serviços, reforçando a necessidade de ações de educação ambiental e planejamento urbano que ampliem sua valorização e promovam maior equidade no acesso e reconhecimento dos benefícios das áreas verdes urbanas.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer ao Instituto Serrapilheira, à Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT), à Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul e à Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

BARDIN, L. Análise de conteúdo. São Paulo: Edições 70, 2011. 279 p.

Censo Demográfico IBGE 2022. Disponível em: https://censo2022.ibge.gov.br/. Acesso em: 01. mai. 2026.

CONSORTI, Giovana Francesca Rodrigues; MARIANO, Gabriel Telo; PRADO, Helbert Medeiros; CARDOSO-LEITE, Eliana. Percepção sobre serviços ecossistêmicos e áreas protegidas em uma microbacia com interface urbano-rural (Boituva, SP). *Revista Brasileira de Ecoturismo*, São Paulo, v. 14, n. 5, p. 771–791, dez. 2021.

COSTA, Priscila Gonçalves. Serviços ecossistêmicos culturais em áreas protegidas: uma análise das publicações sobre o tema. *Revista Eletrônica Uso Público em Unidades de Conservação*, Niterói, RJ, v. 10, n. 15, p. 59–66, 2022.

FREITAS, H. et al. O método de pesquisa Survey. Revista de Administração, v. 35, n. 3, p. 105-112, 2000.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 7ª ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2019. 248 p.

MEA - MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis. Island Press, Washington, DC, 2005. Disponível em: https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf. Acesso em: 23 abr. 2026.

INFRAESTRUTURA VERDE E PRODUÇÃO DO ESPAÇO URBANO EM CIDADES MÉDIAS: USOS SOCIAIS E RECONFIGURAÇÃO TERRITORIAL EM PONTA GROSSA (PR)

1 Khalyd Artigas da Silva, 2 Lucelia Smaha, 3 Luiz Alexandre Gonçalves Cunha

1 Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), e-mail: khalyd11@gmail.com; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), e-mail: luceliasmaha@gmail.com; 3 Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG, e-mail: cunhageo@uepg.br

Palavras-chave: Sustentabilidade urbana; Dinâmicas socioespaciais; Planejamento ambiental urbano.

Introdução

Nas últimas décadas, estratégias ambientais passaram a ocupar papel central no planejamento urbano diante de problemas como enchentes, ilhas de calor e degradação ambiental. Nesse contexto, a infraestrutura verde surge como alternativa ao modelo tradicional, propondo a integração entre sistemas naturais e construídos para promover sustentabilidade (Beatley, 2000; Newman e Jennings, 2008). Contudo, sua adoção ocorre em meio a disputas entre Estado, mercado e sociedade, podendo também influenciar a reconfiguração urbana, especialmente em cidades médias, onde assume papel estruturante (Boutaud e Gondran, 2009). No Brasil, essas cidades têm se destacado como espaços dessas transformações, combinando crescimento acelerado e políticas de requalificação urbana, como em Ponta Grossa (PR), com intervenções em fundos de vale e criação de espaços públicos (Elias, 2007).

As atividades humanas ocorrem na paisagem, onde interagem processos abióticos e bióticos. A urbanização convencional baseia-se em infraestrutura cinza, monofuncional e centrada no automóvel, priorizando circulação de veículos, escoamento rápido de água e resíduos, e uso de superfícies impermeáveis. Esse modelo interrompe dinâmicas naturais e contribui para problemas como enchentes, deslizamentos e perda de áreas ecológicas essenciais (Farr, 2008; Herzog, 2009).

Diante disso, o presente trabalho investiga como intervenções em infraestrutura verde contribuem para a reconfiguração dos usos sociais e das dinâmicas territoriais em cidades médias brasileiras, com foco em Ponta Grossa. A relevância do tema está em compreender a infraestrutura verde como elemento ativo na produção do espaço urbano, conforme a perspectiva de Henri Lefebvre (2006), que entende o espaço como produto das relações sociais, econômicas e políticas, em diálogo com David Harvey (1980) sobre as dinâmicas do capitalismo urbano. Assim, o estudo analisa como essas intervenções influenciam usos sociais e promovem reconfigurações territoriais, inserindo-se no campo da Geografia Urbana crítica e articulando produção do espaço, sustentabilidade e planejamento urbano.

Referencial teórico

O recorte empírico desta pesquisa concentra-se no Lago de Olarias, localizado em Ponta Grossa (Figura 01), configurando-se como uma intervenção recente de infraestrutura verde em área de fundo de vale anteriormente degradada. A criação da Área de Proteção Ambiental (APA) do Lago de Olarias, instituída pelo Decreto nº 25.435/2025, reforça esse processo ao estabelecer a área como unidade de conservação de uso sustentável, abrangendo a bacia do arroio de Olarias e integrando um parque linear com cinco lagos, além de equipamentos urbanos e paisagísticos. A APA tem como objetivo proteger a biodiversidade, ordenar a ocupação do solo e assegurar o uso sustentável dos recursos naturais, impondo normas mais rigorosas de uso e ocupação, a serem detalhadas em plano de manejo municipal. À luz das contribuições de Henri Lefebvre e Milton Santos, essa intervenção pode ser compreendida como expressão da produção do espaço urbano, articulando dimensões ambientais, sociais e políticas e reconfigurando usos, práticas e dinâmicas territoriais no contexto urbano.

A análise proposta fundamenta-se na concepção do espaço urbano como produto social, conforme estabelecido por Henri Lefebvre em *A Produção do Espaço* (2006), para quem o espaço não se reduz a um mero suporte das relações sociais, mas constitui, simultaneamente, resultado, meio e condição de sua reprodução. Nessa perspectiva, o espaço é produzido historicamente por meio de práticas sociais, sendo atravessado por relações de poder, conflitos e interesses que o configuram de maneira dinâmica e desigual. Tal entendimento permite apreender o urbano como uma construção social em permanente transformação, na qual formas espaciais e práticas sociais se inter-relacionam de modo dialético. Essa abordagem é aprofundada por Milton Santos, especialmente em *A Natureza do Espaço* (1996), ao compreender o espaço geográfico como um sistema indissociável de objetos e ações. Para o autor, os objetos técnicos e as práticas sociais constituem uma totalidade concreta, na qual se materializam as contradições da sociedade. Desse modo, o espaço não apenas reflete as dinâmicas sociais, mas também condiciona e orienta as possibilidades de ação, sendo fundamental para a compreensão dos processos de produção, apropriação e uso do território.

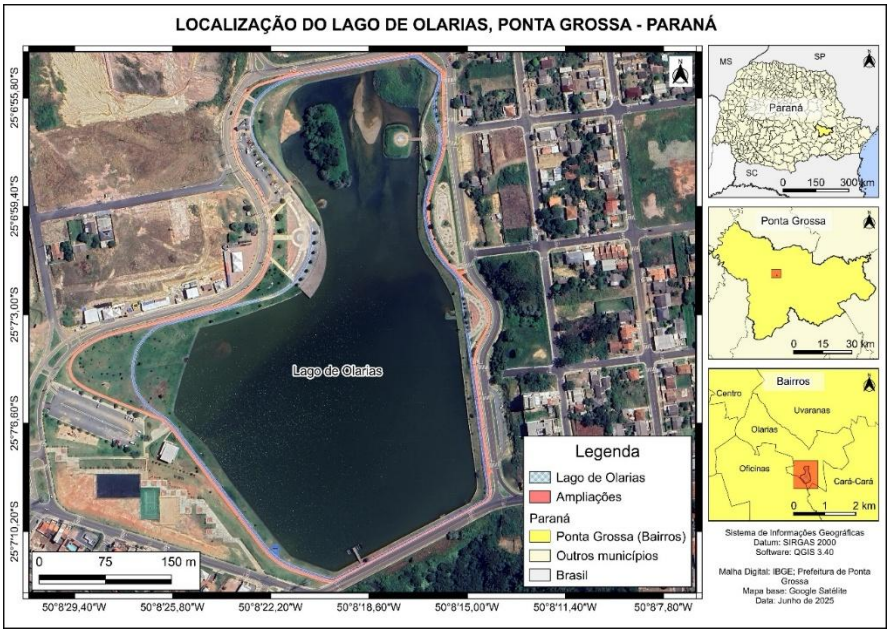


Figura 01: Localização do Lago de Olarias – Ponta Grossa, PR.
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A partir dessa base teórica, o debate sobre infraestrutura verde é incorporado como expressão contemporânea das estratégias de planejamento urbano, articulando dimensões ecológicas, sociais e territoriais. Conforme proposto por Mark A. Benedict e Edward T. McMahon em *Green Infrastructure* (2006), a infraestrutura verde pode ser compreendida como uma rede integrada de espaços naturais e seminaturais, capaz de desempenhar múltiplas funções, incluindo a conservação ambiental, a regulação climática e a promoção do bem-estar social. Entretanto, à luz das contribuições de Lefebvre e Santos, sua implementação não pode ser interpretada de forma neutra ou exclusivamente técnica. Ao contrário, deve ser analisada criticamente enquanto prática socioespacial inserida em contextos específicos, nos quais diferentes agentes produzem, disputam e ressignificam o espaço urbano. Nesse sentido, a infraestrutura verde pode tanto contribuir para a ampliação dos usos sociais e para a qualificação do espaço urbano quanto reforçar desigualdades e processos seletivos de valorização territorial, a depender das lógicas que orientam sua concepção e execução.

Dessa forma, o Lago de Olarias evidencia como intervenções dessa natureza podem atuar simultaneamente como instrumentos de qualificação ambiental e como vetores de reestruturação socioespacial, revelando tensões entre inclusão e seletividade no acesso aos benefícios urbanos. Tais transformações podem ser ainda analisadas à luz das contribuições de Jan Gehl, em *Cities for People* (2013), que enfatiza a centralidade da escala humana e da apropriação cotidiana dos espaços públicos, permitindo compreender como intervenções urbanas influenciam práticas sociais, formas de convivência e a construção de sociabilidades urbanas. Assim, a análise desse caso permite compreender de maneira mais aprofundada o papel da infraestrutura verde na produção do espaço urbano em cidades médias, evidenciando suas ambivalências e destacando suas implicações nos usos sociais e nas dinâmicas territoriais, em um contexto marcado por disputas, interesses e desigualdades inerentes ao processo de urbanização.

Metodologia

A presente pesquisa adota uma abordagem qualitativa, de caráter exploratório e analítico, orientada pelo método de estudo de caso, tendo como recorte empírico intervenções urbanas recentes associadas à infraestrutura verde no município de Ponta Grossa, com ênfase em áreas de fundos de vale requalificadas, como o Lago de Olarias. Tal abordagem justifica-se pela necessidade de apreender o fenômeno em sua complexidade, considerando a articulação entre dimensões espaciais, sociais e políticas na produção do espaço urbano. Do ponto de vista teórico-metodológico, a análise fundamenta-se na concepção de espaço como produto social, conforme proposta por Henri Lefebvre (2006), o que implica compreender o espaço urbano não apenas como forma material, mas como resultado de práticas, representações e relações de poder. Essa perspectiva é complementada pela leitura de Milton Santos (1996), para quem o espaço geográfico se constitui como um sistema indissociável de objetos e ações, permitindo interpretar as intervenções urbanas como materializações concretas de processos sociais mais amplos.

Nessa direção, o estudo de caso é mobilizado não apenas como recorte empírico, mas como estratégia analítica que possibilita compreender, em profundidade, as especificidades locais e suas articulações com dinâmicas estruturais mais amplas, conforme discutido por Robert K. Yin (2015). Tal escolha metodológica permite explorar as múltiplas dimensões do objeto, sem dissociar sua materialidade das práticas sociais que o produzem e o ressignificam. Os procedimentos metodológicos compreendem revisão bibliográfica, análise documental, análise espacial indireta por imagens de satélite e observação de campo assistemática, articulados para integrar diferentes fontes e escalas de análise. Essa abordagem possibilita compreender como as intervenções em infraestrutura verde reconfiguram a materialidade urbana e os usos sociais do espaço, evidenciando suas potencialidades e contradições no processo de produção do urbano.

Desenvolvimento e análise

A incorporação da infraestrutura verde ao planejamento urbano no município de Ponta Grossa insere-se em um esforço mais amplo de enfrentamento de problemas historicamente associados à ocupação de fundos de vale, tais como alagamentos recorrentes, degradação ambiental e precariedade das condições urbanas. Nesse contexto, as intervenções realizadas nesses espaços articulam objetivos ambientais, urbanísticos e sociais, promovendo simultaneamente a recuperação de funções ecológicas e a produção de novos espaços públicos destinados ao lazer e à convivencia. Tal movimento dialoga com abordagens contemporâneas que compreendem a infraestrutura verde como elemento estruturante da cidade, capaz de integrar serviços ecossistêmicos e qualificação urbana (Benedict; Mcmahon, 2006; Hansen; Pauleit, 2014).

Do ponto de vista espacial, observa-se uma reconfiguração significativa do uso do solo, marcada pela substituição de áreas anteriormente subutilizadas ou degradadas por espaços planejados, dotados de equipamentos urbanos, acessibilidade e maior conectividade com a malha urbana. Essa transformação não apenas altera a materialidade do espaço, mas também redefine sua funcionalidade e centralidade relativa na dinâmica urbana, conferindo a esses territórios novos valores simbólicos e práticos. Conforme argumentam Lefebvre (2006) e Santos (1996), tais mudanças devem ser compreendidas como parte do processo de produção do espaço, no qual formas espaciais e práticas sociais se constituem de maneira indissociável. Entretanto, a análise dessas intervenções não pode se restringir à sua dimensão físico-ambiental. À luz da perspectiva crítica da produção do espaço, essas transformações revelam-se como parte de processos mais amplos de reorganização territorial, nos quais novos usos, valores e significados são atribuídos ao espaço urbano. Nesse sentido, autores como David Harvey (2014) destacam que tais reconfigurações estão frequentemente vinculadas às dinâmicas de valorização do capital no espaço urbano, enquanto Rolnik (2015) evidencia como políticas urbanas podem operar simultaneamente como instrumentos de qualificação e de reprodução de desigualdades.

A infraestrutura verde, nesse quadro, atua como mediação entre diferentes interesses e racionalidades, articulando demandas por sustentabilidade ambiental, valorização urbana e ampliação do acesso a espaços públicos qualificados. Estudos mais recentes reforçam essa dimensão ao apontar que intervenções dessa natureza podem promover benefícios sociais relevantes, como melhoria da qualidade de vida e ampliação das práticas de sociabilidade, ao mesmo tempo em que podem desencadear processos seletivos de valorização territorial (Anguelovski et al., 2019; Wolch; Byrne; Newell, 2014). No caso analisado, a observação de campo indica que essas áreas passam a atrair uma diversidade de usuários, ampliando as possibilidades de uso cotidiano e de interação social, em consonância com a perspectiva de Gehl (2013) acerca da centralidade da escala humana na produção de espaços públicos.

Por outro lado, tais transformações implicam reconfigurações nas dinâmicas territoriais, especialmente no que se refere à integração dessas áreas à lógica urbana mais ampla. A melhoria das condições ambientais e urbanísticas tende a aumentar a atratividade dessas regiões, influenciando padrões de circulação, usos do solo e percepções sobre a cidade, ao mesmo tempo em que pode intensificar processos de valorização imobiliária e diferenciação socioespacial. Dessa forma, a infraestrutura verde não deve ser compreendida apenas como solução técnica para problemas ambientais, mas como elemento ativo na produção do espaço urbano, capaz de reconfigurar relações sociais, práticas espaciais e dinâmicas territoriais. Essa interpretação permite superar leituras simplificadoras e evidencia o caráter multifacetado, contraditório e politicamente situado das intervenções urbanas contemporâneas, especialmente no contexto das cidades médias brasileiras.

Considerações finais

O presente trabalho teve como objetivo analisar o papel da infraestrutura verde na reconfiguração dos usos sociais e das dinâmicas territoriais em cidades médias, tomando como referência o contexto de Ponta Grossa. Os resultados evidenciam que tais intervenções promovem transformações significativas na materialidade do espaço urbano, contribuindo simultaneamente para a recuperação ambiental de áreas degradadas e para a ampliação da oferta de espaços públicos voltados ao lazer e à convivência. Contudo, à luz da perspectiva da produção do espaço, conforme formulada por Henri Lefebvre e aprofundada por Milton Santos, tais processos devem ser compreendidos em sua complexidade, uma vez que a infraestrutura verde, ao mesmo tempo em que promove benefícios ambientais e sociais, também participa ativamente da redefinição das dinâmicas urbanas, influenciando padrões de uso, circulação e percepção do espaço.

Nesse sentido, ao atuar como elemento estruturador do território, a infraestrutura verde evidencia seu caráter não neutro, articulando interesses, práticas e agentes distintos no processo de produção do urbano. Sua implementação revela-se, portanto, como parte de uma lógica mais ampla de reorganização socioespacial, na qual coexistem processos de qualificação urbana e potenciais mecanismos de valorização territorial e diferenciação socioespacial. A principal contribuição deste estudo reside, assim, na compreensão da infraestrutura verde como componente ativo da produção do espaço urbano, superando sua leitura restrita como instrumento técnico de planejamento e ampliando o debate sobre sustentabilidade urbana ao incorporar dimensões sociais, políticas e territoriais frequentemente negligenciadas. Como desdobramento, sugere-se que pesquisas futuras aprofundem a análise empírica dessas transformações, incorporando abordagens quantitativas e investigações sobre os impactos socioeconômicos das intervenções, de modo a subsidiar a formulação de políticas urbanas mais integradas, críticas e socialmente justas.

Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) pelo apoio recebido.

Referencias:

ANGUELOVSKI, Isabelle et al. Why green "climate gentrification" threatens poor and vulnerable populations. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 116, n. 52, p. 26139–26143, 2019.

BEATLEY, Timothy. Green urbanism. Washington: Island Press, 2000.

BENEDICT, Mark A.; MCMAHON, Edward T. Green infrastructure: linking landscapes and communities. Washington, DC: Island Press, 2006.

BOUTAUD, Aurélien; GONDRAN, Natacha. L'empreinte écologique. Paris: Éditions La Découverte, 2009.

ELIAS, Denise. Cidades médias e reestruturação produtiva no Brasil. Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, v. 9, n. 2, p. 57–74, 2007.

FARR, David. Sustainable urbanism: urban design with nature. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.

GEHL, Jan. Cidades para pessoas. Tradução de Anita Di Marco. São Paulo: Perspectiva, 2013.

HANSEN, Rieke; PAULEIT, Stephan. From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning. Ambio, v. 43, p. 516–529, 2014.

HARVEY, David. A justiça social e a cidade. São Paulo: Hucitec, 1980.

HARVEY, David. Cidades rebeldes: do direito à cidade à revolução urbana. São Paulo: Martins Fontes, 2014.

HARVEY, David. Condição pós-moderna: uma pesquisa sobre as origens da mudança cultural. São Paulo: Loyola, 1992.

HERZOG, Cecilia P. Guaratiba Verde: subsídios para o projeto de infraestrutura verde em área de expansão urbana na cidade do Rio de Janeiro. 2009. Dissertação (Mestrado em Urbanismo) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Urbanismo (PROURB), Rio de Janeiro, 2009.

LEFEBVRE, Henri. A produção do espaço. Tradução de Doralice Barros Pereira e Sérgio Martins. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006.

LEFEBVRE, Henri. O direito à cidade. São Paulo: Centauro, 2001.

MARICATO, Ermínia. O impasse da política urbana no Brasil. Petrópolis: Vozes, 2001.

NEWMAN, Peter; JENNINGS, Isabella. Cities as sustainable ecosystems: principles and practice. Washington: Island Press, 2008.

NEWMAN, Peter; BEATLEY, Timothy; BOYER, Heather. Resilient cities: responding to peak oil and climate change. Washington: Island Press, 2009.

ROLNIK, Raquel. Guerra dos lugares: a colonização da terra e da moradia na era das finanças. São Paulo: Boitempo, 2015.

SANTOS, Milton. A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção. São Paulo: Hucitec, 1996.

WOLCH, Jennifer R.; BYRNE, Jason; NEWELL, Joshua P. Urban green space, public health, and environmental justice: the challenge of making cities "just green enough". Landscape and Urban Planning, v. 125, p. 234–244, 2014.

YIN, Robert K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

APLICATIVO DE ALERTAS DE ENCHENTES PARA A AVENIDA RONDON PACHECO NO MUNICÍPIO DE UBERLÂNDIA (MG)

1 Sarah Hesse Lisboa, 2 Roberto Terumi Atarassi

1 Universidade Federal de Uberlândia - Instituto de Ciências Agrárias, e-mail: sarah.lisboa@ufu.br; 2 Universidade Federal de Uberlândia - Instituto de Ciências Agrárias, e-mail: robertota@ufu.br

Palavras-chave: Aplicativo; Mobile; Enchentes.

Introdução

O alagamento das vias urbanas apresenta um risco para a população como um todo. Deficiências na drenagem urbana e a impermeabilização do solo contribuem diretamente para o agravamento das enchentes. Motoristas, pedestres e motociclistas sofrem com chuvas intensas, que geram transtornos nas ruas, podendo, inclusive, tirar vidas. Localizada sobre o Córrego São Pedro, a Avenida Rondon Pacheco, na cidade de Uberlândia, é frequentemente afetada por enchentes, que impactam diretamente a segurança e a qualidade de vida dos cidadãos, causadas por um escoamento ineficiente e aumento no volume das chuvas que, segundo informações divulgadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) com dados da plataforma *Hobolink*, chegou 16% no ano de 2020. A ineficiência dos atuais meios de prevenção aponta a necessidade de outros meios de informação para a população da cidade que, nos períodos de chuva, sofre com os bloqueios da via pela água. O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um aplicativo móvel que notifique e alerte os usuários sobre enchentes na Avenida Rondon Pacheco, utilizando dados históricos de alagamentos e de precipitação pluviométrica, modelo de previsão de enchentes, um mapa em tempo real e ofereça rotas alternativas para os usuários.

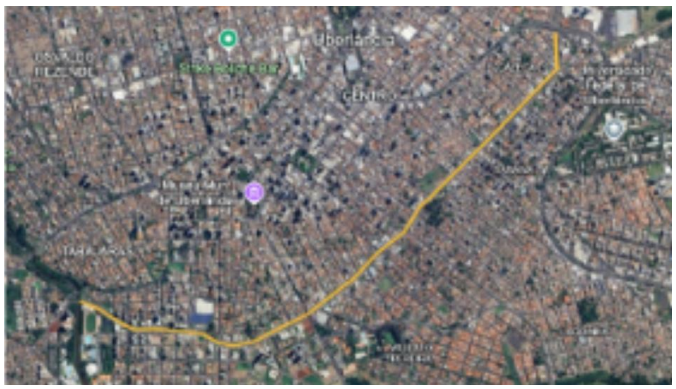


Figura 1: Trecho da avenida em estudo. Fonte: Google Earth (2024)

Materiais e Metodologias

Inicialmente, foi realizado uma revisão bibliográfica nas bases de dados CAPES e SciELO sobre a criação de aplicativos mobile. O framework *Flutter* foi escolhido para o desenvolvimento do aplicativo para possibilitar uma base de código compartilhada para uma aplicação que tenha compatibilidade com dispositivos Android e IOS. Também foram utilizadas outras aplicações para a parte de back-end e design do aplicativo, sendo elas *Figma* e *Firebase.*

A previsão de enchentes será feita por um modelo do tipo chuva-vazão, partir de dados de precipitação fornecidos por instituições como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Laboratório de Climatologia e Meteorologia Ambiental do ICIAG-UFU e dados do GPM IMERG baseados em satélites. O modelo de previsão tem como base a metodologia de Santa Bárbara, com o complemento da análise da drenagem urbana e das bacias hidrográficas que influenciam a Avenida Rondon Pacheco. As inundações serão simuladas por meio de softwares HEC-RAS ou SWMM, calibrado para o cenário da avenida.



Figura 2: Ferramentas utilizadas para o desenvolvimento do aplicativo. (Flutter - Firebase - Figma - Miro)

Resultados e Discussões

Testes iniciais apontam a capacidade do aplicativo de alertar os usuários com base em eventos de chuva fictícios na região, utilizando notificações push para o recebimento de informações atualizadas sobre alagamentos em tempo real. Esse funcionamento evidencia a viabilidade do aplicativo como uma ferramenta eficiente para a prevenção de acidentes locais. Além

disso, o sistema demonstra potencial para auxiliar na tomada de decisão dos usuários, permitindo que medidas preventivas sejam adotadas de forma mais rápida e consciente.

A integração de dados climáticos e o monitoramento contínuo das condições ambientais fortaleceriam ainda mais a confiabilidade dos alertas emitidos, contribuindo para a construção de uma plataforma mais precisa e responsiva. Nesse contexto, a tecnologia aplicada pode desempenhar um papel importante na redução de riscos e na mitigação dos impactos causados por eventos extremos de chuva.

A interação dos usuários poderá contribuir para um maior entendimento da população em relação aos processos de enchentes, suas causas e consequências, além de possibilitar o envio colaborativo de informações sobre pontos de alagamento. Isso tende a melhorar a qualidade dos dados coletados e ampliar a eficácia do sistema de alertas. Consequentemente, espera-se também um aumento no engajamento social em torno dessa problemática, incentivando a conscientização ambiental e a participação ativa da comunidade na busca por soluções sustentáveis e inovadoras para o enfrentamento de enchentes em áreas urbanas.



Figura 3: Interface do Aplicativo. Fonte: Autoral (2024)

Conclusões

O estudo de caso sobre a Avenida Rondon Pacheco indica um impacto importante da impermeabilização do solo e a rápida concentração de água na via e em suas áreas adjacentes como fatores que contribuem diretamente para a ocorrência de enchentes na região. Os resultados possibilitariam a previsão mais realista desses eventos, demonstrando o potencial de aplicação de um sistema tecnológico voltado ao monitoramento e alerta.

Dessa forma, observa-se que a proposta do aplicativo se mostra eficiente como ferramenta de prevenção de acidentes em locais sujeitos a alagamentos, contribuindo para a redução dos riscos associados a eventos hidrológicos recorrentes. Além disso, a utilização desse tipo de solução reforça a importância da integração entre tecnologia e planejamento urbano na mitigação dos impactos causados por enchentes, promovendo maior segurança à população e apoiando estratégias de gestão de riscos ambientais.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG) e à Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio recebido. Agradecemos também Kaylane Raquel Teixeira Silva e Odelmo Ferreira Neto pelo desenvolvimento do aplicativo, pela realização dos testes e pela disponibilização de textos e registros utilizados como base para a elaboração deste trabalho.

Referências Bibliográficas

ARAÚJO, Everton Coimbra. Aprofundando em Flutter: Desenvolva aplicações Dart com Widgets, São Paulo: Casa do Código. 2021. 317 p. Acesso em: 02 maio de 26

MENDES, Rafaela da Silva Vieira. **Modelagem Hidrológica e Hidráulica de Inundações da Avenida Governador Rondon Pacheco,** Uberlândia – MG. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Acesso em: 02 maio de 26

UBERLÂNDIA tem aumento do volume de chuvas de 16% em 2020. *Diário de Uberlândia*, Uberlândia, 05 jan. 2021. Disponível em: https://diariodeuberlandia.com.br/noticia/27447/uberlandia-tem-aumento-do-volume-de-chuvas-de-16-em-2020. Acesso em: 02 maio 2026.

JUSTIÇA DE USO DA INFRAESTRUTURA VERDE: ACESSO, QUALIDADE, ENGAJAMENTO E BEM-ESTAR MENTAL EM CIDADES METROPOLITANAS

1 Mirela Beatriz Silva, 2 Adriano Bressane
1 Universidade Estadual Paulista, e-mail: mirela.silva@unesp.br; 2 Universidade Estadual Paulista, e-mail: adriano.bressane@unesp.br

Palavras-chave: infraestrutura verde; justiça socioambiental; bem-estar mental.

Introdução

A infraestrutura verde urbana tem assumido papel estratégico no planejamento de cidades ambientalmente sustentáveis, saudáveis e socialmente inclusivas, pois parques, praças, corredores verdes, áreas arborizadas e jardins públicos oferecem funções ambientais, recreativas e de saúde pública (WHO, 2016; Kondo et al., 2018; Hunter et al., 2019). Evidências internacionais indicam associações entre contato com áreas verdes e melhores indicadores de saúde mental, incluindo redução de estresse, menor sofrimento psicológico, restauração da atenção e maior bem-estar subjetivo (Hartig et al., 2014; Twohig-Bennett e Jones, 2018; Bratman et al., 2019; White et al., 2019).

Entretanto, a presença física de áreas verdes não garante, por si só, benefícios ambientais e psicológicos distribuídos de maneira equitativa, pois a distribuição, a qualidade e a apropriação desses espaços podem variar conforme desigualdades sociais e territoriais (Wolch et al., 2014; Rigolon, 2016; Rigolon et al., 2018). Em metrópoles marcadas por segregação socioespacial, desigualdade de renda, racismo ambiental e assimetrias históricas de investimento público, a infraestrutura verde pode reproduzir desigualdades já existentes (Wolch et al., 2014; Rigolon et al., 2018; Anguelovski et al., 2019).

Essa constatação exige superar uma leitura meramente quantitativa da infraestrutura verde, pois indicadores como área verde por habitante, cobertura vegetal ou proximidade espacial podem não captar qualidade, segurança, manutenção e possibilidade real de uso (Nutsford et al., 2013; Rigolon, 2016; Rigolon et al., 2018). Estudos sobre acesso a parques e espaços verdes indicam que proximidade, disponibilidade e qualidade não são dimensões equivalentes, pois a presença territorial de áreas verdes pode coexistir com desigualdades de uso, manutenção e segurança percebida (Nutsford et al., 2013; Rigolon, 2016; Rigolon et al., 2018). Um parque formalmente próximo pode não ser utilizado se o trajeto for inseguro, se o espaço for mal mantido, se houver ausência de iluminação, equipamentos inadequados, barreiras físicas, exclusão simbólica ou baixa identificação dos moradores com o ambiente (Jennings et al., 2016; Wolch et al., 2014; Rigolon et al., 2018).

Nesse contexto, este trabalho propõe a noção de justiça de uso da infraestrutura verde como enquadramento analítico derivado de debates sobre justiça ambiental, acesso, qualidade, uso e saúde urbana (Wolch et al., 2014; Jennings et al., 2016; Rigolon et al., 2018; Hunter et al., 2019). Essa noção parte da ideia de que a justiça socioambiental não se encerra na distribuição espacial dos espaços verdes, mas envolve a capacidade real de diferentes grupos sociais alcançarem, utilizarem, permanecerem, sentirem-se seguros e obterem benefícios associados ao bem-estar nesses espaços (Wolch et al., 2014; Jennings et al., 2016; Rigolon et al., 2018). Assim, provisão, acesso, qualidade, engajamento e bem-estar devem ser compreendidos como dimensões interdependentes de um mesmo processo urbano, pois a literatura mostra que os benefícios da natureza urbana dependem tanto de condições ambientais quanto de formas concretas de uso (Hartig et al., 2014; Shanahan et al., 2016; White et al., 2019).

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma síntese crítico-conceitual sobre justiça de uso da infraestrutura verde, articulando literatura sobre espaços verdes urbanos, justiça socioambiental, engajamento e bem-estar mental (Wolch et al., 2014; Jennings et al., 2016; Rigolon et al., 2018; Bratman et al., 2019). Busca-se oferecer um enquadramento analítico capaz de apoiar o planejamento ambiental urbano em cidades metropolitanas, especialmente em contextos nos quais a expansão de áreas verdes precisa ser acompanhada por critérios de equidade, qualidade ecológica, acessibilidade segura e inclusão social (WHO, 2016; Rigolon et al., 2018; Hunter et al., 2019).

Material e Métodos

Este trabalho foi desenvolvido como uma síntese crítico-conceitual, abordagem adequada para organizar conceitos, integrar argumentos e propor enquadramentos interpretativos aplicáveis ao planejamento ambiental urbano (Hartig et al., 2014; Hunter et al., 2019). Esse delineamento foi adotado porque o objetivo não é apresentar uma revisão sistemática, estimar efeitos combinados ou reproduzir análises empíricas específicas, mas discutir evidências e argumentos relevantes para a infraestrutura verde sob a perspectiva da justiça socioambiental (Wolch et al., 2014; Rigolon et al., 2018; Hunter et al., 2019). A escolha por uma síntese conceitual é pertinente quando a literatura apresenta diferentes formas de mensuração, escalas analíticas e interpretações sobre contato com áreas verdes, acesso, qualidade e bem-estar mental (Nutsford et al., 2013; Van den Berg et al., 2015; Twohig-Bennett e Jones, 2018).

A construção do texto baseou-se em literatura científica publicada sobre espaços verdes urbanos, saúde mental, planejamento ambiental, justiça ambiental e desigualdades socioespaciais (Wolch et al., 2014; Van den Berg et al., 2015; Rigolon, 2016; Rigolon et al., 2018). Foram priorizados estudos e revisões que discutem associações entre contato com natureza urbana e bem-estar psicológico, distinções entre exposição, acesso e uso de áreas verdes, atributos de qualidade ambiental e

funcional dos espaços verdes, e desigualdades na distribuição e apropriação da infraestrutura verde (WHO, 2016; Twohig-Bennett e Jones, 2018; Bratman et al., 2019; White et al., 2019). A literatura selecionada também contemplou estudos sobre justiça ambiental, serviços ecossistêmicos culturais, determinantes sociais da saúde e equidade em espaços verdes urbanos (Wolch et al., 2014; Jennings et al., 2016; Rigolon et al., 2018; Hunter et al., 2019).

A análise foi conduzida por leitura interpretativa e organização temática da literatura em cinco dimensões interdependentes: provisão, acesso, qualidade, engajamento e bem-estar mental (Hartig et al., 2014; Shanahan et al., 2016; White et al., 2019). A provisão foi definida como existência e distribuição territorial dos espaços verdes, dimensão frequentemente avaliada por métricas de cobertura vegetal, disponibilidade ou proximidade espacial (Nutsford et al., 2013; Rigolon, 2016; Rigolon et al., 2018). O acesso foi definido como possibilidade de chegar aos espaços verdes em condições seguras, viáveis e socialmente aceitáveis, considerando que proximidade física nem sempre corresponde à acessibilidade real (Nutsford et al., 2013; Wolch et al., 2014; Rigolon et al., 2018). A qualidade foi definida como conjunto de atributos ecológicos, paisagísticos, físicos e funcionais, incluindo vegetação, sombreamento, biodiversidade, manutenção, limpeza, iluminação, equipamentos e segurança percebida (Jennings et al., 2016; Rigolon et al., 2018; Bratman et al., 2019). O engajamento foi definido como uso efetivo dos espaços verdes, incluindo frequência de visitação, tempo de permanência, atividades realizadas e experiências sociais ou restaurativas (Shanahan et al., 2016; White et al., 2019). O bem-estar mental foi definido como conjunto de indicadores psicológicos associados ao contato com natureza urbana, incluindo estresse, ansiedade, depressão, restauração e bem-estar subjetivo (Hartig et al., 2014; Twohig-Bennett e Jones, 2018; Bratman et al., 2019).

Essas dimensões foram articuladas em um percurso analítico que diferencia infraestrutura verde provida, infraestrutura verde acessível, infraestrutura verde qualificada, infraestrutura verde utilizada e infraestrutura verde associada ao bem-estar (Wolch et al., 2014; Jennings et al., 2016; Hunter et al., 2019). A partir dessa organização, formulou-se a noção de justiça de uso da infraestrutura verde como contribuição conceitual do trabalho, apoiada na literatura sobre justiça ambiental, saúde urbana e uso social dos espaços verdes (Wolch et al., 2014; Rigolon et al., 2018; Anguelovski et al., 2019). Essa abordagem permite integrar planejamento ambiental, saúde urbana e justiça socioambiental sem reduzir a análise à simples quantidade de vegetação disponível no território (WHO, 2016; Kondo et al., 2018; Hunter et al., 2019).

Resultados e Discussão

A organização temática da literatura permitiu identificar que a relação entre infraestrutura verde e bem-estar mental não pode ser compreendida como uma sequência automática entre presença de áreas verdes e benefícios psicológicos, pois as evidências apontam que a forma de contato, a qualidade ambiental e as condições sociais influenciam essa relação (Hartig et al., 2014; Shanahan et al., 2016; Twohig-Bennett e Jones, 2018). Essa relação depende de condições ambientais, sociais e urbanas que influenciam se os espaços verdes serão alcançados, utilizados e experienciados de forma positiva pela população (Wolch et al., 2014; Jennings et al., 2016; Rigolon et al., 2018). Essa constatação é especialmente importante em cidades metropolitanas, onde desigualdades territoriais, insegurança, mobilidade precária e diferenças de renda afetam a apropriação cotidiana dos espaços públicos (Wolch et al., 2014; Rigolon, 2016; Anguelovski et al., 2019).

A primeira dimensão identificada é a provisão, que corresponde à existência física e à distribuição territorial dos espaços verdes (Rigolon, 2016; Rigolon et al., 2018). A existência de áreas verdes é condição básica para qualquer política de infraestrutura verde, mas não é suficiente para caracterizar justiça socioambiental (Wolch et al., 2014; Rigolon et al., 2018). A distribuição territorial dos espaços verdes pode ser desigual e refletir padrões históricos de segregação urbana, investimento público assimétrico e valorização imobiliária seletiva (Wolch et al., 2014; Rigolon, 2016; Anguelovski et al., 2019). Indicadores agregados de cobertura vegetal podem ocultar diferenças relevantes entre grandes parques bem equipados, pequenas praças degradadas, áreas verdes inacessíveis ou fragmentos vegetados sem função social (Rigolon, 2016; Rigolon et al., 2018). Portanto, a provisão precisa ser avaliada juntamente com localização, conectividade, escala, função urbana e relação com os territórios onde os espaços estão inseridos (Wolch et al., 2014; Rigolon et al., 2018; Hunter et al., 2019).

A segunda dimensão é o acesso, que não deve ser entendido apenas como distância linear entre residência e espaço verde (Nutsford et al., 2013; Rigolon, 2016; Twohig-Bennett e Jones, 2018). A possibilidade real de uso depende de caminhabilidade, transporte público, segurança no trajeto, iluminação, barreiras viárias, topografia, tempo disponível, horários de funcionamento e percepção de risco (Wolch et al., 2014; Jennings et al., 2016; Rigolon et al., 2018). Estudos ecológicos e epidemiológicos indicam que o acesso a espaços verdes pode se associar a indicadores de saúde mental, mas também mostram que a forma de medir acesso influencia diretamente a interpretação dos achados (Nutsford et al., 2013; Van den Berg et al., 2015; Twohig-Bennett e Jones, 2018). Em muitos contextos urbanos, populações vulnerabilizadas podem estar próximas de espaços verdes e, ainda assim, não utilizá-los regularmente devido a condições inseguras, infraestrutura precária ou ausência de conectividade (Wolch et al., 2014; Jennings et al., 2016; Rigolon et al., 2018). Assim, políticas orientadas por justiça socioambiental devem avaliar não apenas se o espaço verde existe, mas se diferentes grupos conseguem chegar até ele em condições adequadas (Wolch et al., 2014; Rigolon et al., 2018; Hunter et al., 2019).

A terceira dimensão é a qualidade, entendida como conjunto de atributos ecológicos, físicos, sensoriais e funcionais que influenciam atratividade, permanência e potencial restaurativo dos espaços verdes (Hartig et al., 2014; Bratman et al., 2019; White et al., 2019). Naturalidade percebida, diversidade de vegetação, sombreamento, limpeza, manutenção, presença de bancos, banheiros, trilhas, equipamentos de lazer, áreas de descanso, iluminação e segurança são elementos que podem favorecer permanência e uso recorrente (Jennings et al., 2016; Rigolon et al., 2018; Hunter et al., 2019). Espaços degradados, sem manutenção ou percebidos como inseguros podem reforçar exclusão e subutilização, mesmo quando formalmente disponíveis

(Wolch et al., 2014; Rigolon, 2016; Rigolon et al., 2018). A qualidade, portanto, deve ser tratada como dimensão central da justiça de uso, pois influencia a possibilidade de transformar infraestrutura verde em experiência cotidiana favorável ao bem-estar (Hartig et al., 2014; Jennings et al., 2016; Bratman et al., 2019).

A quarta dimensão é o engajamento, compreendido como uso efetivo e experiência situada dos espaços verdes urbanos (Shanahan et al., 2016; White et al., 2019). O contato com espaços verdes pode envolver caminhada, contemplação, prática de atividade física, brincadeiras, socialização, descanso, deslocamento cotidiano, atividades culturais ou participação comunitária (Hartig et al., 2014; Jennings et al., 2016; White et al., 2019). Essas diferentes formas de uso têm significados distintos e podem se relacionar de maneira diversa ao bem-estar mental (Hartig et al., 2014; Shanahan et al., 2016; White et al., 2019). Estudos indicam que frequência de contato, duração da permanência e tipo de atividade são dimensões relevantes para compreender associações entre natureza urbana e saúde (Shanahan et al., 2016; White et al., 2019). Assim, o planejamento da infraestrutura verde deve criar condições para usos múltiplos, seguros e compatíveis com diferentes grupos sociais (Jennings et al., 2016; Rigolon et al., 2018; Hunter et al., 2019).

A quinta dimensão corresponde ao bem-estar mental, que abrange indicadores como estresse, ansiedade, depressão, restauração psicológica, afeto positivo e bem-estar subjetivo (Hartig et al., 2014; Twohig-Bennett e Jones, 2018; Bratman et al., 2019). Evidências acumuladas indicam que o contato com áreas verdes pode estar associado à redução de estresse, restauração psicológica, melhora do humor, maior atividade física, interação social e bem-estar subjetivo (Hartig et al., 2014; Twohig-Bennett e Jones, 2018; Bratman et al., 2019; White et al., 2019). Essas associações devem ser interpretadas com prudência, pois os benefícios não são universais nem automáticos e dependem da forma de contato, da qualidade do espaço, das características sociais dos usuários e das condições urbanas que favorecem ou limitam o engajamento (Van den Berg et al., 2015; Twohig-Bennett e Jones, 2018; Hunter et al., 2019). Revisões sobre espaços verdes e saúde reforçam que a heterogeneidade das medidas, dos contextos urbanos e dos perfis populacionais exige cautela na tradução direta dos achados para políticas públicas (Van den Berg et al., 2015; Twohig-Bennett e Jones, 2018; Hunter et al., 2019).

A partir dessas cinco dimensões, a justiça de uso da infraestrutura verde pode ser compreendida como a capacidade de diferentes grupos sociais acessarem e utilizarem espaços verdes de qualidade em condições que favoreçam experiências positivas e associações com bem-estar (Wolch et al., 2014; Jennings et al., 2016; Rigolon et al., 2018). Essa perspectiva amplia a noção tradicional de justiça distributiva, centrada na localização dos recursos ambientais, ao incorporar dimensões de reconhecimento, funcionalidade, segurança, qualidade e apropriação cotidiana (Wolch et al., 2014; Rigolon et al., 2018; Anguelovski et al., 2019). A pergunta central deixa de ser apenas “onde estão os espaços verdes?” e passa a incluir “quem consegue usá-los?”, “em que condições?”, “com qual qualidade?” e “com quais possibilidades de bem-estar?” (Wolch et al., 2014; Jennings et al., 2016; Rigolon et al., 2018). Essa formulação dialoga com a proposta de cidades “just green enough”, segundo a qual políticas de greening precisam evitar tanto a escassez ambiental quanto processos de exclusão associados à valorização urbana desigual (Wolch et al., 2014; Anguelovski et al., 2019).

Essa abordagem tem implicações diretas para cidades inteligentes, pois a inteligência urbana não deve ser limitada ao uso de tecnologias digitais, sensores, geoprocessamento ou indicadores automatizados (Kondo et al., 2018; Hunter et al., 2019). Embora essas ferramentas sejam importantes para mapear cobertura vegetal, temperatura, drenagem, conectividade e acessibilidade, elas precisam ser integradas a informações sociais, perceptivas e participativas para orientar decisões ambientalmente qualificadas e socialmente justas (Jennings et al., 2016; Kondo et al., 2018; Hunter et al., 2019). Uma cidade ambientalmente inteligente é aquela capaz de combinar dados espaciais com evidências sobre uso, segurança, manutenção, pertencimento e necessidades diferenciadas dos moradores (Jennings et al., 2016; Hunter et al., 2019). Assim, o planejamento da infraestrutura verde deve articular inovação técnica, promoção da saúde e justiça socioambiental (WHO, 2016; Kondo et al., 2018; Hunter et al., 2019).

A justiça de uso também permite qualificar políticas públicas, pois estratégias genéricas de ampliação de áreas verdes podem ter baixo impacto social se não considerarem territórios prioritários, qualidade dos espaços criados, manutenção de longo prazo e barreiras enfrentadas por grupos vulnerabilizados (Wolch et al., 2014; Rigolon et al., 2018; Anguelovski et al., 2019). Mulheres podem experimentar restrições relacionadas à segurança e ao cuidado, enquanto pessoas idosas podem depender de acessibilidade física, sombreamento, bancos e banheiros para utilizar espaços verdes com maior frequência e conforto (Jennings et al., 2016; Rigolon et al., 2018; Hunter et al., 2019). Crianças e jovens podem necessitar de espaços lúdicos, protegidos e socialmente acolhedores, enquanto populações de baixa renda e grupos racializados podem enfrentar desigualdades acumuladas de mobilidade, investimento urbano e qualidade ambiental (Wolch et al., 2014; Jennings et al., 2016; Rigolon et al., 2018). Portanto, infraestrutura verde justa exige planejamento sensível às diferenças sociais e às condições concretas de uso dos espaços (Wolch et al., 2014; Rigolon et al., 2018; Hunter et al., 2019).

Os resultados desta síntese indicam que a infraestrutura verde deve ser planejada como sistema socioecológico, pois vegetação, solo, água, clima urbano, equipamentos, mobilidade, segurança, práticas sociais e saúde mental formam um conjunto interdependente (Jennings et al., 2016; Kondo et al., 2018; Hunter et al., 2019). A vegetação urbana não é apenas elemento físico da paisagem, mas parte de uma rede de relações ambientais e sociais que influencia experiências cotidianas, saúde urbana e equidade (Jennings et al., 2016; Bratman et al., 2019; Hunter et al., 2019). Quando bem planejada, mantida e apropriada, a infraestrutura verde pode contribuir para cidades mais saudáveis, resilientes e inclusivas (WHO, 2016; Kondo et al., 2018; Hunter et al., 2019). Quando mal distribuída, inacessível ou degradada, a infraestrutura verde pode reproduzir desigualdades e limitar seu próprio potencial de promoção da saúde (Wolch et al., 2014; Rigolon et al., 2018; Anguelovski et al., 2019).

Considerações Finais

Este trabalho propôs a noção de justiça de uso da infraestrutura verde como enquadramento analítico para articular planejamento ambiental urbano, justiça socioambiental e bem-estar mental (Wolch et al., 2014; Jennings et al., 2016; Rigolon et al., 2018). A síntese indica que a equidade na infraestrutura verde depende de cinco dimensões interdependentes: provisão, acesso, qualidade, engajamento e retornos associados ao bem-estar (Hartig et al., 2014; Shanahan et al., 2016; White et al., 2019). Essas dimensões ajudam a diferenciar a simples presença territorial de áreas verdes da possibilidade real de uso qualificado e socialmente inclusivo (Wolch et al., 2014; Rigolon et al., 2018; Hunter et al., 2019).

Para o planejamento de cidades inteligentes e sustentáveis, os resultados sugerem que indicadores ambientais devem ser integrados a informações sociais e perceptivas (Kondo et al., 2018; Hunter et al., 2019). Mapas de cobertura vegetal, proximidade e temperatura urbana são importantes, mas precisam dialogar com dados sobre segurança, uso cotidiano, barreiras de acesso, manutenção e necessidades locais (Jennings et al., 2016; Hunter et al., 2019). Desse modo, a infraestrutura verde pode deixar de ser tratada apenas como recurso ambiental e passar a ser planejada como política pública de saúde urbana e justiça socioambiental (WHO, 2016; Kondo et al., 2018; Hunter et al., 2019).

Como limitação, o trabalho apresenta uma síntese crítico-conceitual, sem estimativa quantitativa de efeitos, coleta primária de dados ou avaliação sistemática de risco de viés (Van den Berg et al., 2015; Hunter et al., 2019). Estudos posteriores devem combinar dados espaciais, indicadores ambientais objetivos, medidas perceptivas, informações sobre uso efetivo e análises de desigualdade para avaliar com maior precisão como a infraestrutura verde pode contribuir para cidades metropolitanas mais saudáveis, inteligentes e socialmente justas (WHO, 2016; Rigolon et al., 2018; Hunter et al., 2019).

Referências Bibliográficas

ANGUELOVSKI, I.; CONNOLLY, J. J. T.; GARCIA-LAMARCA, M.; COLE, H.; PEARSALL, H. New scholarly pathways on green gentrification: What does the urban “green turn” mean and where is it going? Progress in Human Geography, v. 43, n. 6, p. 1064-1086, 2019.

BRATMAN, G. N.; ANDERSON, C. B.; BERMAN, M. G.; COCHRAN, B.; DE VRIES, S.; FLANDERS, J.; FOLKE, C.; FRUMKIN, H.; GROSS, J. J.; HARTIG, T.; KAHN, P. H.; KUO, M.; LAWLER, J. J.; LEVIN, P. S.; LINDO, J.; MEYER-LINDENBERG, A.; MITCHELL, R.; OUYANG, Z.; ROE, J.; SCARLETT, L.; SMITH, J. R.; VAN DEN BOSCH, M.; WHEELER, B. W.; WHITE, M. P.; ZHENG, H.; DAILY, G. C. Nature and mental health: An ecosystem service perspective. Science Advances, v. 5, n. 7, eaax0903, 2019.

HARTIG, T.; MITCHELL, R.; DE VRIES, S.; FRUMKIN, H. Nature and health. Annual Review of Public Health, v. 35, p. 207-228, 2014.

HUNTER, R. F.; CLELAND, C.; CLEARY, A.; DWYER, M.; BARRY, J.; CAVAN, G.; DONNELLY, M.; CUPPLES, M.;

GIBBONS, R.; TULLY, M. A. Environmental, health, wellbeing, social and equity effects of urban green space interventions: A meta-narrative evidence synthesis. Environment International, v. 130, 104923, 2019.

JENNINGS, V.; LARSON, L.; YUN, J. Advancing sustainability through urban green space: Cultural ecosystem services, equity, and social determinants of health. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 13, n. 2, 196, 2016.

KONDO, M. C.; FLUEHR, J. M.; MCCKEON, T.; BRANAS, C. C. Urban green space and its impact on human health. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 15, n. 3, 445, 2018.

NUTSFORD, D.; PEARSON, A. L.; KINGHAM, S. An ecological study investigating the association between access to urban green space and mental health. Public Health, v. 127, n. 11, p. 1005-1011, 2013.

RIGOLON, A. A complex landscape of inequity in access to urban parks: A literature review. Landscape and Urban Planning, v. 153, p. 160-169, 2016.

RIGOLON, A.; BROWNING, M. H. E. M.; JENNINGS, V. Inequities in the quality of urban park systems: An environmental justice investigation of cities in the United States. Landscape and Urban Planning, v. 178, p. 156-169, 2018.

SHANAHAN, D. F.; BUSH, R.; GASTON, K. J.; LIN, B. B.; DEAN, J.; BARBER, E.; FULLER, R. A. Health benefits from nature experiences depend on dose. Scientific Reports, v. 6, 28551, 2016.

TWOHIG-BENNETT, C.; JONES, A. The health benefits of the great outdoors: A systematic review and meta-analysis of greenspace exposure and health outcomes. Environmental Research, v. 166, p. 628-637, 2018.

VAN DEN BERG, M.; WENDEL-VOS, W.; VAN POPPEL, M.; KEMPER, H.; VAN MECHELEN, W.; MAAS, J. Health benefits of green spaces in the living environment: A systematic review of epidemiological studies. Urban Forestry & Urban Greening, v. 14, n. 4, p. 806-816, 2015.

WHITE, M. P.; ALCOCK, I.; GREENING, B.; WHEELER, B. W.; HARTIG, T.; WARBER, S. L.; BONE, A.; DEPLEDGE, M. H.; FLEMING, L. E. Spending at least 120 minutes a week in nature is associated with good health and wellbeing. Scientific Reports, v. 9, 7730, 2019.

WHO. Urban green spaces and health: a review of evidence. Copenhagen: World Health Organization Regional Office for Europe, 2016.

WOLCH, J. R.; BYRNE, J.; NEWELL, J. P. Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities “just green enough”. Landscape and Urban Planning, v. 125, p. 234-244, 2014.

A CONSTRUÇÃO DE CIDADES INTELIGENTES E A ATUAÇÃO DOS PROFISSIONAIS DAS ENGENHARIAS E TECNOLOGIAS NA GESTÃO PÚBLICA

1 Daniela Belchior Brito, 2 Vinicius Marchese Marinelli, 3 João Alexandre Paschoalin Filho

1 Universidade Nove de Julho – UNINOVE, e-mail: daniela.belchior@gmail.com, 2 Universidade Nove de Julho - UNINOVE, e-mail: viniciusmarchese@gmail.com; 3 Universidade Nove de Julho - UNINOVE, e-mail: jalexandre@uni9.pro.br

Palavras-chave: Gestão Pública; Cidades Inteligentes; Capacitação Profissional.

Introdução

O planejamento urbano contemporâneo enfrenta desafios crescentes impostos pela urbanização acelerada e pelas mudanças climáticas, exigindo que as administrações municipais adotem modelos de gestão mais eficientes, resilientes e sustentáveis. No contexto brasileiro, observa-se uma lacuna persistente entre o planejamento das políticas públicas e sua execução efetiva, muitas vezes agravada pela carência de equipes técnicas qualificadas, especialmente em municípios de pequeno e médio porte (Holanda, 2020). A consolidação de cidades inteligentes (smart cities) depende não apenas da adoção de tecnologias avançadas, mas fundamentalmente da capacidade institucional e da formação técnica dos gestores responsáveis pela condução das políticas urbanas.

Nesse cenário, a qualificação do capital humano emerge como fator determinante para a transformação das estruturas administrativas locais. O Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Estado de São Paulo (Crea-SP), reconhecendo seu papel estratégico, instituiu o programa Trilha de Desenvolvimento em Gestão Pública, voltado à capacitação de engenheiros e tecnólogos que atuam na administração pública municipal. Assim, o objetivo do presente trabalho é analisar o impacto dessa iniciativa na construção de competências voltadas ao desenvolvimento de cidades inteligentes e sustentáveis, alinhando-se à temática de Infraestrutura Verde e Cidades Inteligentes, neste sentido, são discutidos como a governança técnica qualificada pode viabilizar a implementação de soluções urbanas inovadoras.

Material e Métodos

A pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso de natureza aplicada, com abordagem mista (qualitativa e quantitativa) e caráter exploratório-descritivo. O objeto de estudo foi o programa Trilha de Desenvolvimento em Gestão Pública do Crea-SP, que abrange 12 módulos temáticos, incluindo tópicos como Gestão de Pessoas, Orçamento Público, Sustentabilidade nas Compras Públicas, Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) e a norma ISO 37122 para Cidades Inteligentes.

A coleta de dados envolveu revisão bibliográfica e documental, além da aplicação de um formulário eletrônico direcionado aos 1.066 profissionais inscritos no programa em 2024. Obteve-se uma amostra de 31 respostas válidas, composta majoritariamente por profissionais experientes na faixa etária de 31 a 50 anos. Para a análise dos dados qualitativos, utilizou-se a Análise Textual Discursiva (ATD) com o suporte do software IRAMUTEQ. Foram aplicadas técnicas de Classificação Hierárquica Descendente (CHD), Análise Fatorial de Correspondências (AFC), Análise de Similitude e Nuvem de Palavras, permitindo identificar os núcleos de sentido e as percepções dos participantes sobre a efetividade da capacitação.

Resultados e Discussão

Os resultados indicam uma alta taxa de satisfação dos participantes com o programa (aproximadamente 95%), validando a relevância dos conteúdos para o exercício profissional na gestão pública. A análise lexical revelou que termos como "gestão", "cidade", "serviço" e "engenharia" são centrais no discurso dos respondentes, evidenciando a percepção de que a qualificação técnica é o pilar estruturante para enfrentar os desafios urbanos.

Na Figura 01, a análise demonstra a proximidade de significância entre as palavras, onde fica evidente pelos discursos analisados, o destaque percebido pelo conhecimento aos profissionais, gestores públicos que atuam no desenvolvimento de cidades inteligentes, sustentáveis e resilientes. Contudo, deste entendimento derivam análises quanto ao impacto da burocracia, das capacidades técnicas e da eficiência na administração pública. Por outro lado, percebe-se que o mercado atua demandando serviços especializados e técnicos dos profissionais das engenharias e tecnologias.

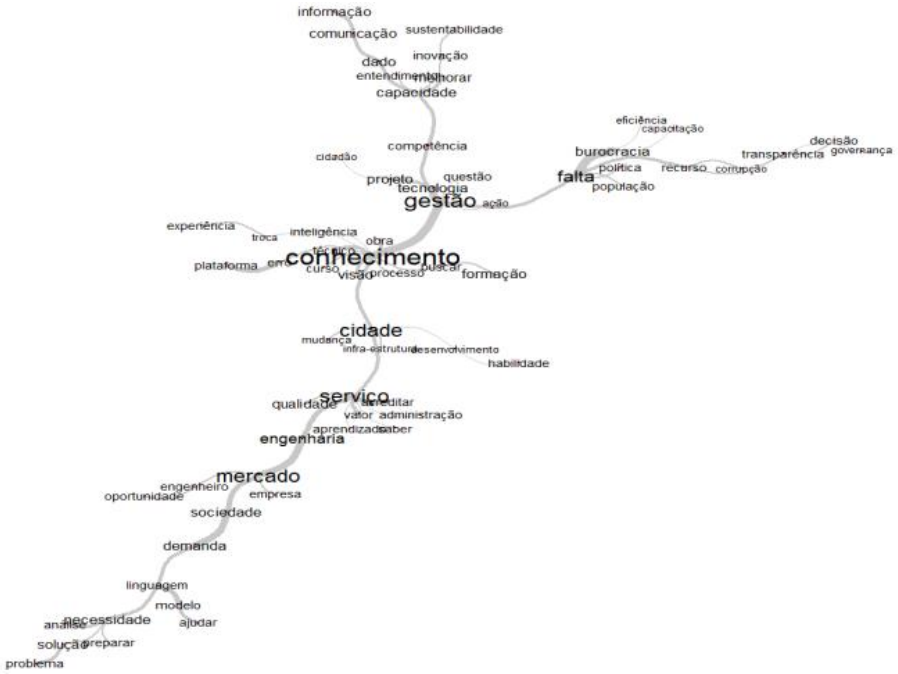


Figura 01: Análise de Similitude.
Fonte: Os autores (2025).

Assim, o desafio na gestão pública se apresenta como urgente ao necessitar se adaptar às condições atuais da sociedade e do mercado em infraestrutura sustentável e na promoção da qualidade de vida dos cidadãos. É importante destacar ainda o termo "inovação" e "tecnologia" que derivam de "gestão" no gráfico de similitude. Esta menção incorpora mecanismos de modernização como ferramentas para potencializar a eficiência nos serviços, mas também na atuação dos profissionais que atuam nesta frente.

A Classificação Hierárquica Descendente (CHD) permitiu identificar que, embora a capacitação contribua significativamente para o fortalecimento das competências individuais, a persistência de uma cultura organizacional burocrática e a escassez de recursos tecnológicos ainda constituem obstáculos à plena adoção de práticas de cidades inteligentes. Os participantes destacaram que a inteligência urbana deve ser adaptativa, respeitando as características locais e utilizando dados para aproximar a gestão das demandas reais da população.

A seguir, na Figura 02, apresenta-se análise Fatorial por Correspondência (AFC), que pode ser compreendida como um desdobramento ou uma funcionalidade intrínseca da Classificação Hierárquica Descendente (CHD). No contexto da AFC, é comum a visualização de um plano cartesiano que ilustra os distintos agrupamentos de termos, os quais formam as Classes estabelecidas previamente pela CHD.

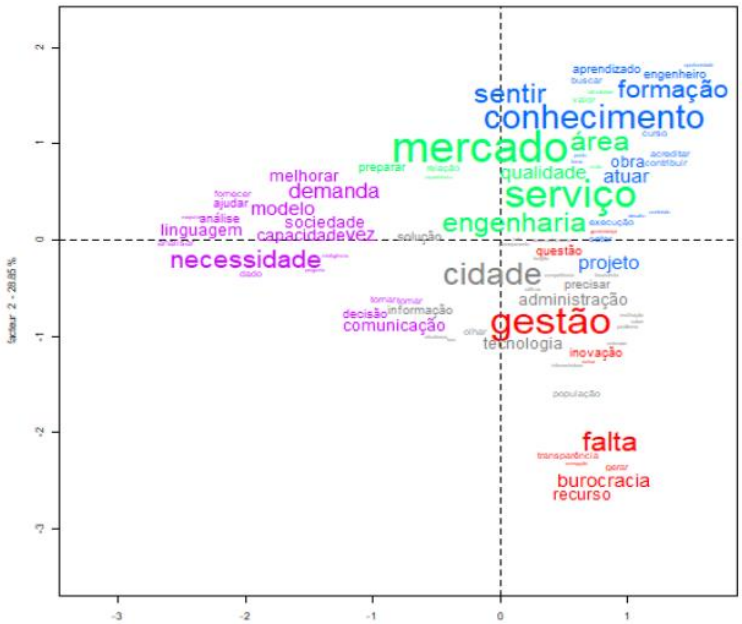


Figura 02: Análise fatorial por correspondência.
Fonte: Os autores (2025).

Essa organização dos fatores permite compreender as dimensões discursivas predominantes entre os respondentes, refletindo tanto percepções individuais sobre a formação profissional quanto críticas estruturais sobre o funcionamento da gestão pública.

A análise conjunta demonstra que a falta de recursos e a burocracia, proeminentes no gráfico, são barreiras estruturais e estratégicas na gestão pública, dificultando a execução de projetos inovadores, como apontado tanto pelos entrevistados quanto pela literatura. Complementarmente, os resultados demonstram que o aprimoramento técnico, por si só, não é suficiente para promover mudanças significativas na administração pública, sendo necessário repensar as estruturas organizacionais e os modelos de gestão que sustentam as práticas administrativas.

No contexto da infraestrutura verde e cidades inteligentes, a pesquisa demonstrou que gestores capacitados possuem maior facilidade em formular e executar políticas voltadas à eficiência energética, resiliência urbana e governança digital. A compreensão da norma ISO 37122, abordada na Trilha, foi apontada como um diferencial para o monitoramento de indicadores de sustentabilidade, permitindo que o planejamento urbano se traduza em ações concretas e resultados mensuráveis.

Considerações Finais

O estudo conclui que investir na capacitação profissional de engenheiros e tecnólogos é indispensável para o fortalecimento da governança municipal e a consolidação de cidades inteligentes e sustentáveis. O programa do Crea-SP demonstra ser uma ferramenta eficaz para reduzir a lacuna entre o planejamento e a execução de políticas públicas, promovendo uma administração mais técnica, ética e orientada por evidências.

A transformação das cidades brasileiras em ambientes mais resilientes e inteligentes depende da superação de entraves estruturais e da valorização do capital humano. A educação continuada, aliada à transformação da cultura administrativa, representa o caminho para que a inovação tecnológica se converta em valor público e melhoria efetiva da qualidade de vida urbana.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer o Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Estado de São Paulo e a Universidade Nove de Julho tpelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ANDRADE, Adriano Mello. Escolas de governo e seu papel no aperfeiçoamento do desempenho dos servidores públicos. **RECIMA21 – Revista Científica Multidisciplinar**, v. 2, n. 5, p. e25350, 2021.

CARVALHO, K. S.; LA FALCE, J. L.; VERWALL, E.; GIMARÃES, L. V. M. The influence of public service motivation on job satisfaction. **Gestão & Regionalidade**, v. 40, e20248401, 2024

CAVALCANTE, Ailton Ferreira; SILVESTRE FILHO, Irajá; OLIVEIRA, Valdivino José de. A importância da educação continuada para líderes públicos: propostas para o desenvolvimento de competências em gestão pública. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, v. 14, n. 1, p. e1519, 2025.

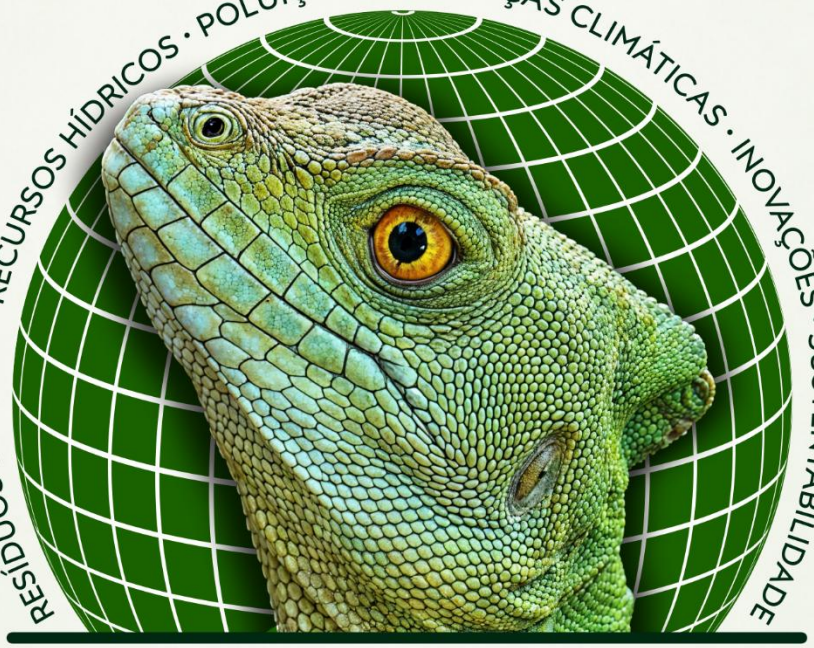
KAPUCU, N. et al. Urban resilience: multidimensional perspectives, challenges and prospects for future research. **Urban Governance**, v. 4, n. 3, p. 162–179, set. 2024.

LÓPEZ-BALDOMINOS, Inés et al. Modeling and analyzing the availability of technical professional profiles for the success of smart cities projects in Europe**. Sensors** (Basel, Switzerland), v. 24, n. 18, p. 6089, 2024.

ZUCARO, A.; AGOSTINHO, F. Urban sustainability: challenges and opportunities for resilient and resource-efficient cities. **Frontiers in Sustainable Cities**, v. 7, p. 1556974, 2025.

ÁREA TEMÁTICA 15

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E SUSTENTABILIDADE



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

A REVOLUÇÃO DIGITAL NO CAMPO: O IMPACTO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA EFICIÊNCIA E SUSTENTABILIDADE DO AGRONEGÓCIO CONTEMPORÂNEO

1 Cesar Augusto Della Piazza, 2 Bruna Cassia de Moraes, 3 Fabricio Cléber Arthuso
1 Centro Estadual de Educação Tecnológica " Paula Souza"Americana, dela_piazza@yahoo.com.br; 2 Centro Estadual de Educação Tecnológica " Paula Souza"Americana, bruna.cassiaa@gmail.com; 3 Centro Estadual de Educação Tecnológica " Paula Souza" ETEC Rio das Pedras, e-mail: fcarthuso@gmail.com

Palavras-chave: Inteligência artificial; agronegócio; inovação.

Introdução

O agronegócio é, sem dúvida, a espinha dorsal de muitas nações ao redor do mundo, servindo não apenas como um motor econômico, mas como o garantidor da segurança alimentar global. No entanto, o cenário atual impõe desafios que os métodos tradicionais já não conseguem suprir sozinhos. Se vive um momento de pressão sem precedentes: de um lado, a necessidade de produzir cada vez mais; de outro, a escassez de recursos naturais e as incertezas provocadas pelas mudanças climáticas. É nesse horizonte de dificuldades que a tecnologia deixa de ser um acessório de luxo para se tornar a protagonista de uma nova era no campo.

A chegada de ferramentas inteligentes ao cotidiano rural representa uma das transformações mais profundas da nossa história recente. Mais do que simples máquinas, estamos falando de sistemas capazes de aprender com o ambiente, de enxergar detalhes invisíveis ao olho humano e de auxiliar o produtor em decisões que, antes, dependiam apenas da intuição ou de um conhecimento passado entre gerações. No Brasil e no mundo, essa revolução silenciosa está redesenhando desde o manejo de pequenas hortas até a gestão de grandes rebanhos, trazendo uma precisão que economiza água, evita desperdícios químicos e respeita, acima de tudo, o tempo da terra.

Essa transição para o digital não acontece de forma isolada, mas reflete uma mudança de mentalidade onde o dado se torna tão valioso quanto a semente. Hoje, a capacidade de antecipar uma praga ou de ajustar a irrigação conforme a necessidade exata da planta pode determinar o sucesso ou o fracasso de uma safra inteira. Além disso, o alcance dessas inovações começa a quebrar barreiras geográficas, chegando a regiões com infraestrutura limitada, como ocorre em diversos países africanos. Nesses locais, a tecnologia tem sido a chave para incluir pequenos produtores no mercado, oferecendo serviços financeiros e informações que garantem o sustento de comunidades inteiras.

Portanto, entender esse movimento é essencial para quem busca um agronegócio que seja, ao mesmo tempo, produtivo e ético. A modernização do campo não é apenas sobre códigos ou circuitos; é sobre pessoas, sobrevivência e a construção de um futuro onde a produção de alimentos seja inteligente, sustentável e capaz de resistir às pressões do novo século. Trata-se de uma reconfiguração do próprio paradigma de como produzimos o que chega à nossa mesa.

O objetivo deste trabalho é discutir e analisar as principais aplicações da inteligência artificial no agronegócio, explorando como o uso de tecnologias de aprendizado e visão computacional transforma a agricultura de precisão e o manejo na pecuária. Além disso, a pesquisa busca avaliar o impacto dessas inovações na digitalização de mercados e na inclusão produtiva em regiões com diferentes níveis de desenvolvimento tecnológico, garantindo um contraponto entre sistemas intensivos e contextos com limitações estruturais, como o observado no continente africano.

Material e Métodos

Este trabalho foi construído a partir de uma revisão da literatura, reunindo estudos recentes que tratam do uso da inteligência artificial no agronegócio. A ideia central foi mapear aplicações concretas da IA tanto em sistemas produtivos intensivos em tecnologia quanto em contextos com limitações estruturais mais acentuadas, como é o caso de algumas regiões africanas.

A busca pelos materiais partiu de consultas em bases como SciELO, Google Acadêmico e Scopus, utilizando combinações de termos como "inteligência artificial na agricultura", "redes neurais na pecuária", "deep learning no campo" e "inovações digitais na África". Foram priorizados artigos publicados entre 2019 e 2025, com ênfase naqueles que traziam dados empíricos, revisões sistemáticas ou relatos de caso. No total, oito referências foram selecionadas por sua pertinência e contribuição direta aos temas abordados no resumo.

A leitura e a organização do conteúdo seguiram uma lógica temática: primeiro, reuniram-se os achados sobre aplicações da IA em lavouras, detecção de doenças, manejo da irrigação, previsão de safras e, em seguida, os trabalhos voltados à pecuária, com destaque para monitoramento animal e eficiência produtiva. Por fim, buscou-se articular essas evidências com as particularidades apontadas por autores que estudaram a digitalização do agro na África, de modo a garantir contrapontos regionais e evitar generalizações apressadas.

Resultados e Discussão

A inteligência artificial tem se consolidado como um dos principais vetores de transformação do agronegócio contemporâneo. Sua capacidade de processar grandes volumes de dados e identificar padrões complexos a torna particularmente

adequada para um setor onde variáveis como clima, solo e saúde das plantas desempenham papéis críticos na produtividade. Como apontam Muraki, Golombiéski e Vaz (2024), as redes neurais, uma das técnicas centrais da IA, simulam o funcionamento do cérebro humano e têm demonstrado potencial expressivo para enfrentar desafios como a otimização de processos produtivos, o monitoramento de lavouras e a melhoria da gestão de recursos.

Na agricultura, uma das aplicações mais avançadas é a detecção precoce de doenças em culturas vegetais. Redes neurais treinadas com imagens foliares conseguem identificar variações sutis de coloração, textura e padrão que escapam à observação humana, permitindo intervenções rápidas que limitam a propagação de patógenos e reduzem perdas na colheita. Tanaka et al. (2024) reforçam que o uso de deep learning para identificação de doenças em culturas representa um avanço concreto na capacidade de resposta do produtor, especialmente em grandes áreas onde a inspeção manual seria inviável.

A gestão da irrigação é outro campo em que a IA tem produzido resultados concretos. Silva (2022) demonstrou, em estudo com cultura de pimentão vermelho, que sistemas de manejo baseados em IA, integrando micro estação meteorológica e servidor local, resultaram em irrigação mais precisa, com economia de água e energia e melhoria na saúde das plantas. Esse tipo de abordagem automatizada, como observam Muraki, Golombiéski e Vaz (2024), reduz os custos operacionais e previne problemas como a lixiviação de nutrientes, que compromete a qualidade do solo em longo prazo.

No campo da pecuária, Silva et al. (2023) realizaram uma revisão abrangente sobre o tema e concluíram que a IA oferece possibilidades relevantes de identificação e contagem remota de animais, monitoramento comportamental e formação de banco de dados individualizados por animal. Os autores destacam que essa tecnologia permite ao produtor e ao técnico responsável traçar estratégias que maximizem a produção e reduzam custos, ao mesmo tempo em que contribui para o desenvolvimento de um negócio mais sustentável. Na pecuária leiteira, especificamente, há aplicações já em uso para detecção de mastite por machine learning, monitoramento do estresse térmico por termografia e ajuste automatizado de dietas com base no desempenho individual de cada vaca.

No contexto africano, Saene et al. (2025) identificaram que as inovações digitais no agronegócio do continente se agrupam em quatro tipologias principais: serviços de consultoria e informação de mercado, ferramentas de e-marketing agrícola, serviços financeiros eletrônicos e plataformas de coleta de dados por crowdsourcing. Os autores argumentam que, apesar do avanço da telefonia móvel e da expansão das plataformas digitais, a transformação efetiva dos sistemas agrícolas africanos depende de investimentos públicos consistentes em infraestrutura, de políticas institucionais adequadas e de maior protagonismo dos pesquisadores do próprio continente na produção do conhecimento sobre o tema.

Na gestão da irrigação, Muraki, Golombiéski e Vaz (2024) descrevem sistemas que monitoram continuamente temperatura foliar, umidade do solo e condições climáticas, ajustando automaticamente a lâmina de irrigação — o que reduz desperdício, custos operacionais e previne a lixiviação de nutrientes. A experiência documentada por Silva (2022), também referenciada pelos autores, com o cultivo do pimentão vermelho, mostrou resultados mensuráveis de melhora na saúde das plantas e na produtividade.

Sobre previsão de safras, Muraki, Golombiéski e Vaz (2024) sistematizam que redes neurais simples, trabalhando com variáveis climáticas básicas, alcançam precisão média entre 60% e 70%. Com a incorporação de índices vegetativos, dados de solo e imagens periódicas das plantações, aliados a algoritmos como o Bayesian Classifier, essa acurácia pode chegar a 87,7%.

Silva et al. (2023) documentam que, embora a adoção da IA na pecuária seja mais recente e menos uniforme do que nas lavouras, os avanços são expressivos. O monitoramento de conforto térmico em bovinos via câmeras termográficas e redes neurais — como demonstrado por Pacheco (2019), citado pelos autores, permite identificar animais em estresse calórico com base em correlações entre temperatura facial e parâmetros fisiológicos. Já o uso de visão computacional para estimativas biométricas, como peso corporal e medidas de carcaça, elimina a necessidade de conduzir os animais ao curral, reduzindo estresse e custos. Silva et al. (2023) destacam ainda o uso crescente de drones com algoritmos de Redes Neurais Convolucionais (CNN) para contagem e monitoramento de animais em pastagem — solução particularmente relevante para a realidade de rebanhos extensivos em países de escala continental como o Brasil.

Colnago e Oliva (2021) argumentam que a IA ultrapassa o plano operacional e alcança a dimensão gerencial do agronegócio, oferecendo ferramentas de análise preditiva para acompanhamento de tendências de mercado, antecipação de flutuações de preços e identificação de oportunidades comerciais. Os autores reportam que o mercado de IA agrícola está projetado para crescer 25,5% ao ano entre 2020 e 2026. Casos práticos como os da startup Cromai, que reduziu o uso de herbicidas em até 65% com drones em lavouras de cana e soja e da Fundação Chapadão com a Smart Agri, que gerou economia de até 60% nas perdas de soja na colheita, ilustram o potencial concreto dessas soluções no Brasil.

Considerações Finais

A investigação realizada permite concluir que a Inteligência Artificial (IA) não representa apenas uma evolução incremental, mas uma mudança de paradigma que redefine a competitividade no agronegócio global. A robustez dos dados apresentados demonstra que a integração de redes neurais e sistemas de *deep learning* viabiliza uma transição necessária da agricultura convencional para uma agricultura de ultraprecisão, capaz de responder em tempo real a variáveis críticas como o estresse hídrico e a incidência de patógenos. Os ganhos de eficiência documentados, que em casos práticos como os das empresas Cromai e Smart Agri superam 60% em economia de insumos e redução de perdas, validam a IA como um motor indispensável para a sustentabilidade econômica das propriedades rurais modernas.

Ademais, ressalta-se que a aplicação da visão computacional e da termografia na pecuária eleva o padrão de bem-estar animal e eficiência produtiva, eliminando gargalos históricos de manejo e reduzindo custos operacionais através da monitoração

não invasiva. Contudo, a análise do contexto internacional, particularmente no continente africano, revela que o potencial transformador dessas inovações está intrinsecamente ligado à democratização do acesso digital e à superação de barreiras infraestruturais.

Em suma, o futuro do setor depende de uma visão sistêmica que harmonize o avanço dos algoritmos com políticas públicas de inclusão tecnológica. A IA deve ser encarada como o plano de inteligência que conecta o campo ao mercado consumidor, permitindo uma gestão preditiva que antecipe flutuações e minimize riscos climáticos. Portanto, a consolidação desse novo modelo produtivo exige o protagonismo contínuo da pesquisa científica e o investimento em conectividade, garantindo que o agronegócio permaneça como um pilar de inovação, segurança alimentar e desenvolvimento socioeconômico sustentável.

Referências Bibliográficas.

COLNAGO, M. R.; OLIVA, F. A. Inteligência artificial na moderna gestão do agronegócio: tendências e desafios. **Revista Alomorfia**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 118-135, 2021.

MARR, B. **Artificial Intelligence in Practice**: How 50 successful companies used AI and Machine Learning to solve problems. [S. l.]: Wiley, 2019.

MURAKI, M. F.; GOLOMBIÉSKI, E. E.; VAZ, M. S. M. G. Aplicações de inteligência artificial no agronegócio. In: WORKSHOP DE COMPUTAÇÃO APLICADA À GESTÃO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS (WCAMA), 15., 2024, Brasília. **Anais [...]**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2024. p. 81-90.

PACHECO, V. M. **Desenvolvimento de classificador de conforto térmico para bovinos de leite por meio de redes neurais artificiais e termografia infravermelha**. 2019. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2019.

SAENE, D. M. et al. Inovações no agronegócio sustentável africano. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, Miami, v. 19, n. 8, e013084, 2025.

SILVA, A. M. da et al. Uso de Inteligência Artificial na Pecuária: Revisão de literatura. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 12, n. 4, e6612440777, 2023.

SILVA, B. C. P. da. **Manejo da irrigação via inteligência artificial na cultura do pimentão vermelho (Capsicum annuum L.)**. 2022. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022.

TANAKA, S. K. S. et al. Aplicação da inteligência artificial no agronegócio utilizando Deep Learning para identificação de doenças em culturas. **Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa**, Londrina, v. 40, n. especial, p. 466-485, 2024.

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MODELOS TRANSFORMER COM E SEM DECOMPOSIÇÃO POR VMD NA PREVISÃO DE IRRADIAÇÃO SOLAR

Anna Klara C. S. Silva[1], Davi de Oliveira Silva[1], Frede de Oliveira Carvalho[1], Nivea M. S da Silva[1], Ricardo Santos de Lima[1], Ygor Farias de Oliveira[1], Mateus Vilela de Carvalho[1], Henderson Wanderley[2]

1 Universidade Federal de Alagoas (UFAL), e-mail: davi.silva@ctec.ufal.br

2 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), e-mail: henderson@ufrrj.com.br

Palavras-chave: *Irradiação; Transformer; Variational Mode Decomposition.*

O uso de energias renováveis, especialmente a energia fotovoltaica, tem crescido de forma significativa nas últimas décadas, impulsionado pela necessidade de redução de impactos ambientais e diversificação da matriz energética (ABDEL-NASSER; MAHMOUD, 2017). No entanto, a geração fotovoltaica apresenta elevada variabilidade, uma vez que depende diretamente das condições meteorológicas. Nesse contexto, a previsão precisa da irradiação solar torna-se fundamental para o planejamento e a tomada de decisão em sistemas energéticos.

A irradiação solar possui características complexas, sendo simultaneamente randômica, periódica e influenciada por tendências climáticas. Essa natureza estocástica e temporal tem motivado o uso de técnicas avançadas de modelagem, especialmente baseadas em *Deep Learning* (DL) (Benidis et al., 2022). Entre essas abordagens, os modelos baseados em arquitetura Transformer vêm se destacando por sua capacidade de capturar dependências de longo alcance em séries temporais. Diferentemente de modelos recorrentes, o Transformer utiliza mecanismos de autoatenção (*self-attention*), que permitem ponderar dinamicamente a importância de diferentes instantes da série ao realizar uma previsão. Dessa forma, o modelo consegue identificar padrões relevantes independentemente da distância temporal, além de possibilitar processamento paralelo, o que favorece maior eficiência computacional e melhor desempenho em dados complexos e não lineares.

Paralelamente, estratégias híbridas que incorporam técnicas de decomposição de sinais têm sido amplamente investigadas com o objetivo de melhorar o desempenho preditivo. A técnica *Variational Mode Decomposition* (VMD) tem se destacado por permitir a decomposição do sinal original em modos intrínsecos (IMFs) com frequências centrais bem definidas, garantindo a reconstrução do sinal original (DRAGOMIRETSKIY; ZOSSO, 2014). Essa abordagem possibilita a separação de diferentes componentes do sinal, facilitando o aprendizado por modelos de DL e contribuindo para o aumento da acurácia das previsões (WANG; YAN; MA, 2024; BOUCETTA et al., 2024).

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto da decomposição por VMD no desempenho de modelos baseados em Transformer para a previsão de irradiação solar. Foram utilizados dados de médias diárias de irradiação solar coletadas entre outubro de 2022 e dezembro de 2024 no Centro de Ciências Agrárias (CECA) e cedidos pelo professor Henderson Wanderley, por meio de um piranômetro Eppley modelo 8-48. Inicialmente, foi realizado o pré-processamento dos dados, incluindo o tratamento de valores faltantes. Em seguida, os dados foram divididos em conjuntos de treinamento (90%) e teste (10%).

Na abordagem proposta, dois modelos foram avaliados: (i) um Transformer aplicado diretamente à série temporal original e (ii) um modelo híbrido VMD-Transformer, no qual a série foi previamente decomposta em IMFs por meio da VMD, sendo esses componentes utilizados como entradas do modelo. Os hiperparâmetros, tais como taxa de tolerância, penalização, entre outros usados para ambas as técnicas, foram ajustados empiricamente. O desempenho dos modelos foi avaliado por meio das métricas: coeficientes de determinação (R^2), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e erro absoluto médio (MAE).

Os resultados obtidos indicaram que o modelo Transformer aplicado diretamente à série temporal, como visto na Figura 01, apresentou melhor desempenho em relação ao modelo híbrido VMD-Transformer (Figura 02). O Transformer puro alcançou coeficiente de determinação (R^2) de 0,8317 e RMSE de 1,4811, enquanto o modelo VMD-Transformer obteve R^2 de 0,7913 e RMSE de 1,6493.

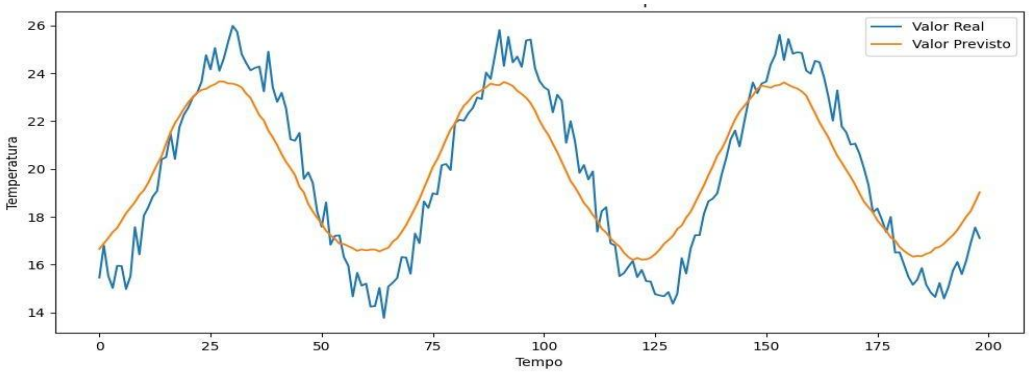


Figura 01: Valor Real vs Previsto Transformer
Fonte: Autores, 2026.

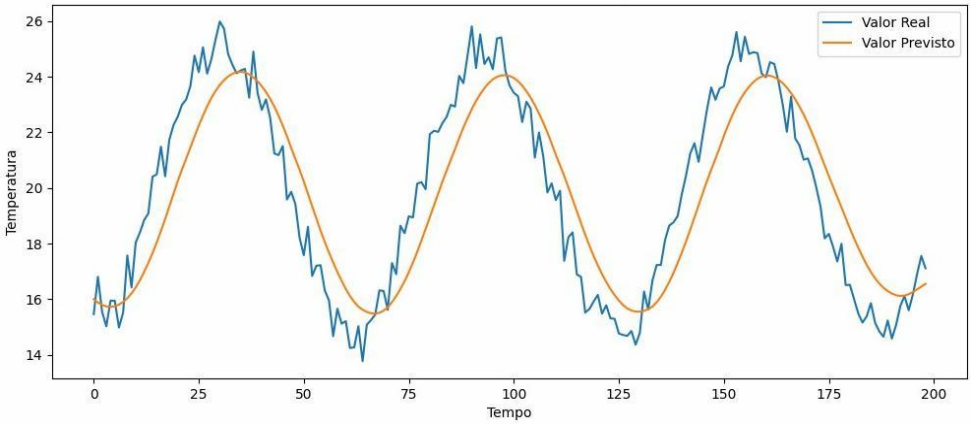


Figura 02: Modelo híbrido VMD + Transformer.
Fonte: Autores, 2026.

Esses resultados evidenciam que, para o conjunto de dados analisado e hiperparâmetros obtidos empiricamente, a decomposição prévia do sinal não contribuiu para a melhoria da capacidade preditiva do modelo. A decomposição do sinal permitiria reduzir a complexidade da série temporal, possibilitando ao modelo capturar de forma mais eficiente padrões de diferentes escalas. No entanto, o modelo somente com o Transformer apresentou maior capacidade de generalização e melhor precisão preditiva quando comparado ao modelo híbrido com VMD + Transformer aplicado diretamente aos dados originais mesmo sendo treinados e testados em seguida.

Esse comportamento pode estar associado à capacidade intrínseca do modelo Transformer de capturar padrões complexos e dependências de longo prazo diretamente da série original, reduzindo a necessidade de etapas adicionais de pré-processamento. Além disso, a decomposição por VMD pode ter introduzido perda de informação ou fragmentação excessiva do sinal, dificultando o aprendizado global do modelo, sendo necessário mais testes e treinamentos da rede híbrida para confirmar essa hipótese. Soma-se a isso o fato de que o volume de dados disponível favorece a arquitetura de atenção, que demanda séries extensas para mapear padrões de forma autônoma. Com uma base de dados robusta, o modelo pode se tornar capaz de extrair as características essenciais do sinal diretamente, tornando a etapa de decomposição não apenas desnecessária, mas potencialmente redundante.

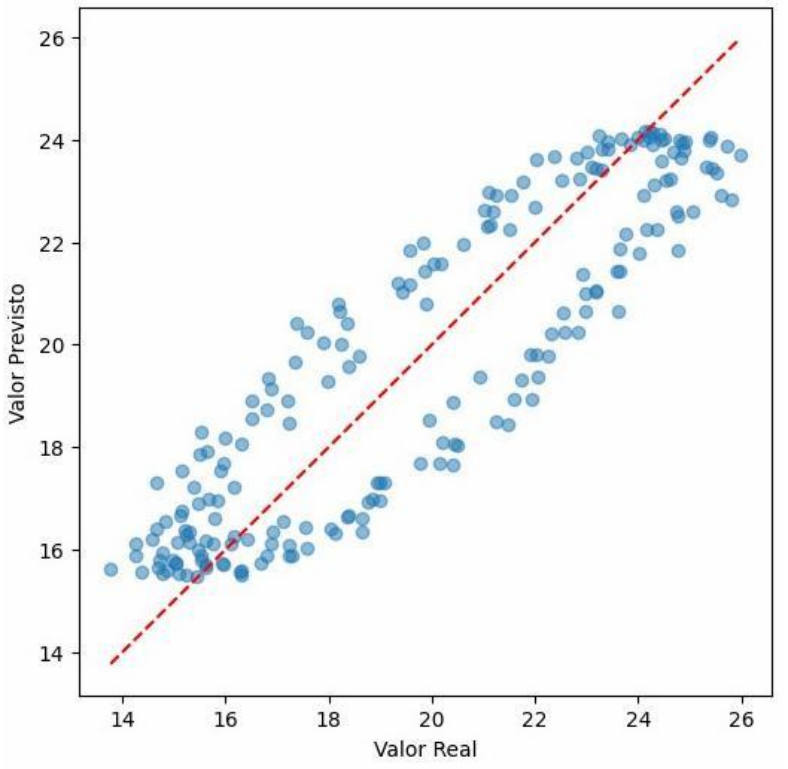


Figura 03: Gráfico de paridade do modelo híbrido VMD + Transformer.
Fonte: Autores, 2026.

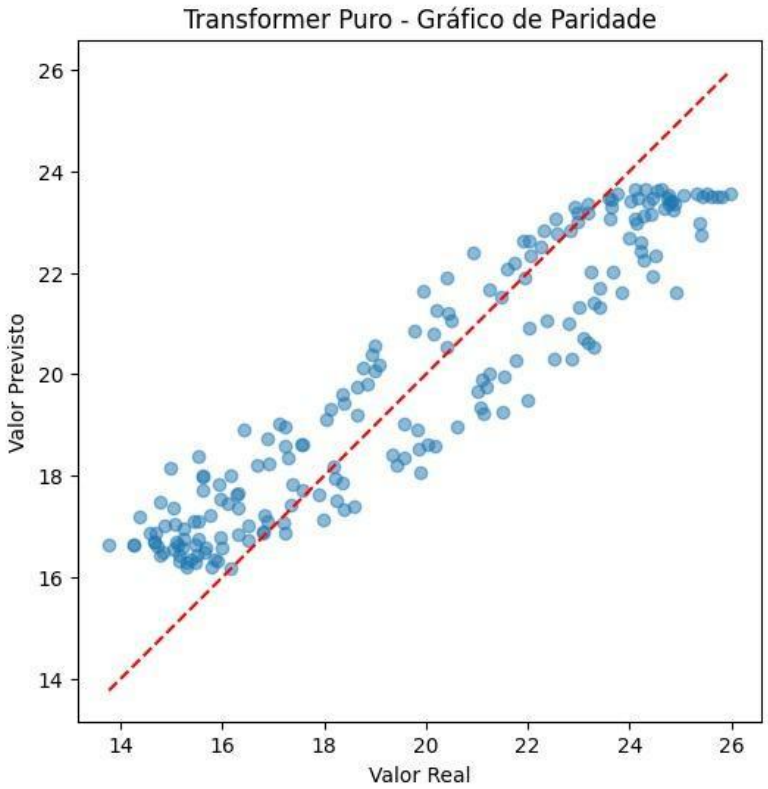


Figura 04: Gráfico de paridade do Transformer.
Fonte: Autores, 2026.

Dessa forma, conclui-se que, embora a combinação entre VMD e Transformer seja amplamente reportada na literatura como uma estratégia eficaz, sua aplicação não resultou em ganhos de desempenho neste estudo específico. O modelo Transformer "puro" demonstrou maior capacidade de generalização e melhor desempenho preditivo, indicando que, para o conjunto de dados analisado, a modelagem direta da série temporal foi mais adequada. De modo geral, os valores de R^2 superiores a 0,80 e os baixos valores de RMSE indicam bom desempenho preditivo para ambos os modelos, sendo adequados para aplicações em previsão de irradiação solar. Esses resultados reforçam a importância de avaliar criticamente a aplicação de técnicas híbridas, considerando as características específicas dos dados e do problema em estudo.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Universidade Federal de Alagoas (UFAL), ao Laboratório de Sistemas Inteligentes (LABSIA) e Centro de Ciências Agrárias (CECA) e cedidos pelo professor Henderson Wanderley.

Referências Bibliográficas

Bandara, K., Bergmeir, C., Smyl, S.: Forecasting across time series databases using recurrent neural networks on groups of similar series: a clustering approach. Expert Syst. Appl. 140, 112896 (2020)

Benidis, K., Rangapuram, S.S., Flunkert, V., et al.: Deep learning for time series forecasting: tutorial and literature survey. ACM Comput. Surv.Comput. Surv. 55(6), 1–36 (2022)

BOUCETTA, L. N. et al. Enhanced Forecasting Accuracy of a Grid-Connected Photovoltaic Power Plant: A Novel Approach Using Hybrid Variational Mode Decomposition and a CNN-LSTM Model. Energies, v. 17, n. 7, 1 abr. 2024.

DRAGOMIRETSKIY, K.; ZOSSO, D. Variational mode decomposition. IEEE Transactions on Signal Processing, v. 62, n. 3, p. 531–544, 1 fev. 2014.

WANG, J.; YAN, K.; MA, X. VMD-AC-LSTM: An Accurate Prediction Method for Solar Irradiance. (H. Jin et al., Eds.)Green, Pervasive, and Cloud Computing. Anais...Singapore: Springer, 2024.

PREVISÃO DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS ASSOCIADAS À PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO AS REDES NEURAIS RECORRENTES LSTM E GRU

Anna Klara C. S. Silva[1], Davi de Oliveira Silva[1], Eduardo Machado Paulino[1], Henderson Wanderley[2], Frede de Oliveira Carvalho, [1], Nivea M. S. da Silva[1], Ricardo Santos de Lima[1], Ygor F. de Oliveira[1]

1 Universidade Federal de Alagoas (UFAL), e-mail:eduardo.paulino@ctec.ufal.br

2 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), e-mail: henderson@ufrrj.com.br

Palavras-chave: Umidade relativa; LSTM; GRU.

A precipitação pluviométrica é um dos elementos meteorológicos mais importantes para a conservação da biodiversidade e para o suporte a atividades humanas vitais, como a agricultura e o abastecimento urbano; contudo, sua distribuição espacial e temporal tem sofrido alterações significativas devido às mudanças climáticas, que reduzem os dias de ocorrência de chuva e intensificam a frequência de eventos extremos (Arévalo et al., 2023; Wanderley e Bunhak, 2016; Regueira e Wanderley, 2022). Nesse sentido, o IPCC (2021) reforça o consenso sobre o aumento desses fenômenos, manifestados tanto pela escassez quanto pelo excesso hídrico, o que eleva a magnitude de secas, inundações e movimentos de massa em escala global (Moraes et al., 2023). Visto que setores estratégicos dependem intrinsecamente das condições meteorológicas, a instabilidade na disponibilidade hídrica acarreta impactos profundos, cujas dimensões refletem-se em perdas humanas e econômicas cada vez mais acentuadas.

De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (2021), estima-se que desastres relacionados ao tempo, ao clima ou à água tenham resultado, em média diária nos últimos cinquenta anos, em perdas financeiras de 202 milhões de dólares e 115 mortes. Além disso, relatório da Munich Re (2022) aponta que catástrofes naturais causaram mais de 280 bilhões de dólares em danos globalmente. Nesse contexto, as mudanças climáticas são apontadas como a principal força motriz por trás do aumento da intensidade e frequência desses eventos, com projeções indicando crescimento contínuo tanto na escala de destruição quanto no número de indivíduos afetados (Banholzer et al., 2014).

Dentre os eventos extremos, as inundações destacam-se como o desastre natural mais frequente, sendo responsáveis por extensos danos materiais e elevado número de vítimas. Em 2020, representaram mais de 60% dos desastres naturais registrados, contribuindo para 41% das mortes associadas a esses eventos. Estudos indicam que fatores como elevação do nível do mar, aumento de chuvas intensas e maior severidade de eventos climáticos extremos contribuem para essa tendência . Nesse cenário, a previsão precisa de variáveis atmosféricas torna-se fundamental para a mitigação de riscos, contribuindo diretamente para a proteção de vidas e patrimônios (Alabbad e Demir, 2022).

A complexidade inerente aos processos atmosféricos, caracterizados por comportamento não linear e altamente dependente do tempo, impõe desafios significativos à modelagem tradicional. Nesse contexto, técnicas baseadas em *Deep Learning* têm se destacado por sua capacidade de capturar padrões complexos em séries temporais. Entre essas abordagens, as redes neurais recorrentes (RNNs), especialmente as arquiteturas *Long Short-Term Memory* (LSTM) e *Gated Recurrent Unit* (GRU), apresentam elevado potencial para aplicações em previsão meteorológica.

A arquitetura LSTM é composta por células de memória que utilizam mecanismos de controle conhecidos como portas de entrada, esquecimento e saída, permitindo o armazenamento seletivo de informações relevantes ao longo do tempo e a modelagem de dependências temporais de longo alcance, sendo sua estrutura caracterizada por múltiplas camadas recorrentes e conexões internas responsáveis pelo fluxo de informação ao longo da sequência temporal.

Por outro lado, a arquitetura GRU apresenta uma estrutura simplificada em relação à LSTM, combinando as funções das portas de entrada e esquecimento em um único mecanismo de atualização, o que reduz a complexidade do modelo e o custo computacional, mantendo eficiência na modelagem temporal, sendo sua estrutura composta por unidades recorrentes mais compactas. As estruturas das duas redes podem ser observadas na figura 1, a seguir.

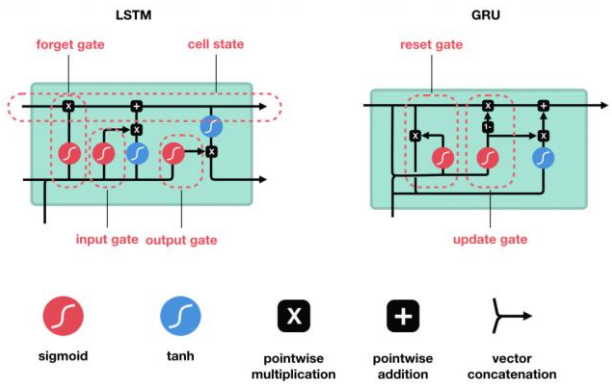


Figura 01: Arquitetura LSTM e GRU
Fonte: Cho, et al. (2014)

Neste trabalho, propõe-se a aplicação e comparação dos modelos LSTM e GRU na previsão de variáveis meteorológicas intrinsecamente associadas à dinâmica da precipitação (umidade relativa e temperatura), utilizando dados coletados no Centro de Ciências Agrárias (CECA). A base de dados foi submetida a um processo de pré-tratamento, incluindo remoção de valores ausentes, organização temporal e identificação de *outliers* por meio do filtro de Hampel, visando aumentar a qualidade das informações utilizadas na modelagem. Adicionalmente, foi realizada análise exploratória dos dados, incluindo avaliação de correlação entre variáveis meteorológicas, utilizando o coeficiente de Spearman, que revelou uma correlação negativa de -0,727 entre temperatura e umidade relativa.

Os dados foram estruturados como séries temporais indexadas por data e divididos em conjuntos de treinamento (80%) e teste (20%). Posteriormente, aplicou-se a normalização dos dados e a técnica de defasagem temporal (lag), permitindo que os modelos utilizassem informações passadas para prever valores futuros. Os modelos foram implementados com o auxílio da biblioteca Keras, com otimização de hiperparâmetros realizada por meio do Keras Tuner, e utilização de *early stopping* para evitar sobreajuste.

O desempenho dos modelos foi avaliado por meio das métricas: coeficiente de determinação (R^2), erro absoluto médio (MAE) e erro quadrático médio (MSE). Os resultados indicaram elevado desempenho preditivo para ambas as arquiteturas. O modelo LSTM apresentou R^2 de 0,9335, MAE de 3,1310 e MSRE de 4,5438, enquanto o modelo GRU apresentou R^2 de 0,9303, MAE de 2,9606 e MSRE de 4,501, evidenciando que ambos os modelos foram capazes de capturar de forma eficaz a dinâmica temporal da variável analisada.

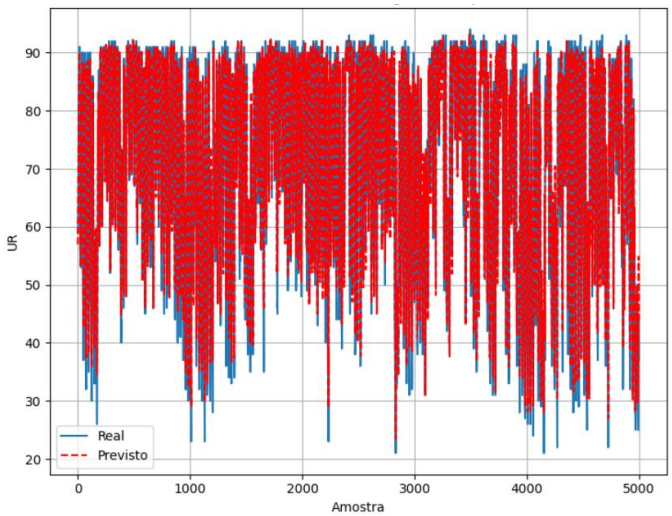


Figura 02: Valores Reais vs Previstos LSTM
Fonte: Autores (2026)

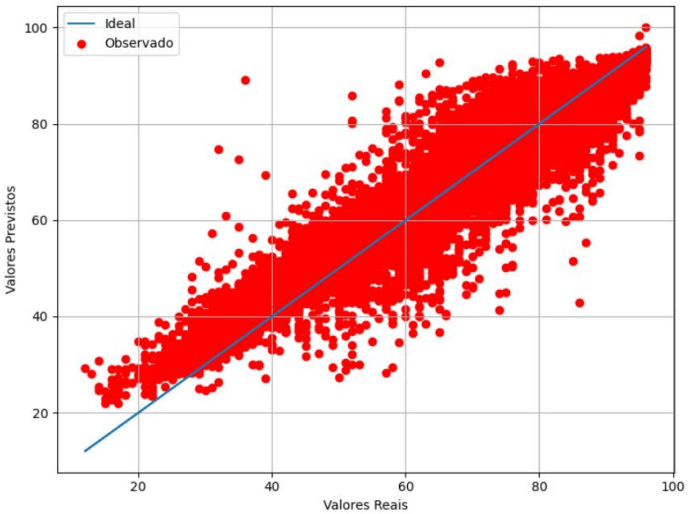


Figura 03: Gráfico de Paridade LSTM
Fonte: Autores (2026)

A rede LSTM apresentou ligeira superioridade em termos de coeficiente de determinação e erro quadrático médio, indicando maior capacidade de explicação da variabilidade dos dados e melhor ajuste global. Por outro lado, a GRU apresentou menor erro absoluto médio, sugerindo maior precisão em previsões pontuais, além de menor custo computacional.

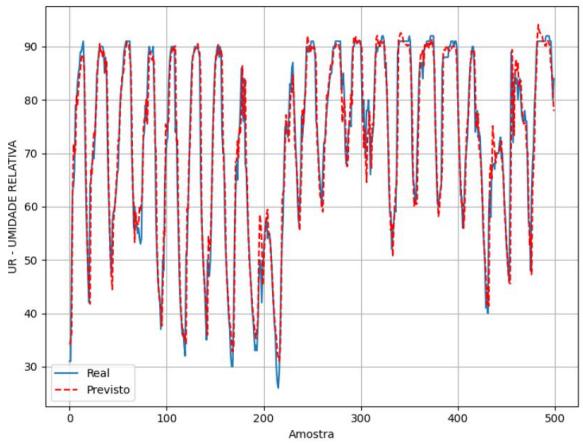


Figura 04: Valores Reais vs Previstos GRU
Fonte: Autores (2026)

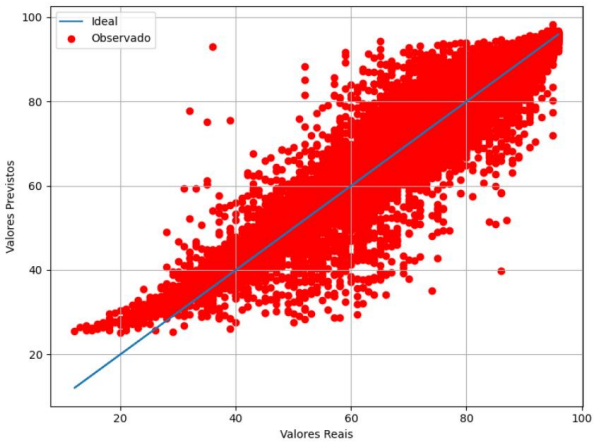


Figura 5: Gráfico de Paridade GRU
Fonte: Autores (2026)

De forma geral, os resultados evidenciam que ambas as arquiteturas são adequadas para a previsão da temperatura e umidade relativa, apresentando desempenho elevado ($R^2 > 0,93$), o que indica forte capacidade preditiva. A escolha entre os modelos deve considerar o *trade-off* entre desempenho e eficiência computacional.

Dessa forma, conclui-se que o uso de redes neurais recorrentes constitui uma abordagem robusta e eficaz para a modelagem de séries temporais ambientais, contribuindo para previsões mais precisas e confiáveis. Esses resultados reforçam o potencial das técnicas de *Deep Learning* no contexto da engenharia ambiental, especialmente no suporte à tomada de decisão frente a eventos climáticos extremos.

Além disso, a maior precisão das previsões gera benefícios econômicos ao otimizar o planejamento e reduzir perdas em setores dependentes do clima. Do ponto de vista ambiental, contribui para a mitigação de impactos e o uso mais eficiente dos recursos naturais, tornando essas técnicas ferramentas estratégicas para sustentabilidade e gestão inteligente.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Universidade Federal de Alagoas (UFAL), ao Laboratório de Sistemas Inteligentes (LABSIA) e Centro de Ciências Agrárias (CECA) e cedidos pelo professor Henderson Wanderley.

Referências Bibliográficas

ARÉVALO, C. O. et al. Exploratory analysis of trace elements in soils and plants affected by a gossan in the Semiarid. Revista Brasileira de Ciência do Solo, [s. l.], 2023.

BANHOLZER, S. et al. Climate change and natural disasters. Journal of Climate, [s. l.], 2014.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

MORAES, F. et al. Evaluation of satellite-based precipitation estimates in the Midwest Region of Brazil. Journal of Hydrology, [s. l.], 2023.

MUNICH RE. Natural catastrophe report. Munich: Munich Re, 2022.

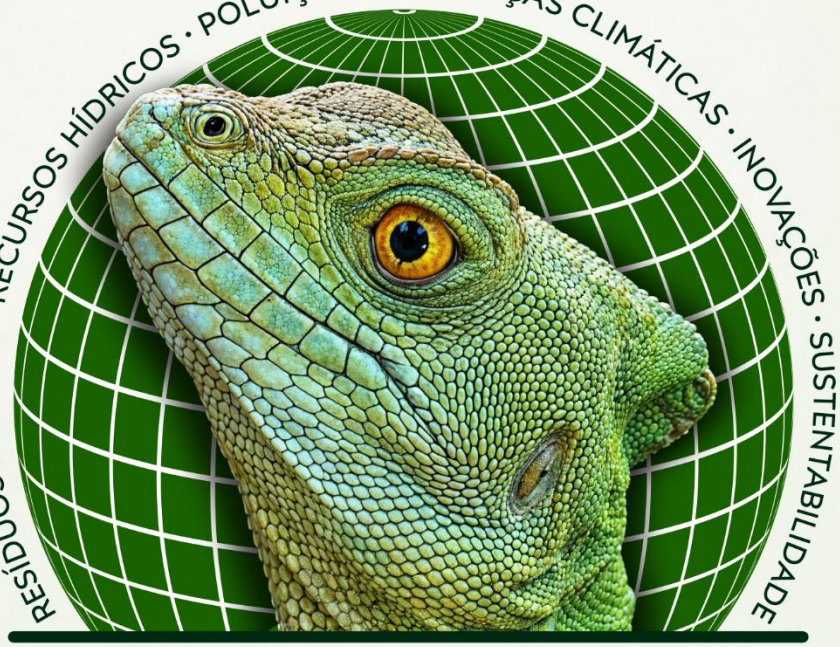
ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970–2019). Genebra: WMO, 2021.

REGUEIRA, A. D. O.; WANDERLEY, H. S. Natural hazards and precipitation patterns. Natural Hazards, [s. l.], v. 114, n. 3, p. 3833-3847, 2022.

WANDERLEY, H. S.; BUNHAK, A. C. S. Mudança no número de dias com chuva no município de Visconde de Mauá, Rio de Janeiro. Journal of Biotechnology and Biodiversity, [s. l.], v. 8, p. 297-303, 2016.

ÁREA TEMÁTICA 16

JUSTIÇA CLIMÁTICA E DIREITOS HUMANOS AMBIENTAIS



5º CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

DA PERIFERIA AO GLOBAL: EDUCAÇÃO AMBIENTAL COMO ESTRATÉGIA DE JUSTIÇA SOCIOAMBIENTAL

1 Rerisson Washington Eustáquio da Silva; 2 Eliano Vieira Pessoa;
3 Ana Lucia Feitoza Freire Pereira; 4 Maria Lígia Farias Costa

1 Instituto Federal do Ceará - Campus Sobral, e-mail: washingtonconta95@gmail.com; 2 Instituto Federal do Ceará - Campus Sobral, e-mail: eliano@ifce.edu.br; 3 Instituto Federal do Ceará - Campus Sobral, e-mail: anafeitoza@ifce.edu.br; 4 Secretaria de Meio Ambiente e Proteção Animal de Ipaporanga - CE, e-mail: marialigiafcca@gmail.com

Palavras-chave: Crise ambiental; Desigualdade; Políticas públicas.

Introdução

A crise climática global e as desigualdades sociais são desafios interligados que afetam de maneira mais acentuada as populações periféricas, especialmente nas regiões urbanas do Sul Global. As periferias urbanas brasileiras, caracterizadas por condições de desigualdade social, enfrentam impactos desproporcionais da degradação ambiental intensificadas pelas mudanças climáticas. Esses fenômenos, somados à precariedade de serviços essenciais como saneamento e acesso à água potável, agravam ainda mais a situação dessas comunidades, ampliando as desigualdades preexistentes (IPCC, 2023).

No Brasil, as periferias urbanas, embora contribuam minimamente para as emissões de gases de efeito estufa, são as mais impactadas pelos efeitos das mudanças climáticas, refletindo uma injustiça socioambiental profunda. Nesse contexto, o conceito de justiça ambiental, que busca cessar a desproporção de quem produz a degradação e quem é afetado por ela, emerge como uma resposta necessária para enfrentar tanto as desigualdades sociais quanto os desafios ecológicos, demandando políticas públicas integradas e inclusivas (Leal, 2021)

A educação ambiental desempenha um papel estratégico na promoção da justiça ambiental, ao conscientizar comunidades vulneráveis e fomentar uma cidadania ativa e crítica. Através de uma abordagem emancipatória, busca empoderar indivíduos e coletivos, promovendo uma reflexão crítica sobre a relação entre desenvolvimento, meio ambiente e justiça. Esse enfoque é essencial para preparar as comunidades frente aos desafios impostos pela crise climática, contribuindo localmente na execução dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Ribeiro, 2016).

Nesse contexto, o projeto Juventude no Parque da Prefeitura Municipal de Fortaleza-Ceará, implantou, em áreas de vulnerabilidade social, ações de educação ambiental, com objetivo de levar para essas comunidades conhecimentos necessários à sensibilização e conscientização ambiental dessa população.

Material e Métodos

A pesquisa adotou abordagem qualitativa, utilizando estudo de caso e observação participante como principais técnicas de investigação. A imersão do pesquisador nas atividades permitiu compreender práticas, interações, desafios e percepções da comunidade, em consonância com as orientações metodológicas de Minayo e Costa (2018). Foram analisadas ações desenvolvidas entre dezembro de 2023 e novembro de 2024 nos microparques situados em bairros de baixa renda de Fortaleza-CE (Figura 01). Também foram examinados relatórios mensais elaborados pelos monitores, com registros de frequência, descrição das atividades, observações territoriais e reflexões sobre a participação comunitária.

O estudo de caso teve como foco o Projeto Juventude no Parque, iniciativa articulada entre a Secretaria de Urbanismo e Meio Ambiente (SEUMA), a Secretaria de Juventude (SEJUV) e o Instituto de Arte, Cultura e Esporte (IC), implantada em microparques urbanos de Fortaleza. A proposta priorizou jovens moradores das comunidades do entorno, buscando fortalecer vínculos territoriais e potencializar o protagonismo juvenil. No ano de 2024, entre 02 de março e 01 de dezembro, foram selecionados 120 jovens de 15 a 25 anos, ou até 35 anos no caso de pessoas com deficiência, para atuarem de terça a sexta-feira em turnos matutino e vespertino. Cada participante recebeu uma bolsa mensal de R$ 450,00 (quatrocentos e cinquenta reais), e suas atividades foram orientadas por uma equipe técnica composta por gerente, supervisor e cinco analistas ambientais distribuídos entre os microparques.

Os microparques analisados constituem pequenas áreas verdes implantadas em territórios periféricos com o objetivo de transformar espaços subutilizados em ambientes destinados ao lazer, à convivência comunitária e à educação ambiental. Esses espaços funcionaram como campo de prática e formação socioambiental, integrando a atuação dos jovens monitores, da comunidade e da equipe técnica em processos contínuos de cuidado, ocupação e valorização dos territórios. Além disso, a gestão compartilhada, realizada por meio de Conselhos Gestores formados por moradores, contribuiu para o fortalecimento do pertencimento local e para a construção de estratégias comunitárias de preservação e manutenção desses espaços.

O processo de implementação envolveu a participação ativa da comunidade, organizada por meio de um Conselho Gestor, que atuou como responsável pela manutenção e gestão do parque. Esse conselho, composto por moradores locais, fortaleceu o sentimento de pertencimento da população ao espaço, promovendo um engajamento comunitário que vai além do uso recreativo, abrangendo também aspectos de cuidado e preservação ambiental.

As atividades desenvolvidas se alinharam diretamente com a Agenda 2030 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Esse alinhamento foi analisado a partir da relação entre as atividades do projeto, seus objetivos formativos e os eixos temáticos dos ODS, considerando os impactos gerados no território.

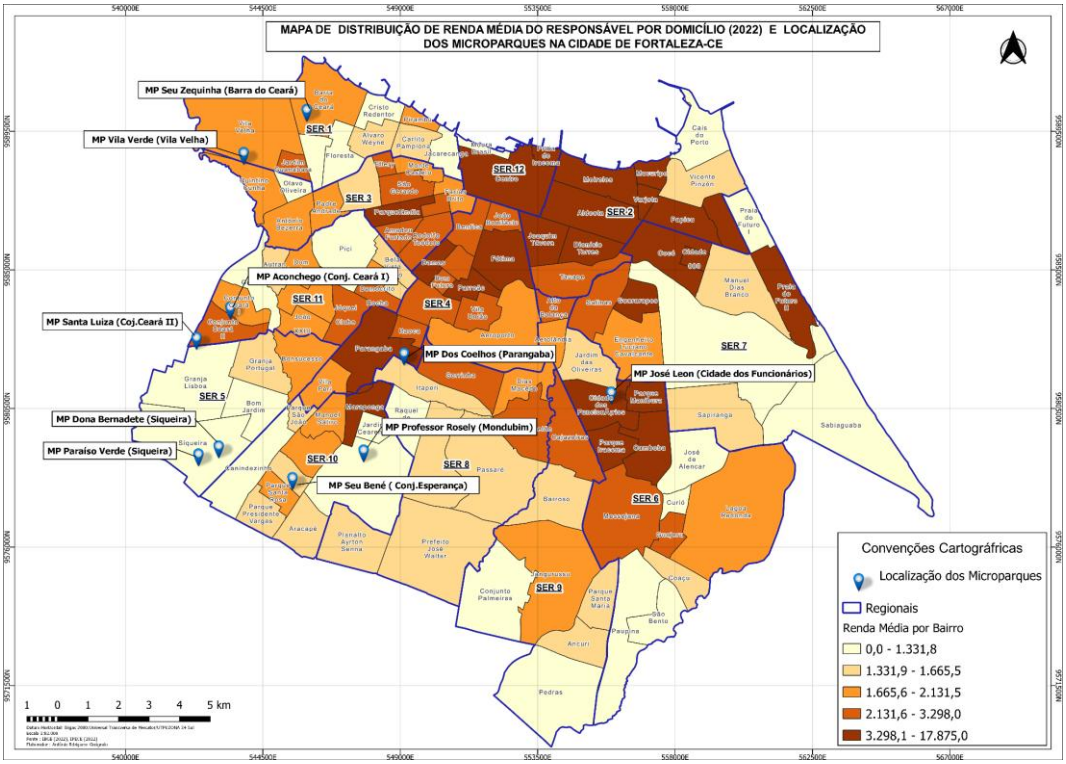


Figura 01: Mapa de distribuição de renda média domiciliar e localização dos microparques na cidade de Fortaleza-CE. Fonte: IPECE (2022)

Resultados e Discussão

Entre dezembro de 2023 e novembro de 2024, o Projeto Juventude no Parque realizou 4.578 atividades, envolvendo 41.058 participantes, o que demonstra a amplitude e relevância dessa política pública como instrumento de educação ambiental crítica nos territórios periféricos de Fortaleza. O conjunto de ações desenvolvidas permitiu fortalecer o vínculo entre juventude, comunidade e meio ambiente, ampliando a compreensão sobre temas centrais como mudanças climáticas, racismo ambiental, impermeabilização do solo, manejo de resíduos, proteção de áreas verdes e vulnerabilidade socioambiental. Na prática cotidiana, os microparques tornaram-se espaços de encontro, diálogo e construção de pertencimento, atuando simultaneamente como ambientes educativos e áreas de lazer, convivência e mobilização social.

As atividades foram estruturadas de maneira a promover experiências significativas com o território. Entre as práticas desenvolvidas, destacaram-se ações de ecopedagogia, cinema comunitário, oficinas, produção de mudas, mutirões de limpeza, ateliês de pintura com biotintas e geotintas, rodas de conversa, jogos socioeducativos e circuitos ambientais, além de momentos de organização comunitária junto aos Conselhos Gestores. Embora essas atividades possuíssem naturezas distintas, todas foram orientadas pela mesma intencionalidade formativa: despertar uma consciência ambiental crítica por meio da vivência, da problematização e do diálogo. A escolha de metodologias participativas favoreceu o engajamento de crianças, jovens e adultos, permitindo que o conhecimento fosse construído de modo didático e integrado ao cotidiano.

Nos primeiros meses, a participação comunitária era marcada por receio, distanciamento e pouca adesão às propostas. Entretanto, à medida que os monitores se integraram aos territórios e fortaleceram vínculos de confiança com os moradores, observou-se aumento expressivo da presença da comunidade nos microparques. Esse processo evidencia que práticas permanentes e territorializadas possuem maior potencial transformador do que iniciativas pontuais, pois são capazes de criar laços afetivos, promover pertencimento e consolidar a ocupação socioambiental dos espaços públicos. Ao longo do período analisado, os microparques passaram a ser reconhecidos pela população como lugares de cuidado, convivência e aprendizado, contribuindo diretamente para a revitalização de áreas antes subutilizadas ou degradadas.

A formação dos jovens monitores constituiu um dos resultados mais importantes do projeto. Esses jovens desenvolveram competências técnicas relacionadas ao manejo ambiental, produção de mudas, condução de atividades educativas e compreensão dos impactos das mudanças climáticas. Simultaneamente, ampliaram habilidades socioemocionais e políticas, como comunicação, liderança, mediação de conflitos, empatia e análise crítica do território. A atuação como multiplicadores reforçou o papel da juventude como agente transformador, fortalecendo sua relação com o território e ampliando sua capacidade de influenciar processos de decisão dentro da comunidade.

Na Tabela 01, pode-se observar que as contribuições do projeto alinham-se diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente os ODS 4, 10, 11 e 13, que tratam respectivamente do acesso à educação de qualidade, redução das desigualdades, construção de cidades sustentáveis e combate às mudanças climáticas.

ATIVIDADES	ODS RELACIONADOS	CONTRIBUIÇÕES
Ecopedagogia		Promove processos educativos críticos, consciência ecológica e cidadã.
Cineminha no parque		Amplia o acesso à cultura e à informação, promovendo reflexões socioambientais por meio da linguagem audiovisual.
Comunidade de talentos		Valoriza talentos locais e diversidade cultural, fortalecendo vínculos sociais e a ocupação positiva dos espaços públicos.
Contação de histórias		Estimula a aprendizagem lúdica e o desenvolvimento socioambiental, especialmente na primeira infância.
Mutirão		Incentiva o cuidado coletivo e o pertencimento na manutenção dos espaços públicos.
Distribuição de mudas		Estimula o plantio de espécies nativas e a conservação da biodiversidade.
Piquenique		Favorece o convívio social e o uso sustentável dos microparques.
Gincana ambiental e Circuito eco ação		Promove aprendizagem interativa e ação ecológica comunitária.
Ateliê de pintura		Valoriza a arte como instrumento educativo e o uso sustentável de recursos naturais.
Oficinas e formações		Estimula a aprendizagem e a reflexão crítica sobre temas socioambientais.
Sensibilização		Promove conscientização sobre as mudanças climáticas e a mobilização comunitária.
Reunião conselho gestor		Consolida a gestão participativa e o protagonismo local nas decisões sobre o território.

Tabela 01: Relação entre as metodologias adotadas e os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). Fonte: Autor (2025)

A transversalidade desses objetivos ficou evidente nas práticas desenvolvidas. As atividades formativas promoveram aprendizagens acessíveis e contextualizadas; a atuação nos territórios periféricos contribuiu para reduzir desigualdades socioambientais; a revitalização dos microparques ajudou a fortalecer a resiliência dos bairros; e os debates sobre mudanças climáticas estimularam uma compreensão mais ampla dos desafios ambientais globais e suas particularidades locais.

Apesar dos avanços, alguns desafios marcaram a execução das atividades. Em determinados territórios, a insegurança impactou a continuidade das ações. Além disso, a ausência de pontos de apoio adequados, como depósitos para materiais ou

estruturas de proteção contra chuva e sol, exigiu adaptações constantes e dependência de equipamentos públicos próximos, como Escolas, Centros de Educação Infantil (CEI) e Centros de Referência da Assistência Social (CRAS). Conflitos locais e tensões comunitárias também influenciaram o andamento das ações, reforçando a importância de políticas públicas permanentes, infraestrutura adequada e apoio institucional para garantir segurança e continuidade ao trabalho desenvolvido.

A articulação entre juventude, comunidade e meio ambiente permitiu que os microparques se consolidassem como espaços potenciais de transformação social. O manejo de mudas, as gincanas ambientais, os circuitos ecoeducativos e as vivências artísticas aproximaram os participantes das práticas de cuidado com o território, gerando reflexões sobre justiça socioambiental e estimulando mudanças nas relações entre população e natureza. O conjunto desses elementos demonstrou que, mesmo em contextos marcados por desigualdades profundas, é possível construir processos de educação ambiental emancipatória que possibilitam o protagonismo, ampliam a capacidade das comunidades de responder aos desafios da crise climática, e promovam a justiça socioambiental.

Considerações Finais

O Projeto Juventude no Parque evidencia que a educação ambiental crítica pode promover transformações significativas em comunidades periféricas ao articular juventude, território e justiça socioambiental. Essa abordagem fortalece o protagonismo comunitário e amplia a compreensão sobre os impactos ambientais presentes no cotidiano. Os resultados demonstram que iniciativas locais podem dialogar com agendas globais, como a Agenda 2030 da ONU, contribuindo para cidades mais justas, resilientes e sustentáveis. No entanto, sua continuidade depende de políticas públicas permanentes, infraestrutura adequada e condições de segurança nos territórios.

A experiência analisada aponta caminhos para replicação em outros municípios e confirma a educação ambiental como estratégia essencial no enfrentamento das desigualdades socioambientais e da crise climática. Mesmo diante de limitações estruturais, o projeto mostrou ser possível mobilizar coletivos e transformar a relação das pessoas com o meio ambiente. Ao inspirar outras iniciativas e integrar os ODS em suas ações, o Juventude no Parque reforça o potencial das práticas comunitárias para gerar mudanças estruturais e materializar a justiça ambiental no cotidiano das comunidades periféricas.

Agradecimentos

Agradeço ao Instituto Federal do Ceará, campus Sobral, por todo conhecimento e sensibilidade adquirida; ao Projeto Juventude no Parque pelo comprometimento em transformar realidades; aos jovens monitores por se permitirem ser atravessados pelo projeto; às comunidades participantes ensinamentos e participações; ao Prof. Me. Eliano Vieira Pessoa pela contribuição nesse trabalho e a todas as pessoas que contribuíram para a realização desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA (IPCC). **Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese** (tradução para o português). Brasília. Governo do Brasil / MCTI, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf>. Acesso em: 30 de Jul. 2025

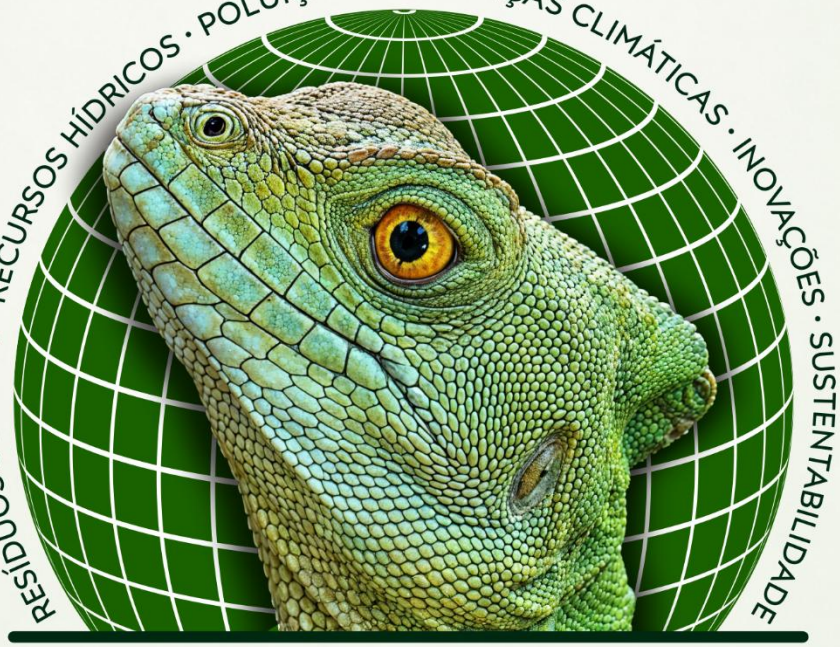
LEAL, F. G.; QUINTANILHA VERAS NETO, F.; CONSOLARO NABOZNY, G. **Ecologia política e conflitos ambientais: lutas por justiça ambiental.** Germinal: marxismo e educação em debate, *[S. l.]*, v. 13, n. 2, p. 535–549, 2021. DOI: 10.9771/gmed.v13i2.44945. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/revistagerminal/article/view/44945> Acesso em: 3 abr. 2025.

MINAYO, M. C. DE S.; COSTA, A. P. **Fundamentos Teóricos das Técnicas de Investigação Qualitativa**. Revista Lusófona de Educação, v. 40, n. 40, 27 Ago. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.24140/issn.1645-7250.rle40.01> Acesso em: 27 Ago. 2025.

RIBEIRO, A. D. S. **CONSCIENTIZAÇÃO E EMANCIPAÇÃO EM PAULO FREIRE**. Revista Sinergia, [S. l.], v. 19, n. 1, 2018. Disponível em: <https://ojs.ifsp.edu.br/sinergia/article/view/304> Acesso em: 4 fev. 2026.

ÁREA TEMÁTICA 17

LOGÍSTICA REVERSA E CADEIAS DE FORNECIMENTO RESPONSÁVEIS



5º CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

RESPONSABILIDADE ESTENDIDA DO PRODUTOR E LOGISTICA REVERSA NA INDÚSTRIA TÊXTIL: SUSTENTABILIDADE E GESTÃO DE RESÍDUOS

1Gabriela Tenório de Lacerda Melo Alves, 2Aline Chaves Alves
1FURB, e-mail: gtlmalves@furb.br; 2 FURB, e-mail: alinechaves@furb.br

Palavras-chave: Indústria textil; logística reversa; sustentabilidade.

Introdução

A indústria têxtil enfrenta desafios significativos relacionados à sustentabilidade ambiental e à gestão eficiente de resíduos em todo o seu ciclo de vida (Castro, 2020). Neste contexto, a Responsabilidade Estendida do Produtor (REP) surge como uma abordagem inovadora e essencial para promover práticas mais sustentáveis (Silva *et al.*, 2021). A REP é fundamentada em princípios legais e regulatórios, e representa uma mudança paradigmática na forma como as indústrias abordam seus produtos desde a fase de concepção até o descarte final (OCDE, 2016). No Brasil, a Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), está estabelecida a implementação da logística reversa e da gestão adequada de resíduos, promovendo a responsabilidade compartilhada entre fabricantes, importadores, distribuidores e consumidores. De acordo com a lei, a logística reversa pode ser definida como um conjunto de ações que pretende viabilizar a coleta e retomada dos resíduos sólidos a empresa, para reaproveitamento ou destinação ambientalmente correta, considerando um instrumento de desenvolvimento econômico e social (Brasil, 2010). Ao considerar o quadro legal, é importante compreender como as empresas têxteis têm respondido aos desafios ambientais, adotando estratégias e iniciativas que transcendem as fronteiras tradicionais da produção e do consumo, visando à diminuição dos impactos ambientais em todo o processo produtivo e demais setores. Assim, este resumo expandido busca aprofundar a compreensão sobre como a REP e a logística reversa se tornam uma ferramenta ativa na promoção da sustentabilidade e gestão de resíduos dentro da indústria têxtil.

Material e Métodos

A metodologia foi estruturada de forma a integrar análise normativa, revisão bibliográfica e interpretação qualitativa, permitindo avaliar a logística reversa e a REP no setor têxtil sob diferentes dimensões. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica com abordagem qualitativa e caráter exploratório, a partir de artigos científicos, relatórios técnicos e documentos institucionais. Foram priorizadas publicações recentes que abordaram logística reversa, REP, comportamento do consumidor e sustentabilidade na indústria têxtil, incluindo estudos como Haq *et al.* (2023), Pereira *et al.* (2011), Vesal, Siahtiri e O'cass (2021), Morais *et al.* (2022) e Peres *et al.* (2022). Em seguida, foi conduzida uma análise documental e normativa, com foco na legislação brasileira aplicável, especialmente a Lei nº 12.305/2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos), bem como normas técnicas, como a NBR 10.004/2004 (ABNT, 2009), e diretrizes internacionais, como a série ISO 14000 e a ISO 14024. Essa etapa permitiu identificar exigências legais, lacunas regulatórias e instrumentos relacionados à logística reversa no setor têxtil. Posteriormente, foi realizada uma análise qualitativa integrada, na qual as informações obtidas foram organizadas e discutidas a partir de quatro dimensões principais: ambiental, econômica, social e legal. Nessa etapa, foram avaliadas as potencialidades da logística reversa e da REP, incluindo a viabilidade de reaproveitamento de resíduos têxteis, a redução da extração de matérias-primas, os ganhos de imagem institucional e o alinhamento às exigências normativas. Por fim, foi desenvolvida uma síntese analítica, destacando oportunidades, limitações e implicações para o setor têxtil, com ênfase no papel da logística reversa como instrumento estratégico de sustentabilidade e na aplicação do princípio do poluidor-pagador.

Resultados e Discussão

Os resultados evidenciaram que a indústria têxtil tem avançado na incorporação de práticas relacionadas à reciclagem de resíduos sólidos, especialmente por meio do uso de matérias-primas recicladas e da adoção de estratégias alinhadas à economia circular (Pichinin, 2022; Mrozinski; Steffen; Meurer, 2017; CNI, 2018). No entanto, esses avanços ocorrem de forma desigual e ainda enfrentam limitações estruturais que comprometem a efetividade dessas iniciativas no contexto brasileiro. Foi observado que a gestão dos resíduos têxteis no Brasil apresenta fragilidades significativas, principalmente no que se refere à coleta seletiva e à triagem. A mistura de resíduos recicláveis com rejeitos orgânicos reduz o potencial de reaproveitamento e o valor agregado dos materiais, dificultando sua reinserção na cadeia produtiva. Como consequência, observa-se um cenário contraditório: embora o país tenha gerado aproximadamente 4 milhões de toneladas de resíduos têxteis em 2022, parte da indústria opta pela importação de resíduos previamente separados, considerados mais adequados ao processo de reciclagem (ABRELPE, 2022; Baruque Ramos *et al.*, 2017). Esse contexto evidencia ineficiências no sistema nacional de gestão de resíduos e limita o aproveitamento econômico e ambiental desses materiais. A análise também demonstrou que a logística reversa, embora reconhecida como um instrumento estratégico para o retorno de produtos ao longo da cadeia de abastecimento (Haq *et al.*, 2023), ainda possui aplicação limitada no setor têxtil. Apesar de estar prevista na Lei nº 12.305/2010 como mecanismo para viabilizar a coleta e restituição de resíduos ao setor empresarial, identificou-se uma lacuna regulatória, uma vez que os resíduos têxteis não estão incluídos entre os fluxos de obrigatoriedade estabelecidos no art. 33 da referida legislação. Essa ausência de obrigatoriedade contribui para a

baixa adoção sistematizada da logística reversa, restringindo seu potencial de contribuição para o fechamento de ciclos produtivos. Nesse sentido, a REP foi identificada como uma alternativa relevante para ampliar a reciclagem no setor têxtil. Os resultados indicaram que a adoção desse instrumento pode favorecer o reaproveitamento de resíduos como matéria-prima, reduzindo a extração de recursos naturais e os custos operacionais das empresas (Pereira *et al.*, 2011). Além disso, a REP está associada ao princípio do poluidor-pagador, promovendo maior responsabilização dos agentes econômicos pelos impactos ambientais gerados ao longo do ciclo de vida dos produtos (Peres *et al.*, 2022). Sob a perspectiva de mercado, os resultados apontaram que a adoção de práticas sustentáveis exerce influência positiva sobre o comportamento dos consumidores. Observou-se uma tendência de valorização de produtos reciclados ou associados à logística reversa, bem como maior reconhecimento de empresas que demonstram compromisso com a sustentabilidade (Vesal; Siahtiri; O'cass, 2021; Morais *et al.*, 2022). Esse fator representa um potencial diferencial competitivo para o setor, incentivando a adoção de práticas mais sustentáveis. Adicionalmente, verificou-se que certificações ambientais desempenham papel importante na consolidação dessas práticas. As normas da série ISO 14000 e os selos do tipo I, regulamentados pela ISO 14024, foram identificados como instrumentos relevantes para conferir credibilidade às ações ambientais, uma vez que são baseados em critérios de ciclo de vida e monitorados por entidades independentes (ABNT, 2002; IPEA, 2011). Esses mecanismos contribuem para aumentar a confiança dos consumidores e estimular a adoção de padrões mais sustentáveis na indústria.

Considerações Finais

O cenário atual da indústria têxtil no Brasil ainda apresenta desafios relevantes relacionados aos impactos ambientais da geração de resíduos. O encargo pós-consumo amplia a responsabilidade do setor produtivo, exigindo a reintegração dos materiais descartados à cadeia produtiva, de modo a prolongar seu ciclo de vida útil. Esse processo demanda investimentos em tecnologias e a reestruturação dos sistemas produtivos, com foco em maior eficiência e sustentabilidade. A legislação atua como um importante indutor dessas mudanças ao incentivar a adoção da logística reversa, promovendo o retorno dos resíduos ao setor empresarial e contribuindo para ganhos econômicos, sociais e ambientais. Paralelamente, observa-se que a crescente preocupação dos consumidores com questões ambientais tem influenciado as estratégias das empresas, reforçando a necessidade de práticas mais responsáveis. Entretanto, persistem entraves que limitam a consolidação dessas iniciativas, como falhas na gestão e valorização dos resíduos, lacunas regulatórias quanto à obrigatoriedade da logística reversa para o setor têxtil e a baixa articulação entre os agentes envolvidos. Esses fatores dificultam o avanço de um modelo efetivamente circular, indicando a necessidade de aprimoramento das estratégias e instrumentos aplicados ao setor.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Universidade Regional de Blumenau pelo apoio institucional, especialmente no que se refere à infraestrutura e ao corpo docente disponibilizados. Agradecem, ainda, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas de mestrado, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública. **Panorama dos resíduos sólidos no brasil 2022.** Disponível em: <Panorama 2022 – Abrelpe>. Acesso em: 22 dez. 2023.

ANICET, A; BESSA, P; BROEGA, A. C. **Colagens têxteis: em busca de um design sustentável**. Educação Gráfica, v. 21, n.03, 403-418**.** 2017.

BARUQUE-RAMOS, Julia *et al.* Social and economic importance of textile reuse and recycling in Brazil. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2017.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Dispõe sobre a instituição de Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).** Brasília, DF: Casa Civil, 2010.

CASTRO, J. (2020). **La Industria Textil y de la Moda, Responsabilidad Social y la Agenda 2030.** DOI: https://doi.org/10.18682/cdc.vi100.3986.

CNI - Confederação Nacional da Indústria. **Economia Circular: oportunidades e desafios para a indústria brasileira.** Brasília: CNI, 2018.

HAQ, Mahin *et al.* **The impact of reverse logistics process coordination on third party relationship quality: A moderated mediation model for multichannel retailers in the fashion industry.** Journal of Retailing and Consumer Services, v. 73, p. 103362, 2023.

MORAIS, Marcos *et al.* **Logística Reversa como Ferramenta na Redução de Resíduo Textil.** Journal of Technology & Information (JTnI), v. 2, n. 2, 2022.

MZROZINSKI, H.; STEFFEN, C.; MEURER, H. **O uso das fibras PET recicladas na indústria têxtil através da inovação e design sustentável.** Competência, Porto Alegre, v. 10, n. 2. 2017.

OCDE (2016) OCDE- Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. **Extended Producer Responsibility: Updated Guidance for Efficient Waste Management**, OECD Publishing, Paris, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1787/9789264256385-en. Acessado em: 05 mar. 2022.

PEREIRA, André Luiz *et al.* **Logística reversa e sustentabilidade.** São Paulo: Cengage Learning, v. 208, 2012.

PERES, M. *et al.* **A adoção do princípio poluidor pagador e os reflexos no consumo**. RJLB, Ano, v. 8, p. 1231–1249, 2022.

PICHININ, A. M. **Responsabilidade socioambiental da indústria têxtil: um estudo sobre a logística reserva da empresa C&A.** Dissertação ao Programa de Pós-Graduação em Direto, UFSM. Santa Maria, 2022.

SILVA, Thainy Genny Esteves *et al.* **Economia circular: um panorama do estado da arte das políticas públicas no Brasil.** Revista Produção Online, v. 21, n. 3, p. 951-972, 2021.

SINDITÊXTILSP - Sindicato das indústrias de fiação e tecelagem do estado de São Paulo). **Projeto Retalho Fashion**. Disponível em: <Home - Sinditêxtil-SP (sinditextilsp.org.br)>. Acesso em: 02 jan. de 2024.

VESAL, Mahdi; SIAHTIRI, Vida; O'CASS, Aron. **Strengthening B2B brands by signalling environmental sustainability and managing customer relationships.** Industrial Marketing Management, v. 92, p. 321-331, 2021.

MODELO CONCEITUAL DE INTEGRAÇÃO ENTRE SERVITIZAÇÃO E TECNOLOGIAS DIGITAIS NA LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS NO BRASIL

1 Priscila Carvalho Marques; 2 Erico Kunde Correa; 3 Pablo Mendes Machado
[1]Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), e-mail: pcm22043@gmail.com
[2]Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), e-mail: ericokundecorrea@yahoo.com.br
[3]Instituto Federal Sul-Rio-Grandense (IFSUL), e-mail: pablomendes@ifsul.edu.br

Palavras-chave: Logística reversa; Servitização; Tecnologias digitais.

Introdução

A gestão de pneus inservíveis no Brasil permanece como um desafio ambiental persistente, mesmo diante de avanços regulatórios, evidenciando limitações estruturais na operacionalização dos sistemas de retorno pós-consumo. O problema configura-se como uma questão ambiental relevante, não apenas em função do elevado volume gerado, mas também pela complexidade da cadeia logística e pelos impactos decorrentes do descarte inadequado, incluindo contaminação do solo e da água, proliferação de vetores e riscos à saúde pública (IBAMA, 2024).

Embora existam instrumentos regulatórios consolidados, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e a Resolução CONAMA nº 416/2009, ainda persistem limitações relacionadas à rastreabilidade dos fluxos, à eficiência operacional do sistema e à articulação entre os diferentes agentes envolvidos. Essas fragilidades evidenciam lacunas na governança do sistema, comprometendo a efetividade das diretrizes estabelecidas e a plena internalização da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos.

Esse cenário revela um descompasso entre a estrutura normativa e sua efetividade prática, indicando que a problemática do fluxo reverso não se limita à ausência de regulamentação, mas à dificuldade de operacionalização e integração sistêmica. Ainda que formalmente instituído, o sistema apresenta características fragmentadas, com baixa integração informacional, limitada capacidade de monitoramento e reduzida transparência na circulação dos resíduos ao longo da cadeia. Assim, o principal entrave reside na insuficiente articulação entre os fluxos físicos e informacionais que sustentam sua operacionalização, comprometendo a rastreabilidade, a coordenação entre atores e a eficiência do modelo vigente.

A literatura sobre economia circular indica que a transição para modelos circulares demanda abordagens integradas capazes de articular dimensões tecnológicas, organizacionais e institucionais (GEISSDOERFER et al., 2017; KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017). Essa transição pressupõe a superação de modelos lineares de gestão e a incorporação de mecanismos que favoreçam a circulação de materiais, a extensão do ciclo de vida dos produtos e a geração de valor a partir de resíduos. Nesse contexto, a servitização e as tecnologias digitais emergem como vetores complementares de transformação, ao possibilitarem, respectivamente, a reconfiguração de modelos de negócio orientados ao desempenho e o aprimoramento da gestão da informação, incluindo rastreamento, monitoramento e análise de dados em tempo real (BAINES et al., 2020; CHAUHAN; PARIDA; DHIR, 2022).

Apesar desses avanços, observa-se que a literatura ainda carece de abordagens que integrem, de forma sistêmica, servitização e tecnologias digitais em contextos de economias emergentes, evidenciando uma lacuna analítica relevante. Tal lacuna é particularmente significativa no caso brasileiro, em que desafios operacionais, informacionais e institucionais coexistem e demandam soluções capazes de fortalecer a coordenação entre os agentes, aumentar a transparência dos fluxos e aprimorar a governança do sistema.

Diante desse contexto, este estudo analisa de que forma a articulação entre servitização e tecnologias digitais pode contribuir para a reconfiguração da gestão de pneus pós-consumo no Brasil, com foco no aprimoramento da rastreabilidade, da eficiência operacional e da governança. A convergência entre essas abordagens sugere a possibilidade de reestruturação do sistema a partir de uma perspectiva sistêmica, na qual a oferta de serviços associados ao ciclo de vida do produto se articula com infraestruturas digitais capazes de reduzir assimetrias informacionais, ampliar a coordenação entre os atores envolvidos e fortalecer a confiabilidade dos fluxos reversos.

O estudo adota uma abordagem analítico-propositiva, buscando não apenas descrever as limitações do sistema, mas problematizar suas causas estruturais à luz da literatura recente. Ao integrar servitização e tecnologias digitais, propõe caminhos para o aprimoramento da governança, da eficiência operacional e da aderência aos princípios da economia circular, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 9, 11 e 12). A pesquisa deriva de investigação anterior em nível de mestrado, que subsidia a base analítica desta proposição.

Material e Métodos

A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, de natureza exploratória e explicativa, fundamentada no método hipotético-dedutivo. Adota-se uma abordagem analítico-propositiva, baseada em revisão sistemática da literatura de caráter estruturado e análise documental, inspirada nos princípios do Design Science Research (DSR), especialmente no que se refere à construção de proposições voltadas à solução de problemas práticos. Esse delineamento metodológico permite examinar criticamente o

sistema de retorno de pneus sob uma perspectiva integrada, articulando fundamentos teóricos e evidências institucionais para a sistematização de um modelo conceitual direcionado ao aprimoramento da rastreabilidade, da eficiência operacional e da governança do sistema.

Foram consultadas bases científicas nacionais e internacionais, com a seleção de estudos recentes e relevantes sobre logística reversa, economia circular, servitização e transformação digital. Complementarmente, foram analisados documentos normativos e relatórios institucionais, com destaque para dados do IBAMA (2024), além dos instrumentos regulatórios associados à Política Nacional de Resíduos Sólidos e à Resolução CONAMA nº 416/2009. Essa estratégia permitiu a contextualização empírica do problema e a identificação de limitações na operacionalização do sistema no contexto brasileiro.

Os documentos institucionais foram utilizados para compreender a dinâmica da destinação de pneus inservíveis, os volumes reportados e os desafios relacionados ao monitoramento, à rastreabilidade e à transparência dos fluxos. Já a seleção dos estudos científicos priorizou publicações recentes e alinhadas ao estado da arte, com ênfase em contribuições que abordam a integração entre tecnologias digitais, modelos de negócio e sustentabilidade. Essa abordagem possibilitou a construção de uma base analítica consistente, orientada à proposição conceitual de alternativas para o aprimoramento da governança e da eficiência do sistema.

A análise concentrou-se na identificação de lacunas estruturais no sistema de retorno de pneus no Brasil, especialmente no que se refere à rastreabilidade, à integração entre agentes e à eficiência operacional. Consideraram-se, nesse processo, aspectos relacionados à fragmentação da cadeia, à assimetria informacional entre os atores envolvidos e à limitada transparência nos registros de movimentação dos resíduos, elementos que, segundo dados institucionais e literatura recente, dificultam a consolidação de modelos mais eficientes de gestão.

A partir dessas lacunas, foi elaborada uma proposição conceitual fundamentada na literatura e em evidências documentais, cujo objetivo é contribuir para a compreensão das interações entre tecnologia, modelos de negócio e governança, sem pretensão de validação empírica neste estágio da pesquisa. A proposição foi estruturada de modo a evidenciar a potencial contribuição da servitização e das tecnologias digitais para o aprimoramento da rastreabilidade, o fortalecimento da coordenação entre agentes e a melhoria da eficiência do sistema, em consonância com as diretrizes institucionais e com os desafios apontados pelos dados do IBAMA (2024).

Resultados e Discussão

A análise evidencia um descompasso entre a existência de instrumentos regulatórios e sua efetividade operacional no contexto brasileiro. Apesar das diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos e pela Resolução CONAMA nº 416/2009, persistem limitações relacionadas à rastreabilidade dos fluxos, à integração de sistemas de monitoramento e à transparência na circulação dos resíduos, conforme indicado por dados do IBAMA (2024). Tais fragilidades refletem entraves estruturais, especialmente no que se refere à coordenação entre os atores e à disponibilidade de informações confiáveis ao longo da cadeia.

Embora a literatura internacional registre avanços nas discussões sobre digitalização e servitização, essas abordagens ainda são frequentemente tratadas de forma isolada, desconsiderando as interdependências entre fluxos físicos e informacionais. Essa fragmentação limita a compreensão do sistema como um arranjo integrado, sobretudo em economias emergentes, onde desafios institucionais, operacionais e informacionais tendem a ser mais acentuados.

Observa-se, nesse contexto, que as limitações não decorrem da ausência de normativas, mas da complexidade associada à sua implementação e à articulação entre agentes públicos e privados. A multiplicidade de atores, aliada à fragmentação dos fluxos e à heterogeneidade das práticas operacionais, dificulta a consolidação de mecanismos contínuos de controle e monitoramento. Assim, soluções centradas exclusivamente em dimensões tecnológicas ou gerenciais tendem a apresentar resultados limitados, por não contemplarem o caráter sistêmico do arranjo e suas especificidades institucionais.

A literatura indica que as tecnologias digitais vêm sendo progressivamente incorporadas como instrumentos de ampliação da transparência e da rastreabilidade, ao viabilizarem o monitoramento contínuo e o registro das movimentações ao longo do ciclo de vida dos produtos (CHAUHAN; PARIDA; DHIR, 2022). Essas tecnologias contribuem para a redução de assimetrias informacionais e o fortalecimento da governança. Em paralelo, a servitização introduz uma lógica orientada ao desempenho, na qual o valor se associa ao uso, à durabilidade e à oferta de serviços vinculados ao ciclo de vida do produto, incentivando a extensão do tempo de utilização e a gestão estruturada do retorno pós-consumo (BAINES et al., 2020; KOHTAMÄKI et al., 2020).

Entretanto, o potencial dessas abordagens não reside em sua adoção isolada, mas em sua articulação com o contexto regulatório e operacional brasileiro. A integração entre servitização e tecnologias digitais possibilita conectar os fluxos físicos aos informacionais, ampliando o controle das etapas de coleta, transporte e destinação. Essa convergência fortalece o monitoramento, reduz a fragmentação e aprimora a coordenação entre fabricantes, distribuidores, revendedores, transportadores e unidades de destinação.

Para além das dimensões tecnológicas, a efetividade dessas abordagens depende da incorporação de práticas de educação ambiental e da consolidação da responsabilidade compartilhada prevista na Política Nacional de Resíduos Sólidos. A participação ativa de consumidores, empresas e poder público constitui elemento central para o funcionamento do sistema, que depende não apenas de infraestrutura tecnológica, mas também de adesão institucional e comportamental. Nesse sentido, a educação ambiental assume papel estratégico na ampliação da consciência sobre o retorno adequado dos pneus e no fortalecimento da governança.

A contribuição deste estudo reside na proposição de uma leitura integrada do sistema, evidenciando que a superação das limitações atuais depende menos da introdução isolada de soluções e mais da articulação entre tecnologia, modelos de

negócio e governança, à luz das especificidades do contexto brasileiro. Essa abordagem permite compreendê-lo como um sistema sociotécnico, no qual dimensões regulatórias, informacionais e organizacionais se inter-relacionam.

Ao incorporar variáveis territoriais, regulatórias e de governança próprias de economias emergentes — como informalidade, heterogeneidade operacional e limitações de monitoramento —, o estudo amplia o potencial de aplicação das discussões no cenário nacional, aproximando a proposição conceitual das condições reais de implementação.

Nesse contexto, estrutura-se um modelo conceitual integrado que articula servitização e tecnologias digitais como dimensões complementares para enfrentar desafios estruturais — baixa rastreabilidade, ineficiência operacional e fragmentação da cadeia. O modelo proposto organiza-se a partir de três mecanismos centrais: monitoramento contínuo viabilizado por tecnologias digitais, integração informacional entre os agentes da cadeia e reconfiguração dos modelos de negócio com base na lógica da servitização. Esses mecanismos atuam de forma interdependente, promovendo a conexão entre fluxos físicos e informacionais, ampliando a rastreabilidade, fortalecendo a coordenação entre os atores e contribuindo para a melhoria da eficiência operacional do sistema.

No modelo proposto, a servitização contribui para a extensão do ciclo de vida dos pneus e para a geração de valor baseada no uso e na oferta de serviços associados, enquanto as tecnologias digitais viabilizam o rastreamento, o monitoramento e a análise de dados ao longo do fluxo reverso. A articulação dessas dimensões potencializa a transparência das informações, fortalece a governança, melhora a eficiência operacional e promove a sustentabilidade do sistema, consolidando uma abordagem integrada alinhada aos princípios da economia circular, cuja operacionalização, baseada na articulação entre mecanismos tecnológicos e organizacionais, é sintetizada na Figura **1**.



Figura 1 – Modelo conceitual da integração entre servitização e tecnologias digitais na logística reversa de pneus. Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Diferentemente de abordagens convencionais, o modelo proposto integra dimensões tecnológicas e organizacionais, conectando rastreabilidade digital à reconfiguração de modelos de negócio e ampliando sua aplicação em contextos complexos. Sua principal contribuição reside na proposição de um modelo conceitual que articula servitização e tecnologias digitais na logística reversa de pneus em economias emergentes, oferecendo uma abordagem sistêmica ainda pouco explorada e ampliando a compreensão das dinâmicas que condicionam a eficiência, a rastreabilidade e a governança dos sistemas de retorno pós-consumo.

Considerações finais

Os resultados evidenciam que o sistema de retorno de pneus no Brasil é limitado não pela ausência de regulamentação, mas pela fragmentação da cadeia e pela baixa integração entre fluxos físicos e informacionais, o que compromete a rastreabilidade e a efetividade das diretrizes existentes.

Nesse contexto, a integração entre servitização e tecnologias digitais configura-se como um mecanismo estruturante para requalificar o sistema, ao viabilizar monitoramento contínuo, integração informacional entre os agentes e maior controle sobre os fluxos reversos, contribuindo diretamente para a eficiência operacional e o fortalecimento da governança.

A principal contribuição do estudo reside na proposição de um modelo conceitual que articula essas dimensões de forma interdependente, oferecendo uma leitura sistêmica aplicável a contextos marcados por complexidade operacional e limitações institucionais. Embora ainda em nível conceitual, o modelo estabelece fundamentos analíticos para enfrentar entraves como assimetria informacional, descoordenação entre atores e baixa confiabilidade dos dados.

Assim, o estudo amplia o debate ao integrar tecnologia, governança e modelos de negócio em uma perspectiva sistêmica, oferecendo bases analíticas para o desenvolvimento de soluções mais robustas e transparentes, alinhadas à economia circular e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 9, 11 e 12), ao fortalecer a rastreabilidade, a coordenação entre os agentes e a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos.

Ao evidenciar a interdependência entre essas dimensões, o estudo contribui para a compreensão da logística reversa como um sistema sociotécnico, no qual a eficiência depende da articulação entre fluxos físicos e informacionais, oferecendo diretrizes consistentes para futuras validações empíricas em contextos como o brasileiro.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Pelotas pelo apoio institucional ao desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

BAINES, T. et al. Servitization within manufacturing: exploring the deployment of integrated product-service offerings. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2020.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.

CHAUHAN, S.; PARIDA, V.; DHIR, A. Digital transformation in reverse logistics: applications, challenges and future research directions. *International Journal of Production Research*, 2022.

CONAMA. Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. *Design Science Research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia*. Porto Alegre: Bookman, 2015.

GEISSDOERFER, M. et al. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 2017.

IBAMA. *Relatório de logística reversa de pneus*. Brasília, 2024.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017.

KOHTAMÄKI, M. et al. Digital servitization business models. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020.

LEI DE INCENTIVO À RECICLAGEM E DECRETO DE EMBALAGENS: AVANÇOS E DESAFIOS NA LOGÍSTICA REVERSA NO BRASIL E O CASO ISOPOR® AMIGO

Fernanda Luize Corrêa Pscheidt, Marina Zambonato Farina, Fernanda do Nascimento Stafford
1 Univille, e-mail:fernandaluizecorrea@hotmail.com; 2 Univille, e-mail:marinazf.eng@gmail.com; 3 Univille, e-mail: fernanda.stafford@gmail.com

Palavras-chave: Logística reversa; Reciclagem; Políticas pública

Introdução

A intensificação dos padrões de produção e consumo tem resultado no aumento expressivo da geração de resíduos sólidos, configurando um dos principais desafios ambientais contemporâneos. Nesse contexto, a logística reversa surge como instrumento fundamental para viabilizar o retorno de resíduos ao ciclo produtivo, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para o fortalecimento da economia circular (ABLAS; RIBEIRO, 2025). No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, estabelece a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e define a logística reversa como um de seus principais instrumentos. Complementarmente, a Lei nº 14.260/2021, conhecida como Lei de Incentivo à Reciclagem (LIR) e o Decreto nº 12.688/20255 (Decreto de Embalagens) ampliaram o arcabouço normativo, incorporando mecanismos de incentivo econômico e diretrizes mais específicas para sua implementação. A Lei de Incentivo à Reciclagem cria a possibilidade de investimentos em formato de mecenato inspirado nas leis de incentivo à cultura e esporte já consolidadas no Brasil. A ideia é permitir que pessoas físicas e jurídicas tributadas com base no lucro real tenham a opção de deduzir parte do imposto de renda em virtude do apoio direto a projetos de reciclagem. Pessoas físcias e jurídicas poderão selecionar projetos admitidos pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) para realizar o aporte de recursos denominado "Incentivo" e no ano calendário seguinte deduzir o Incentivo do imposto devido (SINIR, 2026). No primeiro ciclo da iniciativa, realizado em 2025, 952 projetos foram apresentados com propostas distribuídas por 26 unidades da Federação, somando um volume de investimentos pleiteados de R$ 2,2 bilhões (GOV.BR, 2026)). De acordo com dados do MMA, dentre as propostas submetidas, destacaram-se boas práticas voltadas ao apoio social, especialmente iniciativas direcionadas à organização e ao fortalecimento de cooperativas de catadoras e catadores de materiais recicláveis. Também foi expressiva a presença de projetos inovadores, incluindo ações de pesquisa e desenvolvimento (P&D) conduzidas por empresas para o aprimoramento de tecnologias de reciclagem, investimentos destinados à estruturação de sistemas de reciclagem em municípios, à criação de centros de referência em resíduos, além de iniciativas voltadas à implantação da compostagem e ao desenvolvimento de tecnologias descentralizadas para o reaproveitamento de resíduos (GOV.BR, 2026). Alguns itens que têm logística reversa prevista na PNRS, como resíduos e embalagens de agrotóxicos, óleos lubrificantes usados ou contaminados, pneus, pilhas e baterias; e mais recentemente, lâmpadas fluorescentes e embalagens de medicamentos, já são contemplados por sistemas estruturados de coleta e destinação adequada. No caso dos agrotóxicos, a legislação aplicável data de 1989, com atualizações em 2000 e 2002. Ainda neste contexto, neste ano de 2025, entrou em vigor o Decreto 12.688/2025, que institui o sistema de logística reversa de embalagens de plástico a cargo dos fabricantes, dos importadores, dos distribuidores e dos comerciantes, que abrange todo o ciclo de vida do produto, e estabelece as normas e os critérios para a sua estruturação, a sua implementação e a sua operacionalização. Apesar de todo o regramento, existe um desafio adicional na reciclagem de embalagens plásticas, que como pontuado por Stafford et al (2022), é um resíduo de geração é difusa e cotidiana, demandando parcerias com poder público, cooperativas de reciclagem, concessionárias de limpeza urbana, mas, acima de tudo, pela sensibilização do consumidor final para o descarte desses materiais para a coleta seletiva, em condições adequadas. (Stafford et al, 2026). Isso vai ao encontro do proposto por Constant & Gibran (2024), que estabelecem que a efetividade desses instrumentos legais depende não apenas de sua existência formal, mas também da capacidade de implementação prática e do engajamento dos diferentes atores envolvidos (CONSTANT; GIBRAN, 2024). Nesse sentido, persistem desafios relacionados à operacionalização dos sistemas, à infraestrutura disponível e à adesão da sociedade. Diante disso, o presente estudo busca responder ao seguinte problema de pesquisa: como os instrumentos legais atuais contribuem para promover a reciclagem e fortalecer iniciativas práticas de logística reversa no Brasil? Parte-se da hipótese de que, embora tais instrumentos representem avanços institucionais relevantes, sua efetividade depende da articulação com iniciativas locais e da atuação coordenada entre diferentes atores sociais. Desta forma, tem-se que o objetivo geral é analisar a contribuição da Lei de Incentivo à Reciclagem e do Decreto de Embalagens para a efetividade da logística reversa, utilizando o Programa Isopor® Amigo como estudo de caso.

Material e Métodos

Para responder ao problema de pesquisa proposto, adotou-se uma abordagem qualitativa, de caráter exploratório-descritivo, adequada à compreensão de fenômenos relacionados à implementação de instrumentos legais e sua interface com práticas socioambientais, representadas pelo caso do Programa Isopor® Amigo. Essa escolha metodológica permite analisar não apenas os dispositivos normativos em si, mas também suas formas de aplicação, limitações e potencialidades no contexto real da logística reversa de embalagens no Brasil. Assim, esta pesquisa se estrutura em duas frentes complementares: (1) análise

documental da legislação vigente, com foco na Lei de Incentivo à Reciclagem e no Decreto nº 12.668/2025 e; (2) investigação aplicada, por meio de estudo de caso do Programa Isopor® Amigo. O estudo de caso é adotado como estratégia para explorar empiricamente como os instrumentos legais se materializam em iniciativas concretas, permitindo uma análise contextualizada e aprofundada. Assim, na primeira etapa de pesquisa, foram examinados os objetivos, e diretrizes operacionais e obrigações atribuídas aos diferentes atores envolvidos (setor produtivo, poder público e sociedade). Os dados obtidos foram analisados por meio de técnicas de análise de conteúdo, permitindo a categorização e interpretação das informações à luz do referencial teórico e do marco legal estudado, permitindo a identificação de convergências e divergências entre o que é previsto nos instrumentos legais e o que é efetivamente praticado no âmbito do programa analisado. Por fim, a interpretação dos resultados é orientada pela hipótese de que a efetividade dos instrumentos legais depende da articulação entre políticas públicas e iniciativas locais, bem como da atuação coordenada entre diferentes atores sociais. Dessa forma, a análise procura evidenciar em que medida a legislação vigente contribui para fortalecer (ou limitar) práticas concretas de logística reversa, destacando fatores críticos de sucesso, entraves operacionais e oportunidades de aprimoramento.

Resultados e Discussão

A Lei de Incentivo à Reciclagem estabelece incentivos fiscais e benefícios a serem adotados pela União para projetos que tenham como escopo (I) a capacitação, formação e assessoria técnica, inclusive para a promoção de intercâmbios, nacionais e internacionais, para as áreas escolar/acadêmica, empresarial,associações comunitárias e organizações sociais que explicitem como seu objeto a promoção, o desenvolvimento, a execução ou o fomento de atividades de reciclagem ou de reúso de materiais; (II) incubação de microempresas, de pequenas empresas, de cooperativas e de empreendimentos sociais solidários que atuem em atividades de reciclagem; (III) pesquisas e estudos para subsidiar ações que envolvam a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos; (IV) implantação e adaptação de infraestrutura física de microempresas, de pequenas empresas, de indústrias, de cooperativas e de associações de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis; (V) aquisição de equipamentos e de veículos para a coleta seletiva, a reutilização, o beneficiamento, o tratamento e a reciclagem de materiais pelas indústrias, pelas microempresas, pelas pequenas empresas, pelas cooperativas e pelas associações de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis; (VI) organização de redes de comercialização e de cadeias produtivas, e apoio a essas redes, integradas por microempresas, pequenas empresas, cooperativas e associações de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis; (VII) fortalecimento da participação dos catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis nas cadeias de reciclagem; e (VIII) desenvolvimento de novas tecnologias para agregar valor ao trabalho de coleta de materiais reutilizáveis e recicláveis. Dentro destes escopos, verifica-se que podem ser desenvolvidos projetos que contribuem diretamente para a realização do que é determinado no Decreto de Embalagens, especialmente no que tange o alcance dos objetivos que o referido Decreto propõe, que são aprimorar a implementação e a operacionalização da infraestrutura física e logística de recolhimento das embalagens de plástico colocadas no mercado; promover o aproveitamento das embalagens de plástico e seu direcionamento para sua cadeia produtiva ou outras cadeias produtivas; incentivar a utilização de insumos com menor impacto ambiental; estimular a utilização de embalagens com maior potencial de reutilização, reciclabilidade, retornabilidade e uso de conteúdo reciclado nas atividades produtivas; estimular o desenvolvimento de mercados, a produção e o consumo de produtos derivados de materiais reciclados e recicláveis; estimular a contratação, a estruturação e o aprimoramento das condições de trabalho e de infraestrutura de cooperativas, associações ou outras formas de organização popular de catadoras e catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis; promover a cultura do reaproveitamento de materiais plásticos por meio de campanhas de informação e da educação ambiental; e incentivar a adoção de modelos produtivos que viabilizem a economia circular. Ainda no âmbito do Decreto, é permitido que sejam instituídos modelos individuais ou coletivos de logística reversa de embalagens, entendendo-se que o modelo individual representa uma forma de implementação e operacionalização do sistema de logística reversa de forma direta por empresa não aderente ao modelo coletivo; e que o modelo coletivo preconiza a implementação e operacionalização do sistema de logística reversa de produtos ou de embalagens, de maneira coletiva, estruturada e gerenciada por entidade gestora, que abranja o conjunto de entidades representativas dos setores envolvidos e das empresas aderentes. Outro ponto importante do Decreto é a proposição de que na implementação e na operacionalização do sistema de logística reversa de embalagens de plástico, poderão ser adotadas soluções integradas que contemplem, entre outras, os pontos de entrega voluntária; a coleta seletiva implantada prioritariamente com a participação de cooperativas, associações e outras formas de organização popular de catadoras e catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis; as cooperativas, as associações e outras formas de organização popular de catadoras e catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis; os pontos de beneficiamento; as unidades de triagem manual, semimecanizada ou mecanizada; as unidades de fabricação de resina pós-consumo reciclada – PCR; a comercialização de embalagens de plástico pós-consumo; e as campanhas de coleta. É neste contexto que o Programa Isopor® Amigo se consolida como uma contribuição importante para a logística reversa de embalagens em EPS e XPS. Existente desde 2020, ou seja, criado e implementado anteriormente ao Decreto, o Programa tem como objetivo fomentar a reciclagem de materiais, especialmente bandejas, boxes e marmitas produzidos em EPS e XPS, atendendo a soluções que estão propostas no Decreto. Como apresentado na Figura 1, o Programa conta com a alocação de Pontos de Entrega Voluntária, com a parceria entre entidades que coletam, transportam, armazenam e reciclam o material, bem como campanhas de educação ambiental para a sensibilização para o correto descarte do material.



Figura 1: esq-dir) encontro com representantes de empresas apoiadoras, equipe do projeto, material de educação ambiental, participação em feira. Fonte: STAFFORD et al (2025).

Na análise do Programa Isopor® Amigo realizada por Stafford et al (2025), os números apontaram que no ano de 2020, durante os 90 dias, foram coletados 132,44 quilogramas de material, dos quais 70,79 quilogramas foram destinados à reciclagem, representando 53,44% de material limpo. Em 2021, observamos um aumento nesse número, com 593,68 quilogramas coletados, dos quais 516,20 quilogramas foram para o processo de reciclagem, resultando em 86.9% de material limpo. Em 2022, o volume coletado subiu para 2.280,570 quilogramas coletados, com 2.238,07 quilogramas reciclados e 98,1% de reciclabilidade. Já em 2023, foram coletados 1.385,18 quilogramas de Isopor®, dos quais 1.380,98 quilogramas foram destinados à reciclagem, com 99,7% do material reciclado. Por fim, em 2024, foram coletados 1.430,62 quilogramas de material, com 100% de reciclabilidade, visto que, apenas o material limpo foi coletado. Outra forma de avaliar o impacto do programa é por meio do retorno de mídia, que proporciona uma mensuração do alcance e da efetividade na comunicação com o público-alvo. O retorno de mídia do Programa Isopor® Amigo, no período de 2020 a 2022, foi de R$ 1.558.960,02. Em 2023, o retorno alcançou R$ 587.888,63, enquanto no período de fevereiro de 2024 a fevereiro de 2025, o retorno atingiu R$ 2.280.147,02. Estes números demonstram que a união entre os diversos atores da sociedade, bem como a sensibilização ambiental estruturada são capazes de potencializar a reciclagem de embalagens. Assim, a existência de mecanismos regulatórios, como a LIR e o Decreto de Embalagens contribuem para a estruturação de cadeias de reciclagem que protegem o meio ambiente, geram contribuições sociais e giram a economia.

Considerações Finais

Os resultados evidenciam que os instrumentos normativos representam avanços significativos ao estabelecer diretrizes, metas e mecanismos de incentivo à cadeia da reciclagem, sobretudo no que se refere à responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Entretanto, observa-se que a efetividade dessas políticas está condicionada à articulação entre atores públicos e privados, bem como à existência de iniciativas locais capazes de operacionalizar tais diretrizes. O caso analisado demonstra o potencial de projetos estruturados na viabilização da logística reversa, ao mesmo tempo em que explicita entraves relacionados à viabilidade econômica, à infraestrutura e ao engajamento social. Conclui-se que o aprimoramento da logística reversa no país depende da integração entre instrumentos legais e práticas territoriais.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Associação Brasileira da Indústria do Plástico pelos dados gentilmente cedidos.

Referências Bibliográficas.

Ablas, I. S., De, F., & Ribeiro, M. (n.d.). *A LOGÍSTICA REVERSA NO BRASIL: DESAFIOS, AVANÇOS E A GOVERNANÇA DOS CRÉDITOS DE RECICLAGEM*. https://doi.org/10.37497/revistafapad.v5id.article.88

BRASIL. Decreto nº 12.688, de 21 de outubro de 2025. Regulamenta o art. 32, § 1º, e o art. 33, § 1º, da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e institui o sistema de logística reversa de embalagens de plástico. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 22 out. 2025.

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: seção 1*, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

Gibran, S. M. (n.d.). *A POLÍTICA DE LOGÍSTICA REVERSA PARA AS EMPRESAS SITUADAS EM CURITIBA-ESTADO DO PARANÁ THE REVERSE LOGISTICS POLICY FOR COMPANIES LOCATED IN CURITIBA-STATE OF PARANÁ Carina Constant * 1*. https://doi.org/10.37497/Revista

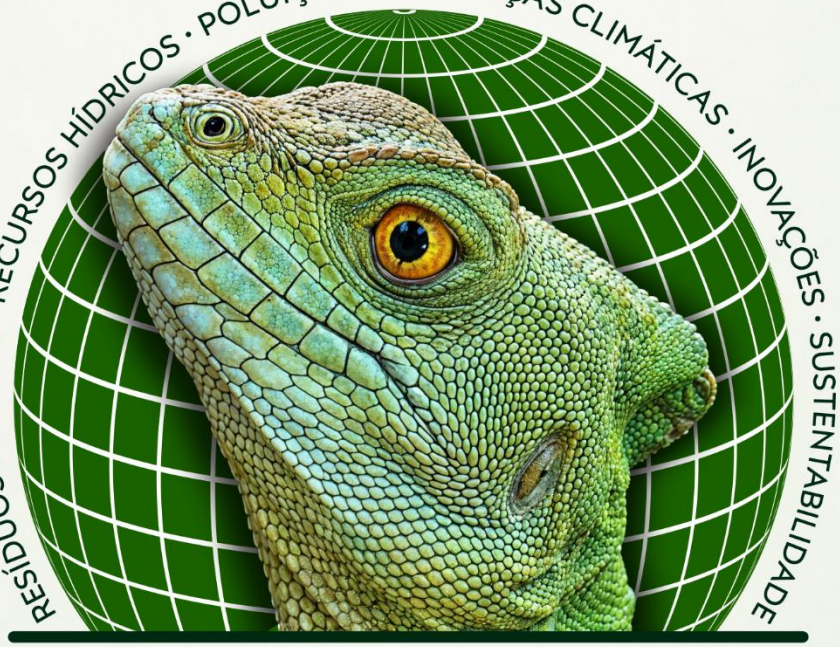
Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Lei de Incentivo à Reciclagem: MMA abre prazo para submissão de propostas em 2026. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/lei-de-incentivo-a-reciclagem-mma-abre-prazo-para-submissao-de-propostas-em-2026. Acesso em: 3 maio 2026.

Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos (SINIR). Sobre a Lei de Incentivo à Reciclagem (LIR). Disponível em: https://sinir.gov.br/incentivo-a-reciclagem/sobre-a-lir/. Acesso em: 3 maio 2026.

Stafford, F., Farina, M. Z., Borges José, R., & Castilho, C. (2025). IMPORTÂNCIA DA RESPONSABILIDADE COMPARTILHADA NO SUCESSO DE PROGRAMAS DE LOGÍSTICA REVERSA: APRENDIZADOS DO PROGRAMA ISOPOR® AMIGO. *Anais Do XIII Encontro de Sustentabilidade Em Projeto*. https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/267047.

ÁREA TEMÁTICA 18

MEIO AMBIENTE, POLÍTICAS PÚBLICAS, LEGISLAÇÃO E LICENCIAMENTO AMBIENTAL



5º CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

A CENTRALIDADE DA ANÁLISE DE EIA/RIMA E PBAS NO LICENCIAMENTO AMBIENTAL: UMA ABORDAGEM DOCUMENTAL

Simone Rodrigues Alves
Sociedade Educacional Leonardo da Vinci/ Instituto Água e Terra, e-mail:eng.simonealves@outlook.com

Palavras-chave: EIA/RIMA; Gestão Ambiental; Licenciamento Ambiental.

Introdução

O licenciamento ambiental constitui um dos principais instrumentos da política ambiental brasileira, sendo utilizado para avaliar previamente impactos decorrentes da implantação de empreendimentos potencialmente poluidores. Nesse contexto, o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) subsidiam a tomada de decisão dos órgãos ambientais quanto à viabilidade de projetos de maior porte. Esses estudos lastreiam a etapa de Licença Prévia, na qual se avalia a viabilidade ambiental do empreendimento, antecedendo as fases de Licença de Instalação e Licença de Operação, nas quais novas condicionantes técnicas passam a ser acompanhadas.

Por conseguinte, , os Programas Básicos Ambientais detalham medidas mitigadoras, monitoramento e compensação ambiental necessárias à continuidade do processo de licenciamento. A análise documental desses programas representa etapa relevante, pois contribui para verificar consistência técnica, coerência entre estudos apresentados e conformidade com exigências regulatórias. Além disso, a adequada estruturação documental permite maior previsibilidade técnica e redução de pendências durante o trâmite processual.

Material e Métodos

Trata-se de um estudo de caso com abordagem qualitativa, utilizando as técnicas de observação participante e pesquisa documental. Baseia-se em observações realizadas durante atividades de estágio no Instituto Água e Terra, no período de fevereiro e março de 2026, envolvendo análise documental de Programas Básicos Ambientais, conferência de documentação técnica, identificação de pendências documentais e acompanhamento de processos relacionados ao licenciamento ambiental.

A rotina observada incluiu verificação de documentos obrigatórios, conferência de anexos exigidos e análise preliminar da conformidade técnica dos materiais apresentados pelos empreendedores. Também foram consideradas observações de reuniões técnicas de apresentações dos EIA/RIMA de alguns empreendimentos, ocasião em que foram discutidas exigências documentais, etapas futuras do licenciamento e procedimentos necessários ao atendimento das condicionantes ambientais.

Resultados e Discussão

As observações realizadas indicam que empreendimentos de maior porte demandam planejamento documental mais estruturado, uma vez que a complexidade associada ao EIA/RIMA amplia a necessidade de compatibilização prévia entre exigências regulatórias, programas ambientais e condicionantes técnicas.

Nesse contexto, o EIA/RIMA demonstra função estratégica ao antecipar exigências, orientar adequações e reduzir incertezas nas etapas subsequentes do licenciamento ambiental. A correta organização dos Programas Básicos Ambientais favorece maior consistência técnica dos processos e contribui para redução de retrabalhos durante a tramitação administrativa.

A natureza interdisciplinar dos estudos ambientais mostra-se essencial para a consistência técnica do licenciamento, pois diferentes especialidades contribuem para a interpretação integrada dos componentes físicos, bióticos e antrópicos envolvidos. Geólogos, biólogos, engenheiros ambientais, agrônomos e outros profissionais atuam de forma complementar na construção e avaliação dos estudos ambientais.

A experiência observada demonstra ainda que a orientação técnica preliminar ao empreendedor favorece maior compreensão das exigências ambientais e amplia a qualidade dos documentos apresentados, especialmente em empreendimentos que demandam retomada ou readequação de etapas anteriormente interrompidas.

Além da função documental, os Programas Básicos Ambientais assumem papel fundamental na operacionalização das medidas propostas nos estudos ambientais, uma vez que detalham programas de monitoramento, controle e mitigação a serem executados ao longo das diferentes etapas do empreendimento. Sua correta estruturação favorece o acompanhamento técnico das condicionantes estabelecidas e permite maior clareza quanto às responsabilidades atribuídas ao empreendedor.

No contexto do licenciamento ambiental, a fase de Licença Prévia representa momento decisivo para a avaliação da viabilidade ambiental, pois nela são identificados impactos potenciais e definidas exigências que orientarão as etapas subsequentes. A Licença de Instalação e a Licença de Operação, por sua vez, dependem da consistência das informações inicialmente apresentadas e da adequada execução das medidas previstas nos Programas Básicos Ambientais.

A experiência observada no setor evidencia que falhas documentais iniciais podem gerar atrasos significativos na tramitação processual, exigindo complementações técnicas e reavaliações por parte dos empreendedores. Dessa forma, a conferência preliminar dos documentos apresentados representa etapa estratégica para maior eficiência administrativa e redução

de inconsistências ao longo do processo.

Outro aspecto relevante refere-se ao caráter interdisciplinar dos estudos ambientais, uma vez que diferentes áreas do conhecimento são mobilizadas conforme a natureza dos impactos avaliados. Aspectos geológicos, biológicos, hidrológicos, agronômicos e socioambientais precisam ser integrados para que a análise final apresente consistência suficiente à tomada de decisão ambiental.

A observação de reuniões técnicas também permitiu compreender que o diálogo prévio entre equipe técnica e empreendedor contribui para maior clareza sobre as exigências legais e sobre os procedimentos esperados em cada etapa do licenciamento. Essa interação favorece melhor qualidade dos documentos apresentados e reduz retrabalhos futuros.

A análise técnica também evidencia que a organização documental favorece maior previsibilidade quanto ao cumprimento das condicionantes ambientais, permitindo que os empreendedores se preparem previamente para exigências futuras relacionadas à implantação e operação dos empreendimentos. Esse aspecto é particularmente relevante em projetos de maior porte, nos quais a ausência de informações consistentes pode comprometer a continuidade das etapas de licenciamento.

Sob a perspectiva institucional, a verificação preliminar dos documentos contribui para maior fluidez na tramitação administrativa, reduzindo a necessidade de sucessivas complementações e favorecendo melhor distribuição das análises técnicas entre os diferentes profissionais envolvidos no processo.

Nesse cenário, a atuação integrada entre especialistas de diferentes áreas do conhecimento amplia a capacidade de interpretação dos impactos ambientais e fortalece a qualidade técnica dos pareceres elaborados no âmbito do licenciamento ambiental.

A consolidação dos Programas Básicos Ambientais após a emissão da Licença Prévia representa etapa fundamental para a transição entre a avaliação inicial dos impactos e a implementação efetiva das medidas ambientais previstas. Esses programas detalham ações específicas relacionadas ao monitoramento de fauna e flora, controle de processos erosivos, gestão de resíduos, recuperação de áreas alteradas e acompanhamento de condicionantes socioambientais, conforme a natureza do empreendimento.

A experiência observada no acompanhamento técnico demonstra que a clareza documental nessa fase influencia diretamente a qualidade das etapas subsequentes do licenciamento, especialmente quando o empreendimento demanda readequações ou retomada de procedimentos anteriormente interrompidos. Nesses casos, a consistência dos documentos apresentados permite reduzir incertezas e facilitar a interpretação técnica por parte dos analistas responsáveis.

Outro aspecto relevante refere-se à necessidade de alinhamento entre os estudos ambientais e os programas executivos que serão posteriormente exigidos. A ausência dessa coerência pode gerar divergências entre o planejamento inicialmente aprovado e a execução proposta pelo empreendedor, exigindo complementações documentais e ajustes técnicos ao longo da tramitação administrativa.

A atuação interdisciplinar mostra-se particularmente importante nesse processo, pois diferentes profissionais contribuem para a construção integrada dos estudos e para a análise crítica dos programas apresentados. Aspectos geológicos auxiliam na compreensão das características físicas do terreno e de eventuais riscos associados; avaliações biológicas subsidiam a identificação de impactos sobre fauna e flora; contribuições agronômicas auxiliam na interpretação do uso e ocupação do solo; enquanto a engenharia ambiental atua na integração dos programas e no acompanhamento das medidas mitigadoras e compensatórias.

Além da dimensão técnica, a orientação prévia ao empreendedor durante reuniões de alinhamento institucional favorece maior entendimento sobre a lógica do licenciamento ambiental e sobre a necessidade de que os documentos apresentados mantenham coerência com as condicionantes estabelecidas. Essa etapa preliminar contribui para reduzir retrabalhos, ampliar a qualidade dos materiais protocolados e favorecer maior eficiência na análise técnica.

Observa-se ainda que o licenciamento ambiental, quando adequadamente compreendido, deixa de ser percebido apenas como exigência burocrática e passa a ser reconhecido como instrumento de planejamento, prevenção de impactos e organização da implantação dos empreendimentos. Essa percepção fortalece a qualidade do processo e contribui para maior segurança ambiental e institucional.

A etapa de conferência documental também contribui para maior uniformidade entre os processos analisados, permitindo que exigências recorrentes sejam identificadas com maior rapidez e que os empreendedores recebam orientações mais precisas quanto às adequações necessárias. Essa padronização favorece não apenas a análise técnica, mas também maior previsibilidade quanto aos prazos e às exigências futuras do processo de licenciamento.

Em empreendimentos de maior porte, observa-se que a consistência dos documentos apresentados influencia diretamente a forma como os Programas Básicos Ambientais serão posteriormente executados, sobretudo porque muitas condicionantes ambientais dependem da qualidade das informações inicialmente protocoladas.

Nesse sentido, a verificação preliminar dos documentos assume caráter preventivo, reduzindo a incidência de falhas que poderiam comprometer etapas futuras e contribuindo para maior segurança técnica na tomada de decisão ambiental.

Considerações Finais

A análise documental e o acompanhamento técnico reforçam que o EIA/RIMA não deve ser compreendido apenas como exigência formal, mas como ferramenta estratégica de planejamento ambiental. A correta estruturação documental e a compreensão prévia das etapas de licenciamento contribuem para maior segurança técnica, previsibilidade e qualidade na condução dos empreendimentos.

Observa-se ainda que a organização documental favorece a transparência do processo e fortalece os instrumentos de gestão ambiental. A atuação interdisciplinar e a orientação técnica preliminar demonstram-se essenciais para maior consistência dos estudos apresentados.

Agradecimentos

A autora agradece ao Instituto Água e Terra pela vivência técnica proporcionada durante o estágio e pela oportunidade de observação prática dos processos de licenciamento ambiental.

Referências Bibliográficas

BRASIL. *Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981.* Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986*. Dispõe sobre critérios para avaliação de impacto ambiental**.**

SÁNCHEZ, Luis Enrique. *Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos.* São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS ACUMULADOS EM PARQUES EÓLICOS: LACUNAS, DESAFIOS E PERSPECTIVAS PARA O LICENCIAMENTO AMBIENTAL BRASILEIRO

1 Mayne Luisa Silva Veronesi
1 Pesquisadora independente, e-mail: veronesiambiental@hotmail.com

Palavras-chave: energia eólica; impactos cumulativos; licenciamento ambiental.

Introdução

A expansão da energia eólica no Brasil tem ocorrido de forma acelerada e espacialmente concentrada, especialmente na Região Nordeste, ampliando a necessidade de avaliações ambientais capazes de captar os impactos cumulativos decorrentes da implantação simultânea ou sucessiva de múltiplos empreendimentos. Apesar da relevância do tema, a abordagem de impactos ambientais acumulados no licenciamento de parques eólicos ainda apresenta fragilidades, sendo frequentemente tratada de forma fragmentada e desvinculada da dinâmica regional do território.

No Brasil, o licenciamento ambiental é regulamentado por instrumentos normativos como as Resoluções CONAMA nº 01/1986 e nº 237/1997, que estabelecem diretrizes gerais para avaliação de impactos ambientais. No entanto, tais instrumentos não detalham procedimentos específicos para a análise de impactos cumulativos, o que contribui para lacunas na sua aplicação prática.

A literatura aponta que a avaliação restrita ao empreendimento individual tende a subestimar efeitos sobre biodiversidade, conectividade ecológica, recursos hídricos e populações locais, especialmente em regiões com alta densidade de projetos (IFC, 2013; CEQ, 1997; EPA, 1999). Nesse contexto, este estudo tem como objetivo analisar criticamente como os impactos ambientais cumulativos vêm sendo tratados no licenciamento de parques eólicos no Brasil, com foco no Nordeste, e propor um protocolo analítico para sua avaliação, incorporando dimensões ecológicas, socioeconômicas e de saúde e bem-estar, alinhado a diretrizes internacionais.

Material e Métodos

A pesquisa possui abordagem qualitativa, de caráter analítico e propositivo, fundamentada em revisão crítica da literatura científica nacional e internacional, em diretrizes técnicas aplicáveis à avaliação de impactos ambientais cumulativos e na sistematização de padrões recorrentes reportados em estudos ambientais e processos de licenciamento de parques eólicos no Nordeste brasileiro. Não se trata de análise empírica documental de Estudos de Impacto Ambiental específicos, mas de uma análise crítica das abordagens metodológicas e institucionais descritas na literatura acadêmica, em documentos técnicos e em estudos de caso amplamente divulgados.

A revisão de literatura incluiu artigos científicos, relatórios técnicos e documentos de organismos internacionais relacionados à avaliação de impactos cumulativos, à implantação de parques eólicos e aos efeitos ambientais e socioeconômicos associados.

A partir dessa análise, foi desenvolvido um Protocolo de Avaliação de Impactos Cumulativos (CIA), estruturado em etapas integradas: (i) delimitação de Componentes Ambientais de Valor (VECs), incluindo fauna, conectividade ecológica, recursos hídricos, saúde e territórios; (ii) definição do escopo espacial e temporal, considerando áreas de influência e escala regional; (iii) identificação de empreendimentos e infraestruturas associadas; (iv) avaliação integrada dos impactos cumulativos; e (v) proposição de medidas de gestão, monitoramento e governança compartilhada.

Para os componentes relacionados à saúde e ao bem-estar, foram adotados parâmetros internacionais consolidados, como as diretrizes da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2018) e da International Finance Corporation (IFC/WBG, 2015), amplamente reconhecidas em projetos de energia eólica. O protocolo proposto possui caráter analítico e orientativo, visando subsidiar o aprimoramento do licenciamento ambiental.

Referencial Teórico

A expansão da energia eólica tem sido amplamente reconhecida como estratégica para a transição energética, mas sua implantação pode gerar impactos relevantes quando analisada em escala de paisagem. Estudos apontam efeitos sobre fauna, especialmente aves e morcegos, incluindo mortalidade por colisão, alterações comportamentais e perda de habitat, além de impactos associados à fragmentação e à redução da conectividade ecológica (BENNUN *et al.,* 2021; KONCZAK, 2024; BARBOSA FILHO *et al*., 2016).

No contexto brasileiro, pesquisas evidenciam que a expansão de parques eólicos no Nordeste tem provocado transformações territoriais significativas, afetando ecossistemas frágeis e comunidades tradicionais. São relatados impactos como supressão de vegetação, alterações em recursos hídricos, conflitos fundiários e restrições de acesso a territórios de uso comum, frequentemente associados a situações de injustiça socioambiental (MEIRELES et al., 2013; PAULINO et al., 2023).

No campo da saúde, a literatura descreve efeitos relacionados ao ruído e ao fenômeno de sombra rotativa, incluindo incômodo, distúrbios do sono, estresse e percepção de perda de qualidade de vida, reforçando a necessidade de sua consideração na avaliação ambiental (WHO, 2018; IFC/WBG, 2015).

A avaliação de impactos cumulativos emerge como elemento central nesse debate. Diretrizes internacionais recomendam a análise integrada de múltiplos empreendimentos em escala regional, considerando efeitos sinérgicos e de longo prazo (CEQ, 1997; EPA, 1999; IFC, 2013). No Brasil, entretanto, a abordagem permanece predominantemente fragmentada, limitando a compreensão dos impactos associados à expansão da energia eólica.

Resultados e Discussão

A prática recorrente dos Estudos de Impacto Ambiental de parques eólicos no Nordeste brasileiro revela um padrão consistente de fragilidades na abordagem dos impactos cumulativos. Em geral, os estudos concentram-se na área de influência direta e tratam empreendimentos vizinhos de forma descritiva, sem integração metodológica ou análise em escala de paisagem.

No componente biótico, a avaliação tende a focar na mortalidade direta da fauna, com limitada consideração de impactos indiretos, como alterações comportamentais e perda de conectividade ecológica. A fragmentação de habitats, frequentemente classificada como de baixa magnitude, tende a ser subestimada quando não analisada de forma integrada com outras infraestruturas associadas, conforme apontado na literatura especializada (BARBOSA FILHO *et al*., 2016).

Quanto aos recursos hídricos, observa-se a ausência de avaliação dos efeitos cumulativos relacionados à compactação do solo, alteração da drenagem e redução da recarga hídrica, especialmente relevante em regiões semiáridas.

No componente socioeconômico, predominam análises que enfatizam benefícios econômicos, enquanto impactos relacionados a conflitos territoriais, acesso a recursos e saúde e bem-estar são pouco aprofundados, em consonância com padrões descritos na literatura sobre conflitos socioambientais associados à energia eólica (MEIRELES *et al*., 2013; PAULINO et al., 2023).

A literatura também evidencia que os impactos sobre a saúde humana, associados ao ruído e ao fenômeno de sombra rotativa, são frequentemente negligenciados nos estudos ambientais, apesar de relatos recorrentes de incômodo, distúrbios do sono e estresse em comunidades próximas a aerogeradores (WHO, 2018; IFC/WBG, 2015).

Quando comparados às diretrizes internacionais, os estudos ambientais brasileiros apresentam lacunas significativas, especialmente quanto à definição de áreas de influência regional, integração de dados, construção de cenários cumulativos e articulação entre empreendimentos (CEQ, 1997; EPA, 1999; IFC, 2013). Esse descompasso evidencia limitações estruturais do modelo de licenciamento, que permanece centrado na análise individual de projetos.

Considerações Finais

As análises realizadas indicam que, embora a expansão da energia eólica seja estratégica para a transição energética brasileira, a forma como os impactos ambientais têm sido avaliados no licenciamento ainda não incorpora de maneira satisfatória a dimensão cumulativa dos efeitos em escala regional. A literatura científica e os estudos de caso no Nordeste brasileiro demonstram que a instalação de múltiplos parques eólicos em áreas ecologicamente sensíveis e socialmente vulneráveis pode intensificar processos de fragmentação de habitats, perda de conectividade ecológica, conflitos territoriais e situações de injustiça ambiental. Entretanto, essas questões tendem a aparecer de forma fragmentada ou marginal nos Estudos de Impacto Ambiental.

O fortalecimento da avaliação de impactos cumulativos em projetos eólicos demanda a adoção de diretrizes claras pelos órgãos ambientais, a padronização de metodologias de análise em escala de paisagem, a construção de bases de dados regionais que integrem informações de diferentes empreendimentos e a ampliação da participação social qualificada nos processos de licenciamento. Além disso, é fundamental que os estudos ambientais incorporem de forma mais consistente as dimensões de saúde e bem-estar, indo além de abordagens estritamente físicas de ruído e sombra, e considerando fatores psicossociais e contextuais que influenciam a percepção e a experiência dos impactos pelas comunidades afetadas.

Conclui-se que a consolidação de uma abordagem cumulativa no licenciamento de parques eólicos é condição necessária para que a expansão dessa fonte renovável se alinhe aos princípios de proteção ambiental, justiça socioambiental e desenvolvimento sustentável, especialmente em regiões como o Nordeste brasileiro, onde a pressão sobre ecossistemas e territórios tradicionais tende a se intensificar.

Referências Bibliográficas

BARBOSA FILHO, W. P. et al. Study of environmental impacts of wind power plants aiming to support public policy in Brazil. International Journal of Environmental Science, v. 6, n. 1, p. 1-16, 2016.

BENNUN, L. et al. Mitigating biodiversity impacts associated with solar and wind energy development: Guidelines for project developers. Gland: IUCN; Cambridge: The Biodiversity Consultancy, 2021.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997. Dispõe sobre o licenciamento ambiental. Diário Oficial da União, 22 dez. 1997.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 01, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. Diário Oficial da União, 17 fev. 1986.

COUNCIL ON ENVIRONMENTAL QUALITY (CEQ). Considering cumulative effects under the National Environmental Policy Act. Washington, DC: Executive Office of the President, 1997.

IFC – INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION. Good Practice Handbook: Cumulative Impact Assessment and Management. Washington, DC, 2013.

INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION (IFC). Environmental, Health, and Safety Guidelines for Wind Energy. Washington, DC: World Bank Group, 2015.

KONCZAK, K. Environmental impact of wind farms from a biodiversity perspective: A comparative study of terrestrial and marine wind farms. Gävle: University of Gävle, 2024.

MEIRELES, A. J. A. et al. Socio-environmental impacts of wind farms on the traditional communities of the western coast of Ceará, in the Brazilian Northeast. Journal of Coastal Research, Special Issue 65, p. 81-86, 2013.

MDPI. Environmental impact of wind farms. Environments, v. 11, n. 257, 2024.

PAULINO, S. R. et al. Conflitos socioambientais e a implantação de parques eólicos no Nordeste brasileiro. Sustentabilidade em Debate, v. 14, n. 3, 2023.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Consideration of cumulative impacts in EPA review of NEPA documents. Washington, DC: EPA, 1999.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Regional Office for Europe. Environmental noise guidelines for the European Region. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2018.

MINERAÇÃO DE DADOS APLICADA À AUDITORIA DE PRAZOS E RETENÇÃO NO LICENCIAMENTO AMBIENTAL DE MINAS GERAIS: UMA ANÁLISE TEMPORAL (2025-2026)

1 Pedro Paulo Satler Cuadrado, 2 Fernanda Janes Ferreira Teixeira

[1] Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ), e-mail: pedrosatler26@gmail.com; [2] Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), e-mail: fernandajanesfteixeira@gmail.com

Palavras-chave: Licenciamento Ambiental; Ciência de Dados; Gestão Pública.

Introdução

O licenciamento ambiental consolida-se como o principal instrumento de comando e controle da Política Nacional de Meio Ambiente, visando a mitigação de impactos e a harmonização entre a expansão econômica e a sustentabilidade ecológica. No entanto, a execução deste procedimento nos entes federativos brasileiros é frequentemente associada à ineficiência burocrática, morosidade analítica e ao acúmulo de passivos institucionais que comprometem o desenvolvimento regional (FARIAS, 2020). A despeito das normativas federais, como a Resolução CONAMA nº 237/1997 — que estabelece o prazo máximo legal de até seis meses (aproximadamente 180 dias) para a manifestação do órgão ambiental competente, ressalvados os casos que exigem Estudo de Impacto Ambiental — e da Lei Complementar Federal nº 140/2011 (BRASIL, 2011), que dispõe sobre a repartição de competências administrativas no licenciamento ambiental, a realidade empírica demonstra desafios crônicos no cumprimento desse teto. No Estado de Minas Gerais, cuja matriz econômica é historicamente alicerçada em atividades de considerável impacto, como a mineração e o agronegócio, o aperfeiçoamento dos fluxos autorizativos tornou-se uma urgência legislativa. A busca por celeridade culminou na normatização de modalidades como a Licença Ambiental Simplificada (LAS), projetada para conferir dinamismo a empreendimentos de baixo potencial poluidor. Nesse cenário de transição regulatória, a auditoria pública enfrenta a complexidade de avaliar o impacto real dos novos dispositivos legais, confrontados à limitação temporal de 180 dias e ao fluxo contínuo de demandas processuais. Para superar essa lacuna metodológica, as técnicas de ciência de dados e o processamento de linguagem natural (PLN) oferecem um potencial disruptivo para a gestão pública, convertendo o acervo documental não estruturado em indicadores estatísticos operacionais. O presente estudo tem como objetivo analisar quantitativamente os tempos reais de tramitação, a volumetria de demandas e os gargalos operacionais do licenciamento ambiental em Minas Gerais, propondo um diagnóstico algorítmico inédito baseado na mineração de dados abertos.

Metodologia

A pesquisa configura-se como um estudo de caso exploratório e quantitativo, com uso intensivo de tecnologias de *Big Data Analytics*. O *corpus* documental estabelecido para a análise compreendeu o acervo integral das edições do Diário Oficial do Estado de Minas Gerais (Caderno do Executivo), compreendido na janela temporal de janeiro de 2025 a abril de 2026 (MINAS GERAIS, 2025-2026), totalizando 293 arquivos em formato PDF estruturado. O processamento computacional foi arquitetado integralmente em linguagem *Python* (VAN ROSSUM; DRAKE, 2009). A primeira fase metodológica consistiu na extração automatizada de textos via biblioteca PyMuPDF, seguida da aplicação de um motor de Expressões Regulares (*Regular expression tester - Regex*) parametrizado para identificar padrões linguísticos específicos das Unidades Regionais de Regularização Ambiental (URAs) e do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM). Para superar o desafio da não estruturação das fases processuais nas publicações, desenvolveu-se uma função de radar de contexto que analisou o texto adjacente a cada processo, classificando a movimentação como "Entrada" (requerimentos) ou "Saída" (concessões). O cálculo da métrica exata de tempo de tramitação foi viabilizado através da integração de bases de dados sob a lógica de correlação temporal, subtraindo a data de concessão formal da data de requerimento para os processos que integralizaram o ciclo autorizativo no período avaliado.

Resultados e Discussão

A modelagem do fluxo de entrada e saída de processos ambientais no Estado revelou o que se pode conceituar como um severo funil de retenção institucional. A extração aferiu que, na janela avaliada, o Governo de Minas Gerais publicou a concessão de 420 licenças finalizadas, contrapondo-se à entrada formal de 339 novos requerimentos mapeados no mesmo período. Embora o volume global de saídas seja superior ,denotando um esforço autárquico na liquidação de passivos passados , o detalhamento do cruzamento de fases atesta que das 339 novas demandas protocoladas, 231 processos permaneceram sem deliberação. Tal indicador traduz uma taxa de retenção de 68,1%, comprovando que a capacidade analítica atual não acompanha o ritmo do setor produtivo, convertendo a maior parte desses processos em passivo operacional imediato (Figura 01).

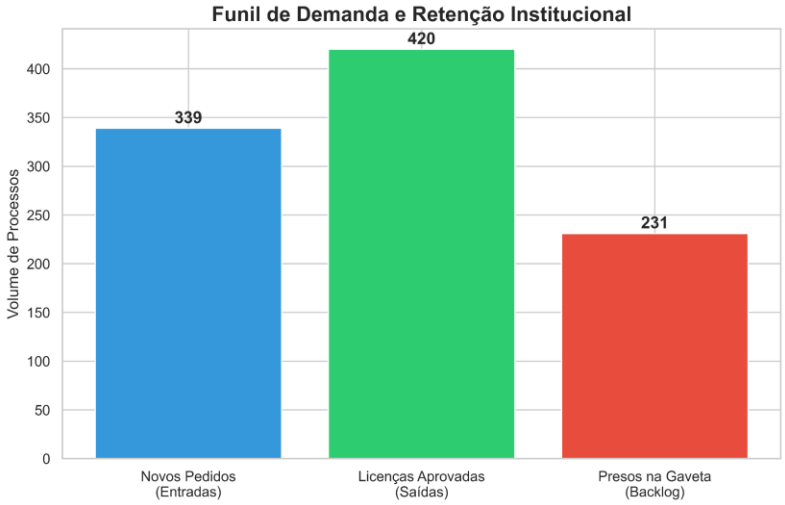


Figura 01: Funil de Demanda e Retenção Institucional do Licenciamento Ambiental de Minas Gerais.
Fonte: Autores (2026)

No que concerne a análise longitudinal e eficiência temporal, o estudo validou estatisticamente a funcionalidade das modalidades simplificadas, paralelamente à demonstração da morosidade inerente a processos complexos. A média global de tramitação para as licenças que completaram o ciclo observou a marca de 126 dias. A distribuição estatística das aprovações (Figura 02) evidencia um comportamento assimétrico com cauda alongada à direita, no qual a mediana de resolução situa-se em um intervalo significativamente mais favorável à iniciativa privada. Registrou-se a ocorrência empírica de processos chancelados em intervalos mínimos os quais variam de 0 a 1 dia útil após a publicização do protocolo, enquanto licenças de alta complexidade estenderam-se ao máximo de 381 dias na mesma amostra, o que expõe a elevada amplitude temporal e a alta variabilidade de resposta no sistema ambiental

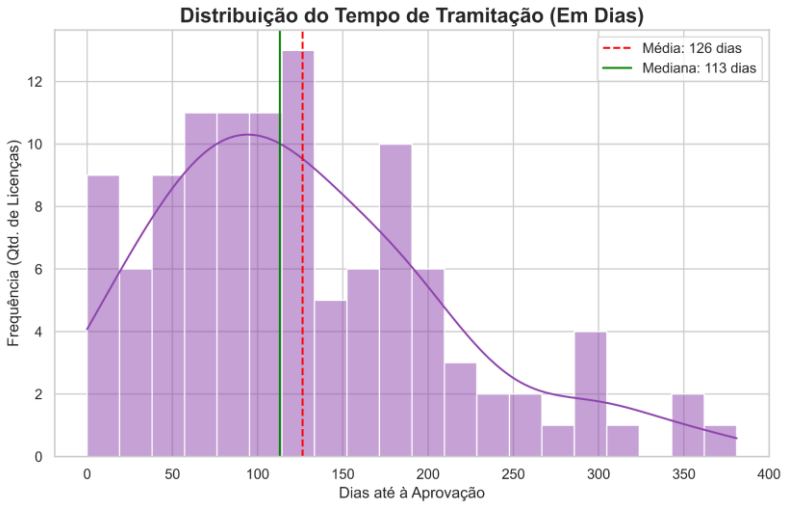


Figura 02: Distribuição Estatística do Tempo de Tramitação e densidade populacional das concessões.
Fonte: Autores (2026).

A análise do tempo de resolução por região evidencia uma clara assimetria na capacidade gerencial das diferentes autarquias do Estado. A distribuição dos dados, ilustrada pelo *boxplot* (Figura 03), indica que as Unidades Regionais do Sul e Leste de Minas Gerais apresentam os menores tempos medianos de tramitação. No entanto, o gráfico também revela a presença sistemática de valores atípicos (*outliers*) superiores a 300 dias nas regionais de maior fluxo. Adicionalmente, observa-se o caso atípico da URA Alto Paranaíba, que contabilizou apenas um processo finalizado no período analisado (N=1). Em conjunto, esses resultados reforçam o diagnóstico de profunda disparidade estrutural e operacional no sistema de licenciamento estadual.

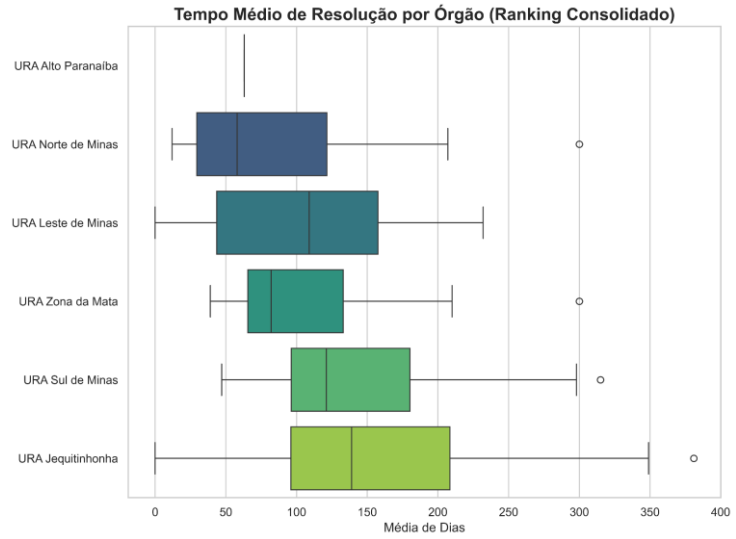


Figura 03: Tempo Médio de Resolução por Órgão Estadual e Conselhos Ambientais.
Fonte: Autores (2026)

Observando a preferência da modelagem regulatória na perspectiva das saídas efetivadas (Figura 04), confirma-se a massificação do uso das licenças ambientais simplificadas. A somatória volumétrica consolidou a modalidade LAS RAS (Relatório Ambiental Simplificado)como a principal modalidade expedida pelo órgão, sendo fundamental para viabilizar a operação de micro e médias indústrias, bem como do setor agropecuário. Em contrapartida, as concessões do modelo trifásico tradicional, como as Licenças Prévias (LP) e de Operação (LO), apresentam menor representatividade no volume total. No entanto, o cruzamento destas categorias com a base temporal do estudo demonstrou que estas modalidades exigem o maior esforço analítico-funcional do sistema, registrando um tempo médio de 231 dias — um reflexo direto da complexidade dos estudos técnicos exigidos nessas fases. Vale ressaltar que a categoria 'Decisão COPAM', embora represente o menor volume na distribuição, diz respeito a deliberações colegiadas e recursos administrativos, possuindo ritos próprios que diferem do escopo de análise técnica padronizada das demais licenças

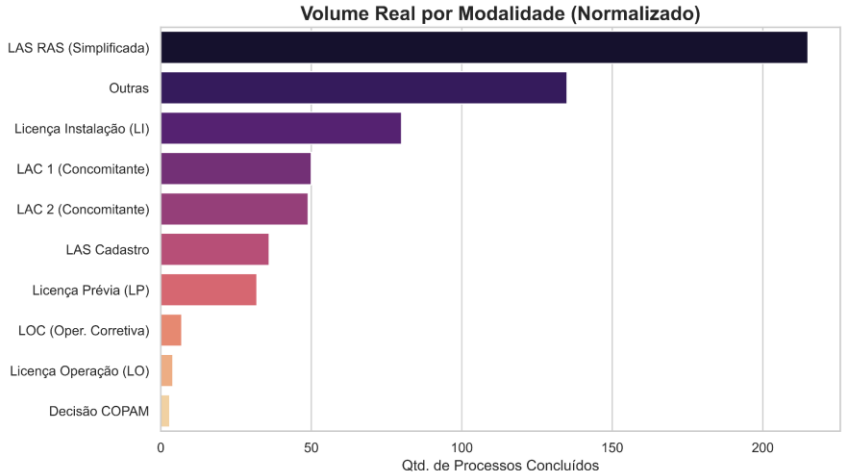


Figura 04: Volume Analítico Executado e Estratificado por Modalidade de Licença Ambiental.
Fonte: Autores (2026)

Do ponto de vista da expansão econômica territorial, a mineração de dados em Municípios licenciados atua como uma bússola de pressão antrópica e desenvolvimento (Figura 05). Municípios pujantes no segmento agropecuário e de mineração difusa, como Poços de Caldas, São Francisco do Glória e Diamantina, compuseram o decil superior do volume de autorizações expedidas. Tal métrica reforça a utilidade da ciência de dados não apenas para fins de monitoramento burocrático interno, mas como ferramenta macroeconômica de inteligência fiscal, de modo que prevê a alocação de receitas tributárias, atração de infraestrutura e potenciais rotas de degradação ambiental para fiscalização preventiva ativa por parte das polícias militares de meio ambiente.

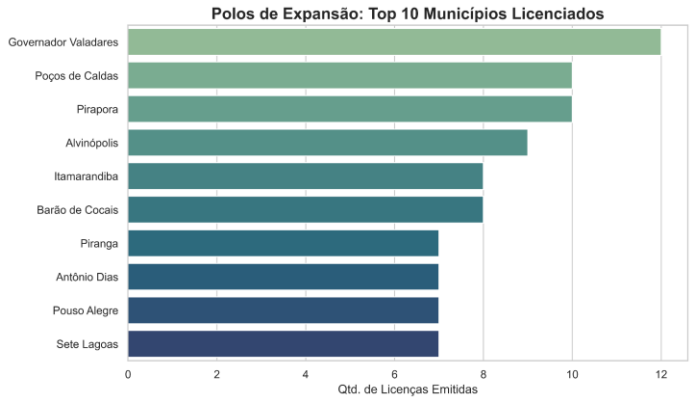


Figura 05: Polos de Expansão e Top 10 Municípios Licenciados em Minas Gerais no período.
Fonte: Autores (2026)

Considerações Finais

Este estudo quantifica a dinâmica do licenciamento ambiental em Minas Gerais, revelando que a simplificação legal cumpre seu papel ao acelerar processos de baixo risco para prazos inferiores a 180 dias. Entretanto, há um grave gargalo operacional: a taxa de retenção de 68,1% das novas requisições evidencia que a capacidade analítica do Estado não acompanha a demanda, gerando passivo institucional. A descentralização também reconfigurou o sistema, transferindo processos rotineiros aos municípios e concentrando casos complexos na esfera estadual. O uso de ciência de dados em diários oficiais provou ser estratégico para a transparência e auditoria de políticas públicas. Para o futuro, recomenda-se expandir a análise para séries históricas mais amplas, o que exigirá superar desafios técnicos na padronização de dados antigos.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011. Fixa normas para a cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios nas ações administrativas de proteção ao meio ambiente. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2011.

FARIAS, T. Licenciamento Ambiental: Doutrina e Jurisprudência. 7. ed. Rio de Janeiro: Fórum, 2020.

MCKINNEY, W. Data Structures for Statistical Computing in Python. In: Proceedings of the 9th Python in Science Conference. Austin, 2010. p. 51-56.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM). Deliberação Normativa COPAM nº 217, de 06 de dezembro de 2017. Diário Oficial do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2017.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Diário Oficial Eletrônico de Minas Gerais - Caderno do Executivo. Belo Horizonte, MG, 2025-2026.

VAN ROSSUM, G.; DRAKE, F. L. Python 3 Reference Manual. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009.

ESTUDO DA FAUNA ACOMPANHANTE NAS PESCARIAS DE *ARAPAIMA GIGAS* NO RIO CAUTÁRIO (RONDÔNIA, BRASIL)

1 Samíria Bárbara Brito Pereira, 2 Thales Quintão Chagas, 3 Amazonino Lemos de Castro, 4 Raniere Garcez Costa Sousa

[1]Universidade Federal de Rondônia, e-mail: samiriabarbarabio@gmail.com; [2]Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, e-mail: thales.quintao@icmbio.gov.br; [3]Universidade Federal do Amazonas, e-mail: alcastro@ufam.edu.br; [4]Universidade Federal de Rondônia, e-mail: ranieregarcez@unir.br

Palavras-chave: Captura incidental; pesca manejada; *Arapaima gigas*.

Introdução

O pirarucu (*Arapaima gigas*) é um dos maiores peixes de água doce do mundo e constitui recurso de alta relevância socioeconômica para populações ribeirinhas amazônicas (PEREIRA *et al.*, 2026). Em diferentes regiões, o manejo participativo tem contribuído para a recuperação de estoques e para a geração de renda comunitária (GONÇALVES; SANTOS, 2024). Entretanto, as pescarias com malhadeiras podem apresentar baixa seletividade e gerar captura incidental (*bycatch*) de organismos não alvo, incluindo espécies protegidas (SQUIRES *et al.*, 2021).

Na bacia do rio Guaporé (RO), o pirarucu ocorre também como espécie invasora, com potencial para alterar interações tróficas e dinâmicas das pescarias locais (PEREIRA *et al.*, 2026). Apesar de a captura acidental ser reconhecida como desafio para a pesca responsável (KELLEHER, 2005), ainda há lacunas sobre a fauna acompanhante associada à pesca manejada de *A. gigas* em áreas protegidas na Amazônia. Assim, este estudo analisou a composição e a frequência de captura da fauna acompanhante nas pescarias de *A. gigas* no rio Cautário (Reserva Extrativista do Rio Cautário), fornecendo subsídios para o manejo adaptativo e para medidas de mitigação.

Material e Métodos

Área de estudo e período

O estudo foi conduzido na bacia do rio Cautário, Reserva Extrativista do Rio Cautário (RO), abrangendo o canal principal e lagos marginais (Figura 1). O monitoramento ocorreu durante o período de águas baixas (agosto a outubro de 2025), acompanhando pescarias realizadas por comunitários extrativistas.

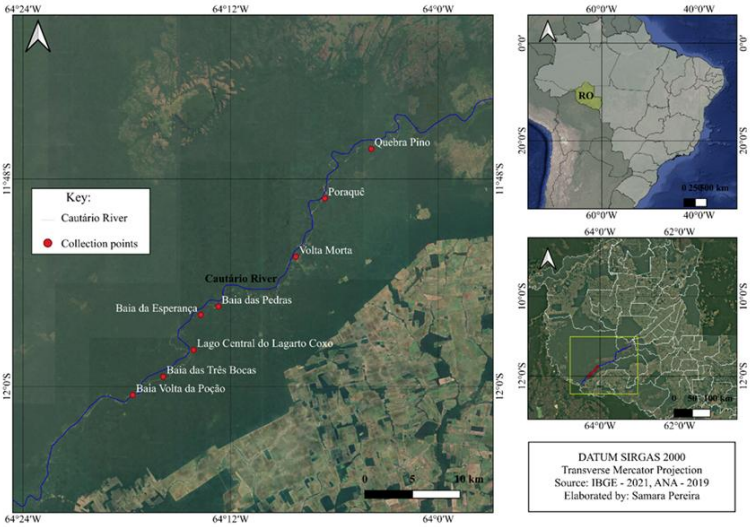


Figura 1. Localização dos locais das pescarias de *Arapaima gigas* na Reserva Extrativista do Rio Cautário, no estado de Rondônia (Brasil).

Pescarias e registros da fauna acompanhante

Os setores de pesca foram definidos previamente e as contagens de *A. gigas* seguiram Castello (2004). Utilizaram-se malhadeiras com tamanhos de malha entre 26 e 31,5 cm (distância entre nós opostos), empregadas nas modalidades de espera, cerco e condução (FERREIRA, 2022). As redes foram inspecionadas continuamente para permitir a soltura imediata de organismos (não alvos da pescaria) emalhados. Os indivíduos capturados incidentalmente foram fotografados e registrados em fichas de campo; a identificação taxonômica seguiu chaves para peixes (QUEIROZ *et al.*, 2013), quelônios (FERRARA *et al.*, 2017) e crocodilianos (MAGNUSSON *et al.*, 2010), com manuseio rápido e devolução ao ambiente sempre que possível.

Dados limnológicos e análise

Paralelamente às pescarias, foram medidos temperatura (°C), oxigênio dissolvido (mg/L), pH e condutividade elétrica (µS/cm) com sonda multiparamétrica e método colorimétrico. Os dados foram organizados em planilhas e analisados por estatística descritiva (média e desvio padrão), conforme Zar (2010).

Resultados e Discussão

Foram registrados 69 indivíduos de fauna acompanhante, pertencentes a nove espécies (sete famílias; oito ordens), com predominância de vertebrados (ictiofauna e herpetofauna) (Tabela 1). As maiores frequências relativas corresponderam a *Podocnemis unifilis* (36,23%), *Colossoma macropomum* (31,88%) e *Phractocephalus hemioliopterus* (11,59%). As demais espécies apresentaram frequências individuais entre 1,45% e 10,15% (Tabela 1).

Tabela 1. Composição taxonômica e frequências de captura da fauna acompanhante (*bycatch*) das pescarias de *Arapaima gigas* realizadas no rio Cautário, Rondônia.

Taxonomia	FA	FR
Chondrichthyes		
Myliobatiformes		
Potamotrygonidae		
Potamotrygon motoro (Müller & Henle, 1841)	3	4,35%
Actinopterygii		
Siluriformes		
Pimelodidae		
Phractocephalus hemioliopterus (Bloch & Schneider, 1801)	8	11,59%
Pseudoplatystoma tigrinum (Valenciennes, 1840)	1	1,45%
Characiformes		
Serrasalmidae		
Colossoma macropomum (Cuvier, 1818)	22	31,88%
Piaractus brachypomus (Cuvier, 1818)	1	1,45%
Perciformes		
Cichlidae		
Cichla kelberi (Kullander & Ferreira, 2006)	1	1,45%
Reptilia		
Testudines		
Podocnemididae		
Podocnemis unifilis (Troschel, 1848)	25	36,23%
Chelidae		
Chelus fimbriata (Schneider, 1783)	1	1,45%
Crocodilia		
Alligatoridae		
*Caiman crocodilus (*Linnaeus, *1758)*	7	10,15%
Total	69	100%

Nota: FA = frequência absoluta; FR = frequência relativa.

Répteis e peixes concentraram a maior parcela das capturas incidentais, evidenciando interação frequente das malhadeiras com espécies não alvo de médio e grande porte. As espécies de menor ocorrência (1,45% a 10,15%) incluíram peixes (*Potamotrygon motoro*, *Pseudoplatystoma tigrinum*, *Piaractus brachypomus* e *Cichla kelberi*) e répteis (*Chelus fimbriata* e *Caiman crocodilus*), compondo parcela minoritária do total amostrado.

Parâmetros físico-químicos da água

Os parâmetros físico-químicos da água (oxigênio dissolvido, temperatura, condutividade elétrica e pH) foram monitorados concomitantemente às atividades de pesca, fornecendo um panorama das condições limnológicas e ambientais durante o período do estudo (Tabela 2).

Tabela 2. Parâmetros físico-químicos dos ambientes onde ocorreram as pescarias de *Arapaima gigas* realizadas na Reserva Extrativista do Rio Cautário, Rondônia.

Pontos de coleta	Parâmetros			
	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Condutividade (µS/cm)	pH
Base ICMBio	7,75	29,70	33,94	8,30
Lago marginal	7,73	31,02 ± 0,01	31,63	7,60
Poção do Jacaré	7,94	27,85 ± 0,49	33,38	7,90
Volta Morta	7,80	27,55 ± 0,66	36,63	7,80
Lago do Jardi	7,62	31,00 ± 0,50	33,43	8,20

A predominância de quelônios e de peixes de médio e grande porte na fauna acompanhante indica que, mesmo sob pesca manejada, as malhadeiras podem apresentar baixa seletividade e interagir com componentes-chave da biodiversidade aquática (KELLEHER, 2005). A elevada frequência de *Podocnemis unifilis* corrobora a suscetibilidade de quelônios à captura incidental em períodos de deslocamento e uso intensivo do habitat, sobretudo em áreas com atividade pesqueira (REBÊLO; PEZZUTI, 2000), o que demanda atenção especial em unidades de conservação (ICMBIO, 2017).

Além do componente de conservação, a captura incidental pode afetar serviços ecossistêmicos e cadeias produtivas locais. Por exemplo, *Colossoma macropomum* é relevante para a pesca regional e para processos ecológicos como dispersão de sementes em florestas alagadas (HILSDORF *et al.*, 2022). A ocorrência de *Caiman crocodilus* também se relaciona a conflitos operacionais (danos às redes e predação de peixes emalhados), como descrito para outras áreas amazônicas (GUIMARÃES, 2019).

Como medidas de mitigação, recomenda-se reduzir o tempo de permanência das redes na água e aumentar a frequência de inspeção, elevando a probabilidade de devolução de organismos vivos e reduzindo a mortalidade associada ao *bycatch* (COLLINS *et al.*, 2025). O monitoramento sistemático da fauna acompanhante, aliado ao conhecimento local, é estratégico para o manejo adaptativo da pescaria e para a compatibilização entre uso sustentável e conservação em áreas protegidas na Amazônia (FAO, 2019).

Considerações Finais

A fauna acompanhante registrada na pesca manejada de *Arapaima gigas* no rio Cautário totalizou 69 indivíduos e nove espécies, com destaque para *Podocnemis unifilis* (36,23%) e para os peixes *Colossoma macropomum* (31,88%) e *Phractocephalus hemioliopterus* (11,59%). Mesmo com monitoramento das redes, os resultados indicam interação relevante com espécies não alvo, reforçando a necessidade de ações de mitigação (maior frequência de inspeção e menor tempo de permanência das redes) e de monitoramento contínuo para subsidiar o manejo adaptativo em unidade de conservação. As condições limnológicas observadas foram compatíveis com a manutenção da biota aquática no período amostrado.

Agradecimentos

Os autores agradecem às comunidades tradicionais da Reserva Extrativa do Rio Cautário pelo apoio fundamental durante as atividades de campo e pescarias experimentais. Também agradecemos à Fundação de Amparo ao Desenvolvimento das Ações Científicas e Tecnológicas e à Pesquisa do Estado de Rondônia (FAPERO) pelo seu apoio financeiro através das chamadas: PAP Cadeias produtivas: 004/2023 (Processo: 0012.000492/2023-07) e PAP-Publica:004/2025 (Processo: 0012.000162/2025-75).

Referências Bibliográficas

CASTELLO, L. A method to count Arapaima gigas: fishers, assessment, and management. North American Journal of Fisheries Management, v. 24, n. 2, p. 379–389, 2004.

COLLINS, S. M. et al. Altering gillnet soak duration and timing minimizes bycatch and maintains target catch. PLOS ONE, v. 20, n. 6, e0325725, 2025.

FERRARA, C.; FAGUNDES, C. K.; MORCATTI, T.; VOGT, R. C. Quelônios amazônicos: guia de identificação e distribuição. Manaus: WCS Brasil/INPA, 2017.

FERREIRA, J. C. Arapaima gigas de manejo: conservação, mercado e transformações técnicas na pesca ribeirinha. 2022. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). A third assessment of global marine fisheries discards. Rome: FAO, 2019. (FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, n. 633).

GONÇALVES, A. C. T.; SANTOS, L. C. R. dos. Bioeconomy in Central Amazon: participatory management of Arapaima gigas. Journal of Contemporary Administration, v. 28, n. 6, e240195, 2024.

GUIMARÃES, G. D. Avaliação do conflito entre pescadores e jacarés na Área de Proteção Ambiental Ilha do Careiro Lago do Rei – Amazônia Central Brasileira. 2019. Dissertação (Mestrado Profissional) – Escola Superior de Conservação Ambiental e Sustentabilidade, Nazaré Paulista, 2019.

HILSDORF, A. W. S. et al. The farming and husbandry of Colossoma macropomum: from Amazonian waters to sustainable production. Reviews in Aquaculture, v. 14, n. 1, p. 1–28, 2022.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBIO). Plano de Manejo da Reserva Extrativista do Rio Cautário – RO. Brasília: ICMBio, 2017.

KELLEHER, K. Discards in the world's marine fisheries: an update. Rome: FAO, 2005. (FAO Fisheries Technical Paper, n. 470).

MAGNUSSON, W. E.; LIMA, A. P.; SILVA, W. A.; ARAÚJO, M. C. Fauna da Amazônia brasileira: crocodilianos. Manaus: INPA, 2010.

PEREIRA, B. et al. Analysis of the stomach contents of Arapaima gigas in the Cautário River Basin, Rondônia, Brazil. Boletim do Instituto de Pesca, v. 52, e978, 2026.

QUEIROZ, L. J. de et al. Peixes do Rio Madeira. Brasília: ICMBio, 2013. 3 v.

REBÊLO, G.; PEZZUTI, J. Percepções sobre o consumo de quelônios na Amazônia: sustentabilidade e alternativas ao manejo atual. Ambiente & Sociedade, v. 6-7, p. 85–104, 2000.

SQUIRES, D. et al. Mitigating bycatch: novel insights to multidisciplinary approaches. Frontiers in Marine Science, v. 8, 613285, 2021.

ZAR, J. H. Biostatistical analysis. 5. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2010.

A HEGEMONIA DO DISCURSO DA SUSTENTABILIDADE: DO TRIPÉ AO "BANQUINHO DE UMA PERNA SÓ"

1 Silvio da Silva Villela, 2 Andressa Marques de Morais Bragatto, 3 Cler Rosane Coldebella Muraro, 4 Jefferson Miranda de Freitas, 5 Magali Vedovotto da Silva Scanavacca, 6 Tânia Lia Alves Carvalho Norberto, 7 Norma Barbado, 8 Samuel Ronobo Soares

1 IFPR Campus Umuarama, e-mail: silvio.villela@ifpr.edu.br; 2 IFPR Campus Umuarama, e-mail: andressammbragatto@gmail.com; 3 IFPR Campus Assis Chateaubriand, e-mail: cler.muraro@ifpr.edu.br, 4 IFPR Campus Umuarama, e-mail: jefferson.freitas@ifpr.edu.br; 5 IFPR Campus Umuarama, e-mail: magali.silva@ifpr.edu.br; 6 IFPR Campus Umuarama, e-mail: tania.carvalho@ifpr.edu.br; 7 IFPR Campus Umuarama, e-mail: norma.barbado@ifpr.edu.br; 8 IFPR Campus Umuarama, e-mail: samuel.soares@ifpr.edu.br

Palavras-chave: Hegemonia; Epistemologias do Sul; Desenvolvimento.

Introdução:

A sustentabilidade, enquanto conceito amplamente difundido nas últimas décadas, tem sido tradicionalmente compreendida a partir da perspectiva do tripé proposto por John Elkington, que articula de forma indissociável as dimensões econômica, social e ambiental (Elkington, 1997). Como recurso didático, essa concepção é frequentemente representada pela metáfora de um "banquinho de três pernas", no qual cada dimensão constitui um pilar essencial para a manutenção do equilíbrio sistêmico. Tal analogia sugere que a sustentabilidade depende da integração harmoniosa dessas três esferas, sendo inviável na ausência de qualquer uma delas.

Entretanto, ao confrontar essa representação com a realidade contemporânea, observa-se um descompasso significativo entre o discurso e a prática. O que se evidencia não é um sistema equilibrado, mas sim a prevalência de uma única dimensão dominante, a econômica, que reconfigura a sustentabilidade como um "banquinho de uma perna só". Nesse contexto, as dimensões social e ambiental deixam de operar como fundamentos estruturais e passam a assumir um papel secundário, frequentemente mobilizadas como instrumentos discursivos ou estratégias de legitimação (Barbado, 2026, comunicação pessoal; Elkington, 1997). Essa distorção revela uma apropriação seletiva do conceito, orientada por interesses que priorizam o crescimento econômico, muitas vezes em detrimento dos limites ecológicos e das demandas sociais.

A partir dessa problematização, emerge a necessidade de questionar não apenas a eficácia da metáfora, mas também os próprios fundamentos que sustentam o conceito de sustentabilidade em sua formulação dominante. Nesse sentido, torna-se pertinente indagar quem detém a legitimidade para definir o que é sustentável e quais interesses orientam essa definição no cenário global contemporâneo.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo analisar criticamente o conceito de sustentabilidade a partir da metáfora do "banquinho de três pernas", discutindo sua apropriação no discurso hegemônico e evidenciando as contradições entre sua formulação teórica e sua aplicação prática.

Material e Métodos:

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de abordagem qualitativa, de natureza teórico-reflexiva, fundamentada na análise crítica da literatura sobre sustentabilidade e desenvolvimento. A investigação parte da problematização da metáfora do "banquinho de três pernas", associada ao modelo do *triple bottom line* proposto por Elkington (1997), utilizada como eixo analítico para discutir as contradições entre o discurso e a prática da sustentabilidade.

O procedimento metodológico consistiu na seleção e análise de obras clássicas e contemporâneas que abordam a sustentabilidade sob uma perspectiva crítica, incluindo autores como Henri Acselrad (2004), Enrique Leff (2009), Arturo Escobar (1995), Carlos Walter Porto-Gonçalves (2004) e Maria Paula Meneses (2008), entre outros. A seleção dos referenciais considerou sua relevância no debate sobre racionalidade ambiental, crítica ao desenvolvimento e epistemologias do Sul.

A análise foi conduzida por meio de uma abordagem crítico-interpretativa, buscando identificar as relações de poder que permeiam a construção do conceito de sustentabilidade, bem como suas implicações no contexto das desigualdades globais. Nesse sentido, o estudo adotou como estratégia a articulação entre diferentes correntes teóricas, permitindo compreender a sustentabilidade não apenas como um conceito técnico, mas como um campo de disputas discursivas, políticas e epistemológicas.

Por se tratar de uma pesquisa de natureza teórica, não houve coleta de dados empíricos, sendo a análise baseada exclusivamente em fontes bibliográficas e na interpretação crítica dos referenciais selecionados.

Resultados e Discussão:

A análise crítica da literatura evidencia que o conceito de sustentabilidade, embora amplamente difundido como um modelo equilibrado entre as dimensões econômica, social e ambiental, apresenta, na prática, uma assimetria estrutural que compromete sua efetividade. A metáfora do "banquinho de três pernas", associada ao modelo proposto por Elkington (1997), revela-se limitada quando confrontada com a realidade contemporânea, na qual a dimensão econômica assume posição dominante, reconfigurando a sustentabilidade como um arranjo desequilibrado.

Nesse cenário, observa-se que as dimensões social e ambiental são frequentemente instrumentalizadas como elementos acessórios, mobilizados de forma estratégica para legitimar práticas orientadas pelo crescimento econômico. Essa dinâmica contribui para a construção de um discurso de sustentabilidade que, em muitos casos, opera mais como ferramenta de marketing do que como compromisso efetivo com a transformação socioambiental. Conforme apontam Acselrad (2004) e Leff (2009), a sustentabilidade, nesse contexto, passa a integrar uma racionalidade que reproduz desigualdades e desloca os conflitos ambientais para uma esfera de gestão técnica, despolitizando-os.

Além disso, os resultados indicam que a definição do que é considerado "sustentável" não decorre de um consenso neutro, mas está diretamente relacionada a relações de poder que operam em escala global. Instituições financeiras, organismos internacionais e grandes corporações exercem influência significativa na construção desse discurso, consolidando uma hegemonia que tende a privilegiar interesses do chamado Norte Global. Tal processo reforça o que Escobar (1995) denomina como imposição de um modelo único de desenvolvimento, no qual diferentes realidades são subordinadas a uma lógica universalizante.

Essa hegemonia também se manifesta no campo epistemológico, por meio da marginalização de saberes tradicionais e locais. A análise evidencia a existência de um processo de "colonização epistêmica", no qual conhecimentos não alinhados à racionalidade científica dominante são deslegitimados ou invisibilizados. Conforme argumenta Meneses (2008), essa exclusão compromete a construção de alternativas mais plurais e contextualizadas para a sustentabilidade, ao desconsiderar práticas históricas de regulação socioambiental desenvolvidas por diferentes povos.

No mesmo sentido, a crítica ao desenvolvimento como paradigma central da sustentabilidade revela que esse conceito tem sido utilizado para justificar processos de expropriação e perda de autonomia territorial. Porto-Gonçalves (2004) destaca que o desenvolvimento, ao invés de promover emancipação, frequentemente implica o "des-envolver" das relações entre sociedade e natureza, desarticulando modos de vida tradicionais. Essa perspectiva é reforçada por Escobar (1995), ao evidenciar que o desenvolvimento opera como uma construção discursiva que define o que é considerado progresso, estabelecendo padrões que nem sempre correspondem às necessidades locais.

Por fim, os resultados apontam que a associação entre sustentabilidade e desenvolvimento, consolidada a partir do relatório da *World Commission on Environment and Development* (1987), contribuiu para a construção de um consenso aparente, que tende a obscurecer conflitos estruturais. Na prática, observa-se uma divisão de responsabilidades em que países do Norte Global avançam em estratégias de ecoeficiência e inovação tecnológica, enquanto os impactos ambientais mais severos são deslocados para países do Sul Global. Essa dinâmica evidencia que a sustentabilidade, longe de ser um conceito neutro, constitui-se como um campo de disputas políticas, econômicas e epistemológicas.

Assim, ao reinterpretar a metáfora do "banquinho de três pernas" como um "banquinho de uma perna só", torna-se possível evidenciar as contradições entre o discurso hegemônico da sustentabilidade e sua materialização no mundo contemporâneo, reforçando a necessidade de abordagens mais críticas e integradoras.

Considerações Finais

O presente estudo teve como objetivo analisar criticamente o conceito de sustentabilidade a partir da metáfora do "banquinho de três pernas", evidenciando as contradições entre sua formulação teórica e sua aplicação prática no contexto contemporâneo. A análise permitiu compreender que, embora a sustentabilidade seja frequentemente apresentada como um modelo equilibrado entre as dimensões econômica, social e ambiental, sua operacionalização revela uma predominância da lógica econômica, que reconfigura esse equilíbrio de forma assimétrica.

Os resultados indicam que a sustentabilidade, em muitos casos, tem sido apropriada como um discurso estratégico, utilizado para legitimar práticas que não necessariamente promovem transformações estruturais. Nesse sentido, o conceito passa a operar como um campo de disputas, no qual diferentes atores, especialmente vinculados a interesses econômicos globais, influenciam sua definição e aplicação. Tal dinâmica reforça a necessidade de problematizar a suposta neutralidade do termo e reconhecer sua dimensão política.

Além disso, verificou-se que a hegemonia desse discurso está associada à marginalização de saberes não hegemônicos, especialmente aqueles oriundos de contextos locais e tradicionais. A exclusão dessas perspectivas limita a construção de alternativas mais plurais e integradas, comprometendo a efetividade das propostas de sustentabilidade. Assim, torna-se fundamental ampliar o diálogo entre diferentes formas de conhecimento, de modo a superar a fragmentação e a hierarquização epistemológica ainda predominantes.

Por fim, destaca-se que a sustentabilidade não pode ser compreendida apenas como um arranjo conceitual ou técnico, mas deve ser reconhecida como um processo dinâmico, atravessado por relações de poder, interesses e conflitos. Nesse sentido, a superação das limitações identificadas exige a adoção de abordagens críticas que considerem a complexidade das interações entre sociedade, economia e natureza, bem como o reconhecimento da economia como um subsistema inserido nos limites ecológicos do planeta.

Referências Bibliográficas

ACSELRAD, Henri. Desregulamentação, contradições espaciais e sustentabilidade urbana. *Revista Paranaense de Desenvolvimento*, Curitiba, n. 107, p. 25–38, jul./dez. 2004.

BARBADO, Norma. Conceitos Teóricos de Sustentabilidade: material de apoio (disciplina de mestrado). Umuarama: IFPR, 2026. (Comunicação pessoal).

BOFF, Leonardo Boff. *Sustentabilidade: o que é – o que não é*. 2. ed. Petrópolis: Vozes, 2012.

CAPRA, Fritjof Capra. *A teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos*. São Paulo: Cultrix, 2006.

ELKINGTON, John Elkington. *Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st century business*. Oxford: Capstone, 1997.

ESCOBAR, Arturo Escobar. *Encountering development: the making and unmaking of the Third World*. Princeton: Princeton University Press, 1995.

LEFF, Enrique Leff. Rumo à racionalidade ambiental. Terramérica, 2009.

LISBOA, Marijane. Em nome do desenvolvimento. In: ZHOURI, Norma; VALÊNCIO, Norma. *Formas de matar, de morrer e de resistir: limites da resolução negociada de conflitos ambientais*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. p. 51–78.

MENESES, Maria Paula Meneses. Epistemologias do Sul. *Revista Crítica de Ciências Sociais*, Coimbra, n. 80, p. 5–10, mar. 2008.

PARKER, Sally. *Sustainable meanings: sustainability as a contested discourse*. 2015. Tese (Doutorado) – University of Warwick, Coventry, 2015.

PORTO-GONÇALVES, Carlos Walter. *O desafio ambiental*. Rio de Janeiro: Record, 2004.

STOCKMANN, Nils. Now they can cope? The Green Deal and the contested meaning of sustainability in EU sectoral governance. *Frontiers in Political Science*, Comparative Governance, 2024.

World Commission on Environment and Development. *Our common future*. Oxford: Oxford University Press, 1987.

A TEORIA DO "BOLSO PROFUNDO" NA RESPONSABILIZAÇÃO AMBIENTAL: ANÁLISE DA IMPUTAÇÃO SOLIDÁRIA À CONCESSIONÁRIA DE SANEAMENTO POR DESPEJOS IRREGULARES DE ESGOTO EM REDE PLUVIAL

Autores: 1Cássio Francisco Machado Neto, 2Maria Mariana Rodrigues Costa Machado, 3Diego Paiva Colman, 4Lúcio Flávio Joichi Sunakozawa

1Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, e-mail: cassiofmachadoadv@gmail.com;
2Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, e-mail: mariamarianarodriguesc@gmail.com;
3Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, e-mail: diegopaivacolman@gmail.com;
4Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, e-mail: professor.lucioflavio@gmail.com.

Palavras-chave: Responsabilidade ambiental; Bolso profundo; Saneamento básico.

Introdução

A intensificação da crise socioecológica global tem ampliado o debate acerca da responsabilização por danos ambientais, especialmente no contexto das políticas públicas e da atuação jurisdicional. No âmbito do Direito Ambiental, observa-se a crescente aplicação da teoria do "bolso profundo" (*deep pocket theory*), segundo a qual a responsabilidade pela reparação de eventuais danos tende a ser atribuída àquele que possui maior capacidade econômica para suportar os custos de tais ações, ainda que sua participação direta na conduta lesiva seja limitada ou indireta.

No setor de saneamento básico, essa lógica tem se manifestado em demandas judiciais envolvendo o lançamento irregular de esgoto na rede de drenagem pluvial, prática que contribui significativamente para a degradação dos recursos hídricos. No Município de Paranaíba em Mato Grosso do Sul, a ocorrência reiterada desses despejos gerou denúncias de práticas de particulares que culminaram em inquérito civil, o qual motivou a propositura de Ação Civil Pública pelo Ministério Público Estadual que buscou imputar, de forma solidária, ao Município e à concessionária estadual de saneamento, a Empresa de Saneamento de Mato Grosso do Sul – SANESUL S.A., a obrigação de fiscalizar e reprimir tais condutas.

Nesse contexto, emerge a problemática acerca da legitimidade jurídica dessa imputação à concessionária, especialmente diante da repartição constitucional de competências e dos limites do poder de polícia administrativa, tradicionalmente atribuído ao ente municipal. Assim, o presente trabalho tem como objetivo analisar, à luz da teoria do "bolso profundo", a adequação da responsabilização solidária imposta à concessionária de saneamento em casos de despejos irregulares em rede pluvial.

Material e Métodos

A pesquisa adota abordagem qualitativa, de natureza exploratória e analítico-descritiva, com base no método jurídico-dogmático. O estudo fundamenta-se em pesquisa bibliográfica, documental e jurisprudencial, envolvendo a análise da legislação ambiental e de saneamento básico, especialmente as Leis nº 11.445/2007 e nº 14.026/2020, normas constitucionais relativas à repartição de competências e à proteção ambiental e doutrinadores clássicos e modernos que estudam a temática do Direito Ambiental, Direito Administrativo e Direito Constitucional.

Além disso, realiza-se a análise de documentos administrativos e contratuais relacionados à prestação dos serviços de saneamento no Município de Paranaíba/MS, incluindo contratos de concessão e parcerias público-privadas. A pesquisa também abrange o exame de decisões judiciais proferidas no âmbito da Ação Civil Pública que nesta seara é o estudo de caso que trata da imputação de responsabilidade à concessionária.

Resultados e Discussão

A análise desenvolvida evidencia que a aplicação da teoria do "bolso profundo" no âmbito do Direito Ambiental tem sido progressivamente utilizada como fundamento para a ampliação da responsabilização solidária, com o objetivo de assegurar a efetiva reparação dos danos ambientais, especialmente em contextos de difícil identificação ou responsabilização direta dos poluidores primários. Tal tendência encontra respaldo no art. 225 da Constituição Federal, que consagra o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado como bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, traz em seu 1§ as incumbências do Poder Público bem como estabelece (Lenza, 2023) e em seu §3º a responsabilidade objetiva por danos ambientais.

Entretanto, os resultados indicam que a utilização dessa lógica, quando aplicada de forma indiscriminada, pode conduzir a distorções interpretativas relevantes, sobretudo ao desconsiderar os limites legais, contratuais e institucionais que delimitam a atuação dos diversos agentes envolvidos na prestação de serviços públicos. Nesse cenário, a teoria do "bolso profundo" deixa de operar como instrumento de efetividade da tutela ambiental e passa a funcionar como critério prioritariamente econômico de imputação de responsabilidade, deslocando o foco da análise da conduta para a capacidade financeira do agente, conforme a própria lógica da responsabilidade solidária ambiental discutida por Amado (2020).

Observa-se, nesse contexto, que o crescente ajuizamento de ações civis públicas ambientais tem favorecido uma abordagem expansiva da responsabilidade solidária, na qual múltiplos atores são incluídos no polo passivo, independentemente de sua efetiva participação causal no dano. Conforme evidenciado no caso analisado, essa prática pode comprometer a adequada identificação dos verdadeiros agentes poluidores, notadamente os usuários do sistema de esgotamento sanitário que realizam ligações clandestinas na rede de drenagem pluvial, deslocando o eixo da responsabilização para entes públicos e concessionárias que, embora possuam maior capacidade econômica, não detêm necessariamente atribuição legal direta para prevenir ou reprimir tais condutas.

A inclusão recorrente de entes públicos e concessionárias no polo passivo das demandas ambientais, frequentemente promovida pelo Ministério Público no exercício de sua função institucional, revela uma estratégia processual orientada à maximização das chances de efetividade da tutela jurisdicional, especialmente na tutela de interesses difusos e coletivos (Andrade; Masson; Andrade, 2021) Todavia, os resultados sugerem que essa prática, embora pragmática, pode gerar efeitos colaterais indesejados, como a fragilização da lógica jurídico-administrativa que estrutura a repartição de competências no ordenamento brasileiro.

No caso específico analisado, a imputação à concessionária da obrigação de fiscalizar e reprimir despejos irregulares de esgoto na rede pluvial suscita relevantes questionamentos quanto à sua compatibilidade com o regime jurídico do saneamento básico e com o modelo constitucional de distribuição de competências. Isso porque o exercício do poder de polícia administrativa ambiental, especialmente no que concerne à fiscalização, autuação e sanção de condutas irregulares, constitui atribuição típica do Poder Executivo, neste caso o ente municipal, conforme apresentado por Carvalho (2022), não podendo ser automaticamente transferido à concessionária sem previsão legal ou contratual expressa, conforme demonstrado na análise normativa e doutrinária realizada.

Especificamente no estudo de caso desenvolvido, há ainda mais atores dentre os envolvidos: além do ente municipal e da concessionária de abastecimento de água e esgotamento sanitário, foi firmada uma parceria público-privada entre esta e uma empresa privada, que tem como função primordial contratual a universalização do esgotamento sanitário no estado de Mato Grosso do Sul. Assim, há um ente da administração direta, um da administração indireta e um particular envolvidos.

Nesse sentido, a transferência implícita ou judicialmente imposta de tais atribuições à concessionária pode representar uma indevida ampliação de suas obrigações, em desacordo com o equilíbrio econômico-financeiro do contrato e com os limites da delegação administrativa. Além disso, tal interpretação pode gerar incentivos perversos, na medida em que desonera o ente público de suas competências originárias, ao mesmo tempo em que sobrecarrega o prestador do serviço com funções típicas de autoridade pública, o que em regra não seria admitido, como explica Carvalho (2022) sobre os atos de autoridade estatal.

Pensando-se além, eventuais custos com a imposição de tal obrigação à concessionária seriam repassados aos próprios usuários, visto que se está tendo mais gastos, o reflexo disso será no valor cobrado nas faturas emitidas aos consumidores, pois a receita da empresa é primordialmente de sua arrecadação pelos serviços prestados.

Ademais, o ente municipal também possui grande capacidade financeira e competência constitucional para atuar na fiscalização ambiental, inclusive no que se refere ao controle da poluição, conforme destacado por Masson (2021). Porém, talvez pelo procedimento mais complicado e demorado para liberação de recursos financeiros pela administração direta, a estratégia adotada está sendo imputar a responsabilidade e obrigações que possuem prazos para cumprimento sob pena de multa à concessionária, com a falsa percepção de liberação mais rápida de recursos, desconsiderando o ordenamento jurídico, legislação e contratos firmados.

A partir dessa perspectiva, a utilização da teoria do "bolso profundo" como critério predominante para a imputação de responsabilidade revela-se problemática, pois privilegia a capacidade econômica do agente em detrimento da análise de sua atribuição legal, de sua conduta e do nexo causal com o dano ambiental. Tal preocupação é reforçada pela natureza indivisível do dano ambiental e pela complexidade da responsabilização, conforme destacado por Mirra (2008). Essa lógica pode comprometer a segurança jurídica, ao introduzir um grau elevado de imprevisibilidade nas decisões judiciais, além de desestimular a adequada delimitação das responsabilidades entre os entes envolvidos na prestação dos serviços públicos.

Por outro lado, não se ignora que a complexidade dos danos ambientais e a natureza difusa dos bens jurídicos tutelados justificam, em certa medida, a adoção de mecanismos ampliativos de responsabilização, como forma de garantir a efetividade da reparação (Amado, 2020). Contudo, os resultados apontam para a necessidade de compatibilizar essa ampliação com os princípios da legalidade, da repartição de competências e da eficiência administrativa, sob pena de comprometer a própria efetividade das políticas públicas de saneamento e proteção ambiental.

Diante disso, evidencia-se a necessidade de construção de critérios mais precisos para a imputação de responsabilidades em matéria ambiental, especialmente em contextos que envolvem contratos administrativos e múltiplos agentes institucionais. Tais critérios devem considerar não apenas a capacidade econômica dos envolvidos, mas, sobretudo, suas atribuições legais, contratuais e sua efetiva contribuição para a ocorrência do dano, de modo a promover uma responsabilização mais justa, eficiente e juridicamente consistente.

Considerações Finais

Conclui-se que, embora a teoria do "bolso profundo" desempenhe papel relevante na efetivação da tutela ambiental, sua aplicação deve ser compatibilizada com os princípios da legalidade, da segurança jurídica e da adequada repartição de competências. A responsabilização solidária, nesse contexto, não pode ser fundamentada exclusivamente na capacidade econômica do agente, devendo observar os limites jurídicos e institucionais de sua atuação.

O estudo contribui para o debate acerca da responsabilização ambiental no setor de saneamento básico, destacando a necessidade de maior precisão na definição das atribuições dos entes públicos e das concessionárias. Ademais, aponta para a importância do aprimoramento das políticas públicas e dos instrumentos jurídicos voltados à prevenção de danos ambientais, especialmente no que se refere ao controle de despejos irregulares em redes pluviais.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua).

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. Agradecemos ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – ProfÁgua da UEMS e pelo Programa de Pós-graduação em Direito da UFMS pelo apoio técnico-científico aportado até o momento.

Referências Bibliográficas

AMADO, Frederico. *Direito ambiental esquematizado*. 10. ed. São Paulo: Método, 2020.

ANDRADE, Adriano; MASSON, Cleber; ANDRADE, Landolfo. *Interesses difusos e coletivos*. 11. ed. Rio de Janeiro: Forense; Método, 2021. v. 1.

ANDRADE, Adriano; MASSON, Cleber; ANDRADE, Landolfo; LINO, Gabriel; RIBEIRO, Lauro; MACHADO, Rafael. *Interesses difusos e coletivos*. 11. ed. Rio de Janeiro: Forense; Método, 2021. v. 2.

BRASIL. Constituição (1988). *Constituição da República Federativa do Brasil de 1988*. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.

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 7.347, de 24 de julho de 1985. Disciplina a ação civil pública de responsabilidade por danos causados ao meio ambiente. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, 25 jul. 1985.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, 8 jan. 2007.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, 16 jul. 2020.

BRASIL. Lei nº 5.172, de 25 de outubro de 1966. *Código Tributário Nacional*. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 27 out. 1966.

CARVALHO, Matheus. *Manual de direito administrativo*. 10. ed. Salvador: JusPodivm, 2022.

LENZA, Pedro. *Direito constitucional esquematizado*. 27. ed. São Paulo: Saraiva Educação, 2023.

MASSON, Nathalia. *Manual de direito constitucional*. 9. ed. Salvador: JusPodivm, 2021.

MIRRA, Álvaro Luiz Valery. *Responsabilidade civil por dano ambiental*. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2008.

CADEIA MADEIREIRA AMAZÔNICA E GOVERNANÇA AMBIENTAL: IMPACTOS DA EUDR E O PAPEL DAS CERTIFICAÇÕES FLORESTAIS

1Isadora Miranda Ranieri, 2Raissa Abreu de Almeida, 3Eder Silva de Oliveira
1 UEPA – Universidade do Estado do Pará,, e-mail: isadora.mranieri@aluno.uepa.br; 2 UEPA – Universidade do Estado do Pará,, abreuraissa323@gmail.com; 3 UEPA – Universidade do Estado do Pará, ederso@uepa.br

Palavras-chave: Manejo florestal; Rastreabilidade; Comércio internacional;

Introdução

A exploração de madeira na Amazônia brasileira possui elevada relevância econômica e ambiental, sendo o estado do Pará um dos principais polos da produção madeireira nacional. Historicamente, há mais de três séculos, a atividade esteve associada à expansão da fronteira agrícola e a processos de desmatamento. A partir da década de 90 Foram consideradas a criação de instrumentos legais voltados ao controle e à sustentabilidade da exploração florestal. (LENTINI; ANDRADE, 2024. VALDIONES; 2022).

Tendo em vista que o Pará é o estado brasileiro que mais exporta madeira tropical, nas últimas décadas, a crescente inserção do setor madeireiro amazônico no mercado internacional intensificou a pressão por cadeias produtivas mais sustentáveis e a adoção de regulamentações ambientais mais rigorosas, especialmente por parte da União Europeia. Portanto, destaca-se o Regulamento (UE) nº 995/2010, Regulamento da Madeira da União Europeia (EUTR), voltado à proibição da comercialização de madeira ilegal. Posteriormente, com a implementação do Regulamento (UE) 2023/1115 conhecido como Regulamento sobre produtos livres de desflorestamento (EUDR). Essa regulamentação amplia o escopo da governança ambiental ao ir além da legalidade formal, incorporando critérios ambientais e sociais mais abrangentes (UNIÃO EUROPEIA, 2010; UNIÃO EUROPEIA, 2023; IMAFLORA; 2025. OLIVEIRA et al., 2024).

Paralelamente, certificações florestais como o Forest Stewardship Council (FSC) e o Programme for the Endorsement of Forest Certification (PEFC) têm se consolidado como instrumentos voluntários relevantes, contribuindo para a adoção de boas práticas de manejo e para a inserção competitiva dos produtos no mercado internacional (FSC, 2023; PEFC BRASIL, 2026). Além disso, regulamentações complementares, como a Convenção sobre o Comércio Internacional das Espécies da Flora e Fauna Selvagens em Perigo de Extinção (CITES), reforçam o controle sobre espécies florestais de maior valor comercial, evidenciando a crescente complexidade da governança ambiental no setor.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo analisar a cadeia produtiva da madeira na Amazônia, com ênfase no estado do Pará, relacionando sua inserção no mercado internacional às exigências da EUDR, e ao papel das certificações florestais na adaptação do setor às novas demandas globais.

Material e Métodos

A pesquisa possui abordagem qualitativa, de caráter exploratório, sendo desenvolvida por meio de revisão bibliográfica e análise documental. Foram analisados artigos científicos, relatórios técnicos e dados setoriais sobre a cadeia produtiva da madeira na Amazônia e estudos sobre o setor madeireiro amazônico. Também foram examinadas as principais regulamentações aplicáveis ao setor florestal, especialmente as normativas da União Europeia aplicáveis, com destaque para a EUDR. , com o objetivo de compreender seus impactos sobre o mercado internacional e a cadeia produtiva brasileira A análise foi conduzida de forma interpretativa e consistiu na integração entre dados de produção, exportação e regulamentação, buscando compreender as relações entre o mercado internacional, a legislação ambiental e os mecanismos de certificação.

Resultados e Discussão

Os dados analisados evidenciam que o estado do Pará desempenha papel central na cadeia produtiva da madeira tropical, concentrando uma parcela relevante da produção nacional e apresentando forte inserção no mercado internacional (IMAFLORA, 2025). O Anuário Timberflow indica que grande parte da madeira amazônica tem como destino o mercado interno, especialmente o estado de São Paulo, mas as exportações possuem elevada relevância estratégica, sendo direcionadas principalmente para Estados Unidos, União Europeia e países asiáticos (IMAFLORA, 2025; LENTINI; ANDRADE, 2024).

Essa inserção internacional expõe o setor madeireiro às exigências ambientais globais, especialmente aquelas relacionadas à rastreabilidade e à comprovação da origem legal dos produtos. O comércio internacional de commodities florestais está diretamente associado às dinâmicas de desmatamento, o que tem motivado a criação de regulamentações mais rigorosas por parte dos países importadores (OLIVEIRA et al., 2024). Então, observa-se que o acesso ao mercado internacional tende a se tornar cada vez mais condicionado ao cumprimento de critérios ambientais rigorosos. Dessa forma produtos com origem comprovadamente legal e sustentável passam a apresentar maior competitividade, enquanto aqueles associados a riscos ambientais podem ser excluídos de determinados mercados.

Nesse contexto, a União Europeia havia estabelecido mecanismos para combater a exploração madeireira ilegal por meio do Regulamento (UE) nº 995/2010 (EUTR). Esse regulamento teve como principal objetivo impedir a comercialização madeira extraída ilegalmente e impor aos operadores a obrigação de adotar sistemas de diligência devida, tonando o mercado

europeu mais rígido. Tais sistemas baseiam-se em três pilares: acesso à informação sobre a origem da madeira, avaliação do risco de ilegalidade e adoção de medidas para mitigação desse risco. Além disso, o regulamento estabelece requisitos de rastreabilidade ao longo da cadeia de abastecimento, exigindo que comerciantes mantenham registros de fornecedores e compradores, de modo a garantir maior controle (UNIÃO EUROPEIA, 2010). Apesar de sua relevância, o EUTR apresenta limitações, uma vez que se concentra na legalidade da madeira, sem incorporar critérios explícitos relacionados ao desmatamento ou à degradação florestal, lacuna posteriormente abordada pela EUDR.

Logo, a EUDR representa uma evolução significativa em relação ao EUTR, ao ampliar expressivamente o nível de exigência regulatória aplicado às cadeias produtivas. A EUDR revoga o Regulamento (UE) nº 995/2010 (EUTR), substituindo-o por um sistema mais abrangente, que integra critérios relacionados à sustentabilidade, exigindo a comprovação de que os produtos não estejam associados ao desmatamento ou à degradação florestal após uma data de corte estabelecida, 31 de dezembro de 2020. Além disso, o novo regulamento impõe a obrigatoriedade de geolocalização das áreas de produção, permitindo maior precisão na verificação da origem dos produtos e fortalecendo os mecanismos de rastreabilidade ao longo da cadeia. Dessa forma, a EUDR não apenas reforça os instrumentos de controle já existentes, como também amplia o escopo da governança ambiental, ao integrar critérios de legalidade, sustentabilidade e comprovação de todo o processo produtivo em um único sistema regulatório. (UNIÃO EUROPEIA, 2023; OLIVEIRA et al., 2024).

Visto isso, a implementação da EUDR implica mudanças operacionais relevantes para os exportadores, que passam a ter maior responsabilidade sobre a verificação da conformidade ambiental dos produtos. Isso inclui a necessidade de coleta de dados georreferenciados, análise de risco das áreas de produção e manutenção de registros detalhados ao longo da cadeia produtiva. Para países como o Brasil, essas exigências representam tanto um desafio quanto uma oportunidade, uma vez que podem impulsionar melhorias nos sistemas de controle, mas também criar barreiras para produtores que não consigam atender aos novos requisitos (OLIVEIRA et al., 2024).

Ademais, é válido ressaltar que, apesar da elevada biodiversidade da Amazônia, a exploração madeireira regional apresenta forte concentração em um número reduzido de espécies. Estima-se que apenas cerca de 20 espécies sejam amplamente utilizadas pela indústria, sendo que, em 2024, aproximadamente um quarto (1/4) do volume de madeira em tora transacionado na Amazônia Legal concentrou-se em apenas quatro espécies: *Manilkara huberi* (maçaranduba), *Dinizia excelsa* (angelim-vermelho), *Goupia glabra* (cupiúba) e *Dipteryx odorata* (cumaru). Esse padrão evidencia uma pressão seletiva do mercado sobre determinadas espécies, configurando um importante indicador de risco em cadeias de suprimento responsáveis. (IMAFLORA;2025. LENTINI; ANDRADE, 2024)

Nesse contexto, a inserção de espécies madeireiras amazônicas na Convenção sobre o Comércio Internacional das Espécies da Flora e Fauna Selvagens em Perigo de Extinção (CITES) reforça a necessidade de controle do comércio internacional, de forma a garantir que a exploração não comprometa a sobrevivência das espécies. A inclusão, em 2022, dos gêneros *Handroanthus* (ipê), *Dipteryx* (cumaru) e *Cedrela* (cedro) no Anexo II da CITES implica que sua exportação passa a depender da emissão de licenças condicionadas à comprovação de legalidade e à elaboração do Parecer de Extração Não Prejudicial (Non-Detriment Finding – NDF), que avalia se a exploração é sustentável. No Brasil, desde 2024, a exportação dessas espécies exige, obrigatoriamente, licença CITES ou certificado pré-convenção, comprovação da cadeia de custódia e rastreabilidade da madeira. Dessa forma, verifica-se o risco de restrição ou contingenciamento da exploração e do comércio dessas espécies no mercado internacional. (IBAMA, 2024)

Entretanto, a efetividade dessas exigências enfrenta desafios estruturais no Brasil, incluindo fragilidades nos sistemas de controle, ocorrência de fraudes documentais e limitações na rastreabilidade da cadeia produtiva (LENTINI; ANDRADE, 2024). Essas limitações estão relacionadas à própria dinâmica da cadeia madeireira, que envolve diferentes etapas e atores, dificultando o monitoramento contínuo da origem da madeira. Além disso, a predominância de pequenos e médios produtores, que frequentemente possuem menor capacidade técnica e financeira, dificulta a adaptação às exigências internacionais, especialmente aquelas relacionadas à rastreabilidade e ao controle da produção (LENTINI; ANDRADE, 2024). Dessa forma, embora as regulamentações internacionais representem avanços importantes, sua efetividade depende do fortalecimento dos sistemas de controle e da melhoria das condições técnicas e financeiras para que os produtores possam se adequar às exigências.

Diante desse cenário, as certificações florestais emergem como instrumentos estratégicos, ao promoverem padrões mais elevados de manejo sustentável e atuarem na cadeia de custódia, garantindo a rastreabilidade dos produtos desde a origem até o consumidor final, por meio de auditorias independentes (FSC, 2023; PEFC BRASIL, 2026). Além de contribuírem para a conservação ambiental, as certificações também representam um diferencial competitivo, ao facilitarem o acesso a mercados mais exigentes e agregarem valor aos produtos florestais (OLIVEIRA et al., 2024).

No caso do Forest Stewardship Council (FSC), os princípios e critérios estabelecidos abrangem aspectos ambientais, sociais e econômicos, incluindo a conservação da biodiversidade, o respeito aos direitos das populações locais e a viabilidade econômica da atividade (FSC, 2023). Já o Programme for the Endorsement of Forest Certification (PEFC) opera por meio do reconhecimento de esquemas nacionais de certificação, ampliando sua aplicabilidade em diferentes contextos produtivos (PEFC BRASIL, 2026). Dessa forma, as certificações consolidam-se como ferramentas essenciais para a adaptação do setor madeireiro às novas exigências do mercado internacional. Apesar de sua relevância, a certificação ainda apresenta limitações, como custos elevados e barreiras técnicas que dificultam sua adoção por pequenos produtores, o que pode gerar desigualdades no acesso aos mercados internacionais (RANA; SILLS, 2023)

Assim, observa-se que o mercado internacional desempenha papel fundamental na indução de mudanças na governança ambiental da cadeia produtiva, pressionando pela adoção de práticas mais sustentáveis e pela melhoria dos sistemas de controle

e monitoramento. Atualmente, as novas legislações, ou novas atualizações, entram em vigor de forma mais rigorosa e com exigências mais rígidas quanto aos aspectos da sustentabilidade.

Considerações Finais

Conclui-se que a cadeia produtiva da madeira na Amazônia, especialmente no estado do Pará, apresenta elevada importância econômica e forte inserção no mercado internacional, o que a torna altamente sensível às exigências ambientais globais. A evolução regulatória observada, desde o EUTR até a implementação da EUDR, evidencia o aumento do rigor nas exigências impostas ao setor.

A EUDR se destaca como um instrumento regulatório de grande impacto, ao estabelecer critérios que influenciam diretamente as práticas produtivas e comerciais. De forma complementar, mecanismos como a CITES e as certificações florestais, como FSC e PEFC, desempenham papel essencial na regulação do comércio internacional e na promoção de cadeias produtivas mais responsáveis. Apesar de sua relevância, a certificação ainda apresenta limitações, como custos elevados e barreiras técnicas que dificultam sua adoção por pequenos produtores, o que pode gerar desigualdades no acesso aos mercados internacionais (RANA; SILLS, 2023)

Assim, verifica-se que a governança ambiental da cadeia madeireira amazônica está em processo de transformação, impulsionada por pressões externas e pela crescente valorização de práticas sustentáveis. No entanto, a efetividade dessas estratégias depende do fortalecimento da governança, da ampliação dos sistemas de monitoramento e da inclusão de pequenos produtores no processo de transição. Dessa forma, torna-se fundamental a articulação entre instrumentos regulatórios, mecanismos de certificação e políticas públicas, consolidando um modelo de produção mais rastreável e alinhado às exigências globais, intensificando a competitividade do setor brasileiro no cenário internacional.

Referências Bibliográficas

FOREST STEWARDSHIP COUNCIL (FSC). Princípios e critérios do FSC. Bonn: FSC, 2023. Disponível em: https://br.fsc.org. Acesso em: 21 abr. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). Nota técnica nº 14/2024/CGFLO/DBFLO: elaboração do parecer de extração não prejudicial (Non-Detriment Finding – NDF) dos gêneros Cedrela spp., Handroanthus spp., Tabebuia spp. e Dipteryx spp. Brasília, 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). Nota informativa nº 20615406/2024: esclarecimentos sobre a implementação da entrada do ipê e cumaru na CITES nos processos autorizativos de exportação. Brasília, 2024.

INSTITUTO DE MANEJO E CERTIFICAÇÃO FLORESTAL E AGRÍCOLA (IMAFLORA). *Anuário Timberflow: diagnóstico da madeira nativa na Amazônia Legal*. Piracicaba: Imaflora, 2025.

LENTINI, Marco W.; ANDRADE, Maryane B. T. O manejo de florestas naturais e o setor madeireiro da Amazônia brasileira: situação atual e perspectivas. Belém: Instituto Floresta Tropical (IFT); IMAFLORA, 2024. Disponível em:https://amazonia2030.org.br. Acesso em: 19 abr. 2026.

OLIVEIRA, S. E. M. C. et al. The European Union's deforestation-free supply chains regulation: Implications for Brazil. *Ecological Economics*, v. 217, 2024.

PEFC BRASIL. *Programa Brasileiro de Certificação Florestal*. Brasília: PEFC Brasil, 2026. Disponível em: https://pefcbrasil.org. Acesso em: 21 abr. 2026.

RANA, P.; SILLS, E. Certification and forest governance. *Annual Review of Resource Economics*, v. 15, p. 1–20, 2023.

UNIÃO EUROPEIA. Regulamento (UE) nº 995/2010 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 20 de outubro de 2010. Estabelece as obrigações dos operadores que colocam madeira e produtos da madeira no mercado. Jornal Oficial da União Europeia, L 295, 12 nov. 2010.

UNIÃO EUROPEIA. Regulamento (UE) 2023/1115 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 31 de maio de 2023. Jornal Oficial da União Europeia, 2023.

VALDIONES, A. P. et al. A evolução do setor madeireiro na Amazônia entre 1980 e 2020. Belém: Imazon; Imaflora; ICV; IDESAM, 2022.

SOIL ECOSYSTEM SERVICES VALUATION AND IMPLICATIONS FOR ENVIRONMENTAL POLICYMAKING: A GLOBAL SYSTEMATIC REVIEW

1 Daiane de Oliveira Teixeira, 2 Beatriz de Castro, 3 Rhainer Guillermo Nascimento Ferreira, 4 Carla Diniz, 5 Afonso Pelli

1 Universidade Federal do Triângulo Mineiro, e-mail: d202320386@uftm.edu.br; 2 Universidade Federal do Triângulo Mineiro, e-mail: beatriz1703castro@gmail.com; 3 Universidade Federal do Triângulo Mineiro, e-mail: Rhainer.ferreira@uftm.edu.br; 4 Universidade Federal do Triângulo Mineiro, e-mail:carla.santos@uftm.edu.br, 5 Universidade Federal do Triângulo Mineiro, e-mail:afonsopelli@gmail.com

Keywords: climate change; environmental valuation; carbon sequestration

Introduction

Soil ecosystem services (SES) play a fundamental role in sustaining life and human well-being, providing multiple essential benefits such as climate regulation, the hydrological cycle, food production, and biodiversity conservation (Medina-Roldán *et al*., 2024; Zhao *et al*., 2022; Costanza *et al*., 1997; MEA, 2005). Although research on ecosystem services has advanced considerably, most studies have either overlooked soil entirely or addressed it in a vague and generalized manner (Adhikari e Hartemink, 2016; Liu *et al*., 2010; Dominati *et al*., 2014). One of the greatest challenges for sustainable management is the lack of conceptual consensus, as the term SES is frequently conflated with soil biophysical functions and processes (Rodrigues *et al*., 2021; Dominati et al., 2014).

A clear understanding of how SES are defined, assessed, and valued is essential for sound public policy formulation, given that soil is a critical determinant of a nation's economic standing (Daily et al., 1997). This terminological imprecision hinders the clear delineation of SES. Semantically, the term "service" refers to the fulfillment of human needs, whereas "function" denotes a role within a system, and "process" refers to the interactions among its constituent elements (Cambridge, 2020; Oxford, 2019). Within this framework, we define SES as the beneficial flows derived from soil natural capital stocks that directly benefit society.

Against this backdrop, we conducted a systematic literature review to assess the state of the art in SES research, with the aim of providing an in-depth analysis of their classification and valuation. We identify prevailing trends in the field to guide future research from a critical perspective. Specifically, we examine: (i) how the concept of SES has been approached in the literature; (ii) the parameters used for assessment and valuation; (iii) temporal trends, the global distribution of publications, and keyword co-occurrence; and (iv) prospects for the development of public policies for soil valuation.

Methods

We conducted a systematic literature review (SLR) following the guidelines of the PRISMA 2020 framework (Page et al., 2021). The search was carried out using the Web of Science and Scopus databases, covering publications from January 1, 2021 to May 31, 2025. The following descriptor combination was used: ("soil ecosyst* service*" AND ("carbon* credit*" OR "carbon* sequestration*")). Wildcards were applied to capture all morphological variants of a root term — for instance, "ecosyst*" retrieves "ecosystem," "ecosystemic," and related forms. The first inclusion criterion restricted results to original research articles, excluding reviews, books, book chapters, non-peer-reviewed content, and articles not written in English, prior to the screening phase. The database searches retrieved 28 records from Web of Science and 495 from Scopus, yielding a combined total of 523 records. After removing 24 duplicates, 499 articles remained for screening.

Screening was conducted in two stages: (i) eligibility assessment based on titles, keywords, and abstracts; and (ii) eligibility assessment based on full-text reading. In the first stage, 471 records were excluded for failing to meet the inclusion criteria, primarily due to (a) thematic mismatch with respect to soil ecosystem services as reflected in the title, keywords, or abstract. In the second stage, the remaining 28 records were assessed for full-text eligibility, resulting in the exclusion of 8 articles. The main grounds for exclusion were: (i) thematic inconsistency, where the content did not address our research objectives; and (ii) insufficient methodological rigor and lack of data transparency. A final set of 20 articles was included in the data synthesis.

Two complementary classification approaches were employed to analyze the selected studies. The first focused on the structure of ecosystem services and considered: (i) the conceptual framework adopted by the authors; (ii) the soil ecosystem services identified; (iii) whether they were valued; (iv) the type of valuation applied; (v) whether they were quantified; and (vi) the type of quantification used (biophysical, economic, or sociocultural). The second approach drew on bibliometric analysis performed using the Bibliometrix software package, and examined: (i) the country and year in which each study was conducted; and (ii) keywords, co-occurrence networks, and thematic maps.

All 20 selected articles were subjected to this analysis with the overarching aim of identifying global patterns and providing a scientific basis to inform the development of future public policies for soil valuation.

Results and Discussion

Conceptual Approaches and Identified Soil Ecosystem Services

Of the 20 articles evaluated, only 35% (n=7) presented a conceptually clear definition. The remaining studies comprised 20% (n=4) with a confused conceptual definition, in which SES are used interchangeably with soil processes, properties, or functions; 25% (n=5) that conflate SES, functions, processes, and properties without clear distinction; and 20% (n=4) that provide no definition whatsoever and fail to link the SES concept to any specific category (Figure 2). Since its emergence, the ecosystem services (ES) concept has struggled to achieve a precise and universally accepted definition (Rodrigues *et al*., 2021; Costanza *et al*., 1997), underscoring the urgent need for the adoption of a clear and universal SES definition.

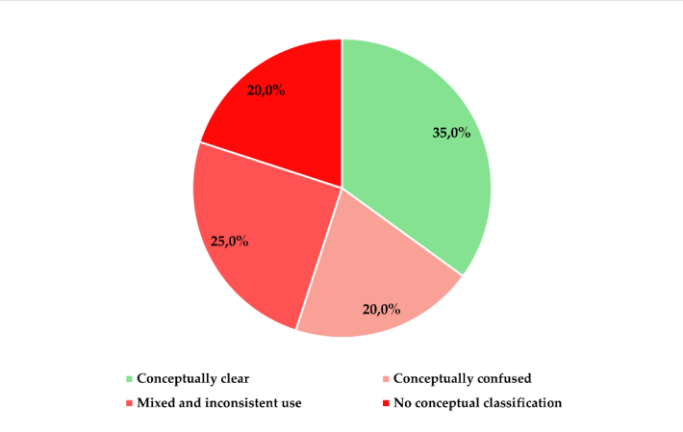


Figure 01: Classification of selected studies according to clarity and consistency in the conceptual definition of SES. Source: The authors (2025)

The most frequently addressed ecosystem service was carbon sequestration (n=15), followed by carbon storage (n=3), food provision (n=3), microclimate regulation (n=2), water purification (n=2), and water supply (n=2). The predominance of carbon-related services reflects global climate agendas — such as the Kyoto Protocol — aimed at mitigating climate change through the conservation and restoration of terrestrial ecosystems. It is also tied to land restoration efforts, as carbon influences a wide range of soil properties, including physical, chemical, hydrological, and biological attributes, making it an excellent indicator for assessing soil health (Cerqueira *et al*., 2023; Ellili-Bargaoui *et al*., 2021).

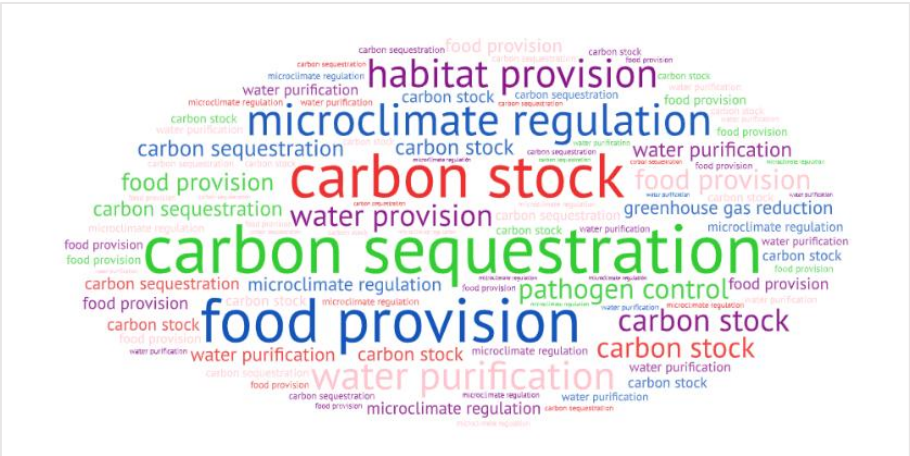


Figure 02: Word cloud of the most frequent keywords across the 20 articles selected for analysis. Source: The authors (2025)

Bibliometric Analysis: Geographic distribution, publication trends, keyword cloud, co-occurrence, and thematic map

Of the 20 studies evaluated, China recorded the highest number of case studies (n=6), followed by Italy, Singapore, and the United States (n=2 each). France, Norway, Mexico, Romania, Brazil, South Korea, Colombia, and Finland each contributed a single case study (n=1), and one study provided no geographic information.

When grouped by region, Asia accounted for the largest share of studies (n=9), with China standing out as the most represented individual country, followed by Europe (n=6), North America (n=3), and South America (n=2). Notably, no studies were identified from African countries.

The predominance of Asian research, particularly from China, can be attributed to a combination of factors. Asian countries have faced intense land-use pressures driven by rapid population growth, accelerated urbanization, and agricultural intensification, all of which have fueled scientific interest in sustainable soil management practices. Furthermore, governments in the region have made substantial investments in environmental policies, ecosystem restoration programs, and soil carbon sequestration initiatives, thereby stimulating research aimed at quantifying and valuing ecosystem services (Zhao *et al*., 2022; Ouyang *et al*., 2016).

Conversely, regions such as Africa and parts of South America may be underrepresented in the international literature due to lower research investment, limited access to funding, and linguistic or institutional barriers that hinder publication in globally indexed databases (Pototsky; Cresswell, 2020).

The most frequently used keywords across the 20 analyzed studies were "ecosystem services" and "carbon sequestration," highlighting the central role of carbon sequestration research within the soil ecosystem services field, particularly in climate change mitigation initiatives and public policy. The keyword co-occurrence network shows that the subject is closely tied to global climate agendas, in which carbon tends to be treated as the primary indicator of soil health and environmental value.

Furthermore, the thematic map further reveals that carbon sequestration addressed in 75% of the articles functions as a well-established, driving theme. At the same time, the interconnection of terms points to the need to bring other essential services into the conversation, such as water regulation and food provision, if soil multifunctionality is to be fully reflected in public policy. Taken together, these findings show that while the literature is making progress in biophysical quantification, a gap remains in the conceptual standardization needed for these terms to translate into effective environmental valuation mechanisms and policy instruments.

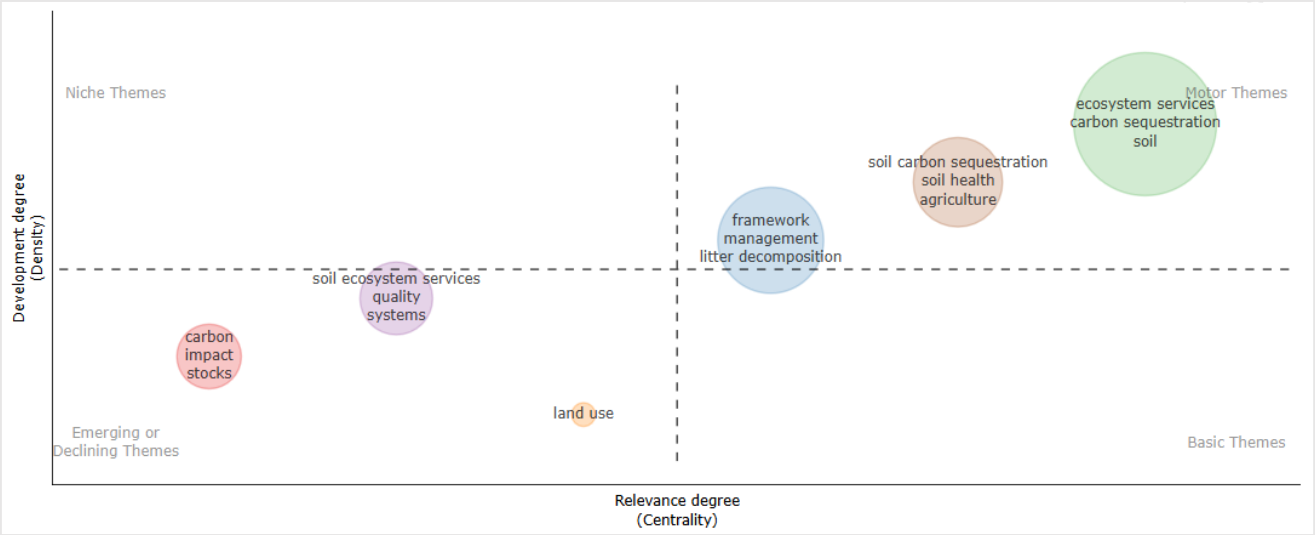


Figure 03: Thematic map of SES research based on keyword density and centrality.
Source: The authors (2025)

Final Remarks

In recent years, there has been a growing body of research on soil ecosystem services (SES). However, our systematic literature review revealed that only 35% of the 20 selected studies clearly conceptualized SES, and that the majority of scientific output originates from China. Carbon sequestration was the most frequently addressed soil ecosystem service across the studies, underscoring the tendency of scientific advances to link SES to the implementation of actions aimed at tackling global crises, climate change, and biodiversity loss.

We therefore emphasize the need to advance the standardization of concepts, measurement approaches, and the integration of interdisciplinary knowledge in order to develop models that reflect the true value of SES a strategic step toward effective environmental valuation and compensation mechanisms.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) and the Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) for their support.

Referências Bibliográficas

ADHIKARI, Kabindra; HARTEMINK, Alfred E. Linking soils to ecosystem services: a global review. **Geoderma**, [S. l.], v. 262, p. 101-111, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009.

CERQUEIRA, H.; ROXO, M. J.; CALVO-CASES, A. **Burying the carbon to dig up the future**: Reviewing the role of Geography in valuing soil carbon ecosystem services. Cuadernos de Investigación Geográfica, [S. l.], v. 50, n. 1, p. 59-83, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.18172/cig.5767.

CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. **Cambridge Dictionary**. Cambridge, 2020. Disponível em: https://dictionary.cambridge.org/.

COSTANZA, Robert *et al*. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, [S. l.], v. 387, n. 6630, p. 253-260, 1997. Disponível em: https://doi.org/10.1038/387253a0

DAILY, G. C.; MATSON, P. A.; VITOUSEK, P. M. Ecosystem services supplied by soil. In: DAILY, G. C. (ed.). **Nature's services**: societal dependence on natural ecosystems. Washington, DC: Island Press, 1997. p. 113-132.

DOMINATI, E. et al. A soil change-based methodology for the quantification and valuation of ecosystem services from agro-ecosystems: A case study of pastoral agriculture in New Zealand. **Ecological Economics**, v. 100, p. 119-129, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.02.008.

ELLILI-BARGAOUI, Y. *et al.* **Assessment of six soil ecosystem services by coupling simulation modelling and field measurement of soil properties**. Ecological Indicators, [S. l.], v. 121, 107211, fev. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107211.

LIU, Shuang *et al*. Valuing ecosystem services: theory, practice, and the need for a transdisciplinary synthesis. **Annals of the New York Academy of Sciences**, [S. l.], v. 1185, n. 1, p. 54-78, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05167.x.

MEDINA-ROLDÁN, E. *et al.* **Disentangling soil-based ecosystem services synergies, trade-offs, multifunctionality, and bundles**: A case study at regional scale (NE Italy) to support environmental planning. Geoderma, [S. l.], v. 448, 116962, ago. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116962.

OUYANG, Zhiyun *et al*. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. **Science**, [S. l.], v. 352, n. 6292, p. 1455-1459, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1126/science.aaf229.

OXFORD UNIVERSITY PRESS. **Oxford English Dictionary**. Oxford, 2019. Disponível em: https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/us/definition/english/service_1?q=service.

PAGE, Matthew J. *et al*. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, [S. l.], v. 372, n. 71, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1136/bmj.n71.

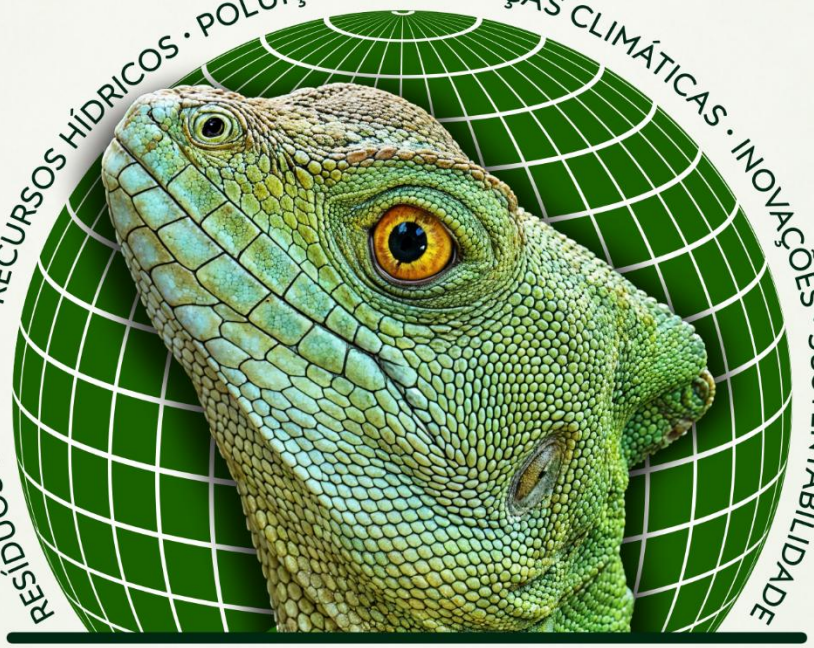
POTOTSKY, Christy; CRESSWELL, Will. Conservation research output in sub-Saharan Africa is increasing, but only in a few countries. **Oryx**, [S. l.], p. 1-10, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1017/S0030605320000046.

RODRIGUES, A. F. *et al.* **Systematic review of soil ecosystem services in tropical regions**. Royal Society Open Science, [S. l.], v. 8, n. 4, 201584, abr. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1098/rsos.201584.

ZHAO, R. *et al.* **Understanding trade-offs and synergies among soil functions to support decision-making for sustainable cultivated land use**. Frontiers in Environmental Science, [S. l.], v. 10, 1063907, nov. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1063907.

ÁREA TEMÁTICA 19

MOBILIDADE URBANA



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE
ENGENHARIA AMBIENTAL

ANÁLISE DE IMPORTÂNCIA E DESEMPENHO DE VARIÁVEIS RELACIONADAS À OPERAÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO EM DIFERENTES REGIÕES DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

1Julia Bibiana Zschistschick Souza, 1Paula Sandri Rhoden, 1Vinicius da Rosa, 1Alejandro Ruiz-Padillo
1 Laboratório de Mobilidade e Logística, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, Brasil, e-mail: lamot@ufsm.br

Introdução

Os padrões de mobilidade resultam das decisões e percepções individuais dos usuários, o que torna essencial compreender os aspectos comportamentais da demanda de transporte. A análise de elementos como origens e destinos, motivos das viagens e modos utilizados é fundamental para o planejamento urbano e para prever o comportamento de deslocamento (Núñez *et al.,* 2022; Abdullah *et al.,* 2022).

Esses comportamentos são moldados tanto pela infraestrutura e pela operação do transporte quanto pela diversidade das características das cidades, especialmente no caso do transporte público (Ruiz-Padillo *et al.,* 2024). Sendo assim, o objetivo desse trabalho é analisar a importância e desempenho de aspectos relacionados a operação do transporte público de acordo com as percepções das populações de quatro regiões do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, utilizando as técnicas de Entropia e *Importance - Performance Analysis* (IPA).

Referencial

Vários aspectos influenciam na satisfação dos usuários de transporte público urbano. Em primeiro lugar, destaca-se a disponibilidade do serviço, pois impacta diretamente o cumprimento de horários, a redução do tempo de viagem e a confiabilidade do modo (Atombo; Dzigbordi Wemegah, 2021; Chen *et al.,* 2009). Quando o serviço é regular e previsível, os passageiros tendem a confiar mais no sistema e a considerá-lo eficiente, o que reforça a percepção de qualidade. Ainda, o período em que o passageiro permanece no veículo representa a maior parte da viagem, sendo determinante para sua experiência (Tavares *et al.,* 2021).

Além disso, variáveis como o valor das tarifas influenciam fortemente a satisfação dos usuários, sobretudo a percepção de preço justo em relação à qualidade oferecida (De Oña, 2021). Fornecer informações confiáveis e garantir o cumprimento dos itinerários são aspectos que podem influenciar de forma relevante o aumento da satisfação dos usuários do transporte público (Atombo; Dzigbordi Wemegah, 2021; Zheng *et al.,* 2022). Ainda, um sistema de transporte público bem planejado contribui para melhorar a mobilidade e a integração urbana (Adhvaryu; Chopde; Dashora, 2019).

Metodologia

O presente estudo foi desenvolvido no estado do Rio Grande do Sul, a partir das respostas a um questionário online, distribuído a ampla população de quatro regiões do estado, com cidades de diferentes portes e características: Cachoeira do Sul (CS), na região dos vales, sendo de pequeno porte; Santa Maria (SM), na região central do estado, de médio porte e caracterizada como cidade universitária; a região metropolitana da Serra Gaúcha (RMSG), de grande porte; e a região metropolitana de Porto Alegre (RMPA), capital do estado, com caráter de metrópole. O questionário tinha como objetivo coletar informações socioeconômicas, sobre a rotina e forma de deslocamento da população e sobre a percepção quanto a aspectos de operação do transporte público identificados na literatura como determinantes da satisfação em seus deslocamentos, avaliadas através de uma escala Likert de 5 graus de concordância.

Para analisar os dados coletados, inicialmente, foram atribuídos pesos para cada variável através da técnica da Entropia, que analisa o quão homogêneas são as respostas para cada variável abordada. Sendo assim, quanto maior a variação de valores de uma variável, mais informação ela contém, resultando em um maior peso ao critério, indicando que a variável tem alto poder de influência na decisão da população quanto a sua percepção (Xu *et al.*, 2024).

Seguidamente, aplicou-se a metodologia *Importance - Performance Analysis* (IPA), com o objetivo de relacionar a importância e o desempenho das variáveis analisadas. Essa abordagem permite identificar áreas que requerem melhorias e aquelas com bom desempenho, sendo amplamente utilizada em estudos de percepção de serviços (Martilla; James, 1977). Os valores de importância obtidos a partir dos pesos calculados pela Entropia, enquanto o desempenho foi representado pelas medianas das respostas. A matriz resultante foi estruturada em um gráfico bidimensional, no qual o eixo horizontal representa o desempenho e o vertical a importância, originando quatro quadrantes: (QI) "*Concentrate here"* alta importância e baixo desempenho, (QII) "*Keep up the good work"* alta importância e alto desempenho, (QIII) ""*Low priority"* baixa importância e baixo desempenho e (QIV) "*Possible overkill"* baixa importância e alto desempenho.

Resultados e Discussões

A metodologia de análise apresentada foi aplicada aos dados obtidos por meio do questionário, de acordo com cada região. Assim, na Figura 01, que mostra os resultados para a cidade pequena (CS), observa-se que a maioria das variáveis apresenta desempenho insatisfatório, apesar de serem consideradas de grande importância, como tempo de espera nos pontos de ônibus, pontualidade, frequência das linhas e custo (Tavares *et al.,* 2021; De Oña, 2021). Isso demonstra a insatisfação dos usuários com a regularidade dos ônibus e os tempos de espera, o que é compreensível em cidades com menor número de linhas

disponíveis e longos intervalos entre os ônibus. Em relação às variáveis relacionadas ao tempo de permanência no veículo e à conectividade, embora sejam menos importantes, apresentam bom desempenho, indicando que as viagens percorrem trajetos mais curtos e o sistema permite conexões fáceis para chegar ao destino final (Adhvaryu; Chopde; Dashora, 2019). Portanto, as áreas de melhoria são a pontualidade e a frequência das viagens, com o objetivo de melhor atender às expectativas dos usuários e reduzir os tempos de espera nos pontos de ônibus.

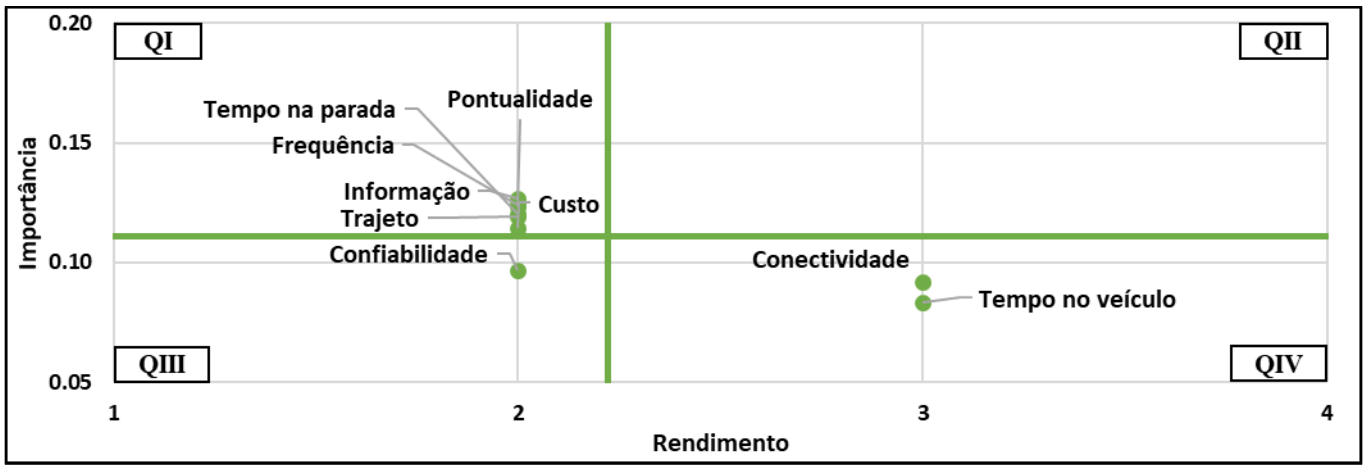


Figura 01: IPA de CS.
Fonte: Autores (2026)

Conforme ilustrado na Figura 02, na cidade de médio porte (SM), os resultados indicam que, novamente, variáveis como tempo na parada, pontualidade e frequência têm alta importância, porém baixo desempenho, demonstrando insatisfação com o serviço. Em outras palavras, os usuários priorizam a previsibilidade nos horários das linhas (Atombo; Dzigbordi Wemegah, 2021; Chen *et al.,* 2009). Além disso, baixo desempenho para as informações sobre as linhas, seus trajetos, pontualidade, custo, bem como o tempo na parada, indicam falhas segundo a percepção dos usuários, sendo essas consideradas, segundo a metodologia, devem ser concentrados esforços para um maior engajamento com o modo. Por outro lado, o trajeto apresenta bom desempenho, indicando eficiência no percurso e satisfação por parte da população. Ainda, percebe-se a necessidade de uma maior disponibilidade de linhas, para aumentar a frequência, porém mantendo um custo adequado, sendo essas as principais demandas percebidas pelos usuários.

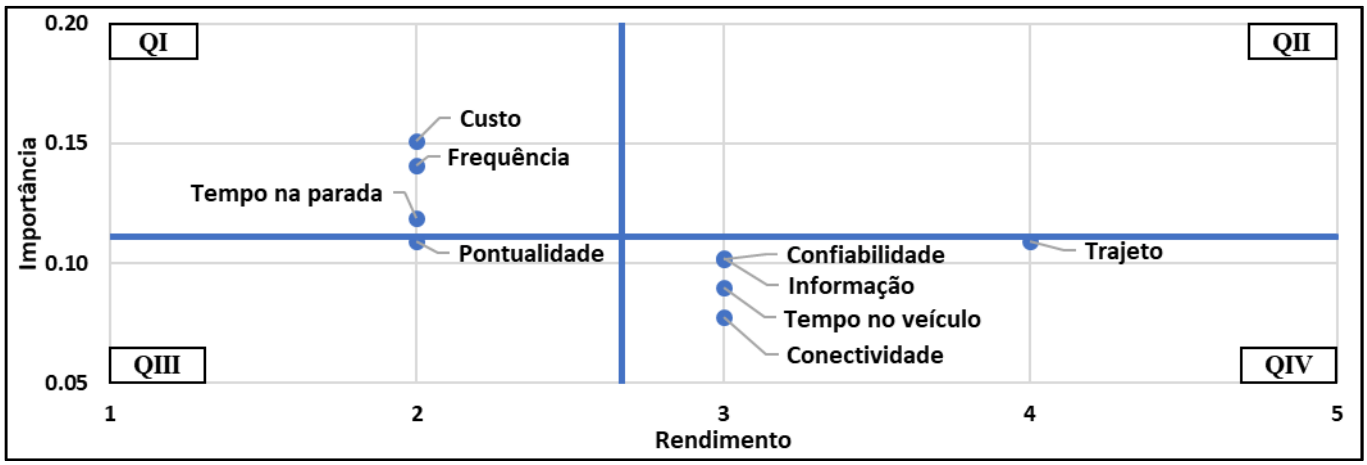


Figura 02. IPA de SM
Fonte: Autores (2026)

Na região metropolitana de grande porte (RMSG), os resultados apresentados na Figura 03 demonstram que as variáveis de confiabilidade e tempo no veículo apresentam bom desempenho, mas são consideradas pouco importantes. Porém, variáveis fundamentais como tempo na parada, trajeto, informação e, sobretudo, frequência têm alta importância e baixo desempenho. Isso demonstra a insatisfação com aspectos básicos do serviço, como atrasos e baixa frequência entre as linhas ofertadas, problemas enfrentados em cidades com maiores demandas no transporte público (Tavares *et al.,* 2021). Apesar disso, a boa avaliação da confiabilidade indica que ele é percebido como previsível, enquanto o custo também não parece tão limitante. De uma maneira geral, os resultados indicam para a necessidade de regularidade, monitoramento das linhas e melhoria nas informações fornecidas (De Oña, 2021).

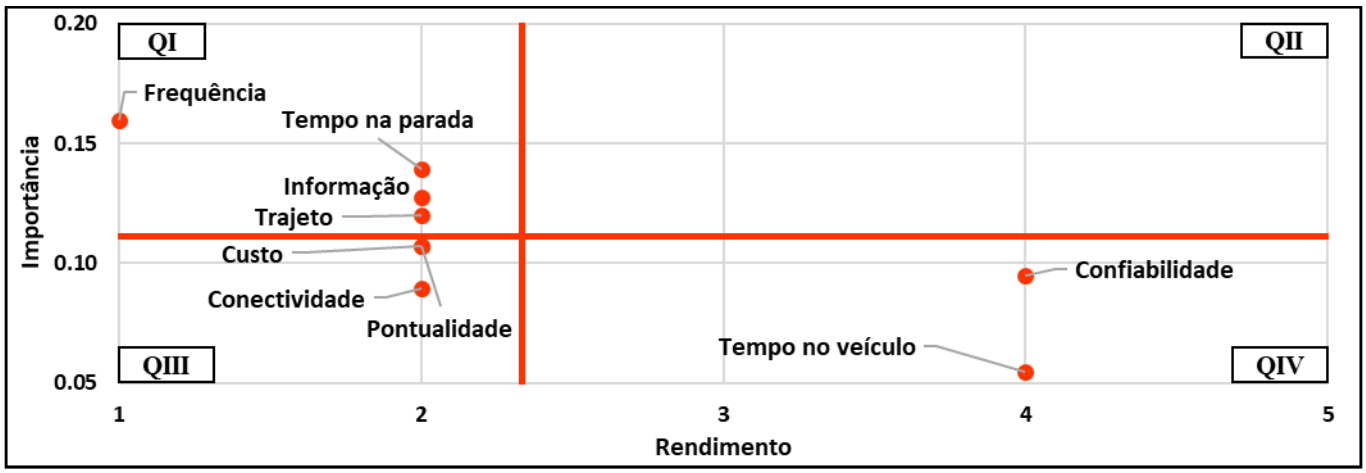


Figura 03. IPA de RMSG.
Fonte: Autores (2026)

Finalmente, a Figura 04 apresenta os resultados da metrópole de Porto Alegre (RMPA), um cenário comparativamente melhor aos anteriores, demostrando-se eficiente em aspectos operacionais, mas com desafios em custo e frequência, refletindo o impacto das tarifas com preços maiores e da limitação da oferta de linhas, mesmo com a grande demanda (Tavares *et al.,* 2021; De Oña, 2021). As variáveis pontualidade, trajeto e tempo no veículo apresentam bom desempenho, indicando eficiência serviço. Já as variáveis informação e conectividade têm desempenho e importância menores, o que pode estar relacionado ao costume dos usuários com o sistema. Sendo assim, o transporte da RMPA mostra eficiência operacional, mas necessita de uma maior disponibilidade de linhas para limitar o tempo na parada, e a redução do custo.

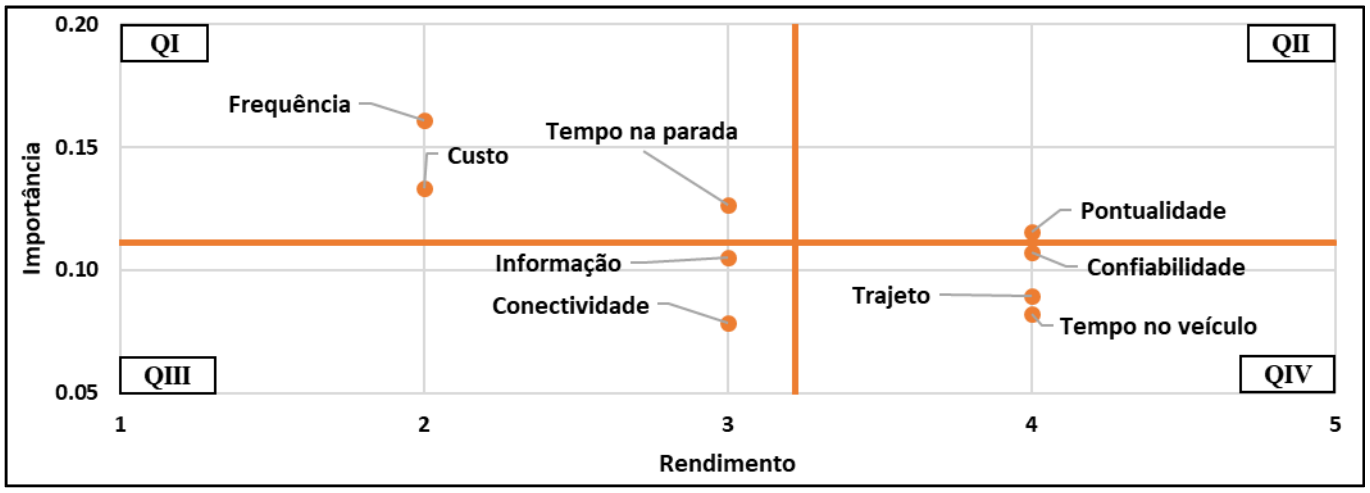


Figura 04: IPA de RMPA.
Fonte: Autores (2026)

Assim, os resultados obtidos através da aplicação da metodologia IPA identificaram claramente os aspectos prioritários para a melhoria do serviço analisado e orientar eficazmente os responsáveis em cada caso. Em geral, os principais pontos críticos foram relacionados com a pontualidade, a frequência e o tempo de espera, aspetos que impactam diretamente a satisfação do usuário e que devem ser o foco principal (Tavares *et al.,* 2021). No entanto, é importante analisar cada contexto específico, uma vez que as características urbanas influenciam significativamente a satisfação do usuário. Portanto, as ações de melhoria devem concentrar-se nos aspetos mais deficientes, mas também nos mais importantes.

Conclusão

Os perfis de mobilidade urbana refletem decisões individuais influenciadas tanto pela infraestrutura e operação do transporte quanto pelo comportamento da população, tornando essencial a compreensão desses fatores para o planejamento de transportes. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar a importância e o desempenho de aspectos relacionados à operação do transporte público, segundo a percepção dos usuários em quatro regiões de diferentes portes do estado do Rio Grande do Sul, utilizando a metodologia *Importance - Performance Analysis* (IPA) juntamente com a técnica de Entropia.

Os resultados indicaram que, em cidades pequenas, o principal desafio reside na pontualidade e frequência das viagens, enquanto em cidades de médio porte há necessidade de melhorar a comunicação e aumentar o número de linhas, mantendo uma

tarifa adequada. Em cidades grandes e regiões metropolitanas, a maior insatisfação está associada ao alto custo e à limitação de serviços, embora o sistema apresente boa confiabilidade. Na prática, os resultados permitem aos gestores priorizar ações para o planejamento e aprimoramento da operação do transporte público, contribuindo para maior satisfação do usuário e maior eficiência do sistema, adaptadas à realidade de cada cidade ou região. Para pesquisas futuras, sugere-se que as percepções daqueles que utilizam o transporte público como principal meio de locomoção sejam comparadas com as opiniões daqueles que optam por outras alternativas, a fim de identificar medidas para aumentar o uso de meios de transporte mais sustentáveis.

Agradecimentos

Agradece-se aos programas PROBIC-FAPERGS e CNPq pelo apoio concedido no desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

ABDULLAH, M.; ALI, N.; ASLAM, A. B.; JAVID, M. A.; HUSSAIN, S. A. Factors affecting the mode choice behavior before and during COVID-19 pandemic in Pakistan. **International Journal of Transportation Science and Technology**, v. 11, n. 1, p. 174-186, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2021.06.005. Acesso em: 21 abr. 2026.

ADHVARYU, B.; CHOPDE, A.; DASHORA, L. Mapping public transport accessibility levels (PTAL) in India and its applications: A case study of Surat. **Case Studies on Transport Policy**, v. 7, n. 2, p. 293-300, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cstp.2019.03.004. Acesso em: 21 abr. 2026.

ATOMBO, C.; WEMEGAH, T. D. Indicators for commuter's satisfaction and usage of high occupancy public bus transport service in Ghana. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, v. 11, p. 100458, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100458. Acesso em: 21 abr. 2026.

CHEN, X.; YU, L.; ZHANG, Y.; GUO, J. Analyzing urban bus service reliability at the stop, route, and network levels. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 43, n. 8, p. 722-734, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tra.2009.07.006. Acesso em: 21 abr. 2026.

DE OÑA, J. Understanding the mediator role of satisfaction in public transport: A cross-country analysis. **Transport Policy**, v. 100, p. 129-149, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.09.011. Acesso em: 21 abr. 2026.
MARTILLA, J. A.; JAMES, J. C. Importance-Performance Analysis. **Journal of Marketing**, v. 41, n. 1, p. 77-79, 1977.

NÚÑEZ, F.; ALBORNOZ, E.; LEÓN, J.; ZUMELZU, A. Socially sustainable mobility: Strategic analysis to identify accessibility barriers. **Sustainable Cities and Society**, v. 76, p. 103420, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103420. Acesso em: 21 abr. 2026.

RUIZ-PADILLO, A.; DE MORAES, L. B.; RHODEN, P. S.; DE OÑA, J. Analysis of the factors influencing university community satisfaction about public transport trips in small and medium-sized cities in Brazil. **Research in Transportation Business & Management**, v. 57, p. 101233, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2024.101233. Acesso em: 21 abr. 2026.

TAVARES, V. B.; LUCCHESI, S. T.; LARRANAGA, A. M.; CYBIS, H. B. B. Influence of public transport quality attributes on user satisfaction of different age cohorts. **Case Studies on Transport Policy**, v. 9, n. 3, p. 1042-1050, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.04.018. Acesso em: 21 abr. 2026.

XU, K.; WANG, H.; WANG, Z.; MEI, K. Distribution justice and regional equity of urban public transport services: Evidence from China. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 126, p. 104033, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.104033. Acesso em: 21 abr. 2026.

ZHENG, Y.; KONG, H.; PETZHOLD, G.; BARCELOS, M. M.; ZEGRAS, C. P.; ZHAO, J. Gender differences in the user satisfaction and service quality improvement priority of public transit bus system in Porto Alegre and Fortaleza, Brazil. **Travel Behaviour and Society**, v. 28, p. 22-37, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tbs.2022.02.003. Acesso em: 21 abr. 2026.

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PERCEPÇÃO DE ALUNOS UNIVERSITÁRIOS SOBRE OS MODOS DE DESLOCAMENTO ATRAVÉS DE UM MODELO DE EQUAÇÕES ESTRUTURAIS

1Julia Bibiana Zschitschick Souza, 1Paula Sandri Rhoden, 1Vinicius da Rosa, 1Alejandro Ruiz Padillo
1 Laboratório de Mobilidade e Logística, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, Brasil, e-mail: lamot@ufsm.br

Palavras-chave: mobilidade; universidade; análise multivariada.

Introdução

O planejamento da mobilidade urbana é indispensável para assegurar deslocamentos eficientes e minimizar perdas de tempo e demais impactos negativos do trânsito, agravados pelo aumento contínuo no fluxo de veículos nas cidades. Entretanto, o modelo de mobilidade predominante no Brasil e em vários países da América Latina, baseado no uso intensivo do transporte motorizado individual, tem intensificado esses problemas, impulsionando gestores urbanos a buscar soluções que promovam a mobilidade dentro de uma perspectiva sustentável (Soriano *et al*., 2020).

Nesse sentido, a identificação de polos geradores de viagens é fundamental, pois esses locais concentram grande volume de deslocamentos e exercem influência direta sobre a demanda por transporte em seu entorno. Entre eles, os campi universitários ocupam posição de destaque por abrigarem uma comunidade numerosa e diversificada de alunos (Zhou, 2012). No entanto, suas especificidades os diferenciam de outros polos geradores, em função das características próprias dos deslocamentos dos estudantes, marcados por horários definidos de aulas e refeições, menor poder aquisitivo e menor acesso a veículos e habilitação entre os mais jovens (Alomari et al., 2023; Soltani et al., 2019).

Dessa forma, faz-se necessário estudar especificamente os padrões de viagens dos alunos até a Universidade para poder traçar estratégias de planejamento sustentável na sua mobilidade.

O objetivo deste estudo foi investigar as relações entre os fatores que influenciam a satisfação de mobilidade da comunidade estudantil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), instituição de ensino superior localizada no sul do Brasil, em seus deslocamentos nos diferentes modos de transporte até o campus. Os resultados, obtidos mediante um modelo de equações estruturais, contribuem para planejamento de estratégias de ação para melhorar a experiência e a sustentabilidade dessas viagens.

Referencial Teórico

As características dos modos de transporte urbano exercem forte influência nas percepções dos usuários quanto à escolha, preferência, avaliação e satisfação em seus deslocamentos diários (de Oña; de Oña, 2023). Entre essas variáveis estão aspectos de infraestrutura, como a qualidade de calçadas e pavimentos; de operação, como confiabilidade do modo e tempo de viagem; de segurança viária e pública; além de impactos das externalidades como ruídos e poluição. Somam-se ainda características individuais, como idade e gênero, e condições socioeconômicas, como renda e local de residência (Atombo; Wemegah, 2021; Kim; Park; Lee, 2014).

As percepções dos usuários dependem do modo de transporte utilizado. Assim, a percepção de segurança e conforto nos deslocamentos a pé e de bicicleta é influenciada por aspectos urbanos, ambientais e viários, como iluminação, qualidade das calçadas e ciclovias, desenho urbano e declividade dos trajetos (Atombo; Wemegah, 2021; Oestreich *et al*., 2023). A segurança viária influencia de forma importante não só pedestres e ciclistas, mas também os motoristas, aos quais também afetam as condições das vias, congestionamentos e oferta de estacionamentos (Welle *et al*.,2015; Larranaga *et al*., 2019).

Por outro lado, em relação ao transporte público, a população universitária valoriza especialmente a disponibilidade e cumprimento de horários, que reduzem o tempo de espera e fortalecem a confiança no modo, além do custo (Atombo; Wemegah, 2021; Chen *et al*., 2009). A qualidade do atendimento, incluindo a cortesia e profissionalidade dos motoristas e funcionários, também contribui de forma significativa para a percepção positiva do serviço (Mahmoud; Hine, 2016).

Metodologia

O estudo foi realizado no campus sede da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), localizado na cidade de Santa Maria, cidade de médio porte na região central do estado do Rio Grande do Sul (Brasil). Os dados procedem das respostas dos alunos, via um questionário online no portal institucional da universidade, com o intuito de coletar informações socioeconômicas e das rotinas de deslocamento realizados até a universidade através do transporte coletivo, carro, caminhada e bicicleta. Dentre os 25,398 alunos da instituição (UFSM, 2025), foi coletada uma amostra de 5,033 respostas, que demonstrou ser representativa da população nos diferentes níveis de ensino médio, graduação e pós-graduação, assim como segundo o gênero.

Além disso, também foram coletadas informações sobre a percepção dos alunos quanto a aspectos que influenciam na satisfação em seus deslocamentos, como apontado na literatura, abordando variáveis de infraestrutura, como iluminação pública, disponibilidade de estacionamento, condições das vias, além de questões ligadas a operação, pontualidade, custo e qualidade do serviço prestado. Essas variáveis foram avaliadas através de uma escala Likert de 5 graus de concordância.

Para analisar os dados coletados, foi aplicada a modelagem de equações estruturais (*Structural Equation Model* - SEM), a fim de compreender as interações e os impactos de diferentes variáveis associadas às percepções dos alunos em suas viagens ao campus. O modelo de medida adotado foi criado através de uma análise fatorial confirmatória (*Confirmatory Factor Analysis* - CFA), que teve como base os agrupamentos gerados a partir de uma análise fatorial exploratória (*Exploratory Factor Analysis* - EFA), a qual uniu as variáveis coletadas no questionário de acordo com suas cargas fatoriais (Kline, 2011).

Resultados e discussões

Através da análise inicial dos dados, verificou-se a adequabilidade para a aplicação da técnica EFA por meio dos parâmetros do teste de esfericidade de Bartlett [$\chi^2(19) = 77685.207$; p-valor < 0,001] e do teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO = 0,844 ≥ 0,8) (Kline, 2011). Após, o modelo de medida foi ajustado na CFA, que confirmou os quatro fatores latentes, que contemplaram 14 variáveis observadas agrupadas, conforme a Tabela 01. É possível observar que cada fator agrupou variáveis relacionadas a cada um dos modos de transporte utilizados pelos alunos.

Fator	Variável	Unst.	St.	SE
Percepções_ônibus	*iluminação_paradas*	1.000	0.853	*
	atendimento_funcionários	1.627	0.951	0.016
	horários_rotas	1.183	0.883	0.013
	segurança_viária	0.928	0.700	0.015
	pontualidade_frequência	1.326	0.925	0.014
	forma_pagamento	1.448	0.929	0.015
	custo_passagem	0.961	0.870	0.012
	iluminação_pública	0.833	0.663	0.011
Percepções_carro	*condição_vias*	1.000	0.976	*
	disp_estacionamento_carro	0.941	0.958	0.013
Percepções_bicicleta	*facilidade_pedalada*	1.000	0.983	*
	disp_estacionamento_bici	0.798	0.947	0.014
Percepções_caminhada	*poluição_sonora*	1.000	0.469	*
	facilidade_caminhada	1.413	0.736	0.058
	inclinações_rotas	1.436	0.706	0.058

*significância estatística não testada. Todas as demais cargas fatoriais resultaram estatisticamente significativas para p < 0.001.

Tabela 02. Resultados obtidos no modelo de medida adotado.
Fonte: os autores.

Os resultados da CFA mostram que, no fator *Percepções_ônibus*, o aspecto com maior carga fatorial está vinculado a qualidade do serviço prestado pelos motoristas e cobradores no transporte público, demostrando a importância da satisfação dos usuários com a qualidade do atendimento (Mahmoud; Hine, 2016). Já no fator de *Percepção_caminhada*, os usuários definem como mais cruciais aspectos relacionados a infraestrutura, evidenciando que a inclinação do terreno, juntamente com outras questões influenciam positivamente a facilidade de deslocamento a pé (Oestreich *et al*., 2023). De forma similar acontece para os deslocamentos realizados por meio da bicicleta e de carro, já que os estudantes demonstram maior relevância da facilidade de deslocamento e condições das vias, respectivamente, do que a disponibilidade de estacionamento, evidenciando a prioridade para a qualidade da infraestrutura. (Welle *et al*.,2015; Larranaga *et al*., 2019).

A partir desse modelo de medida, foi criado e adotado um modelo de equações estruturais, conforme demostrado na Figura 01, na qual também representa as cargas fatoriais estandarizadas das relações significativas entre os fatores latentes analisados. Os valores dos parâmetros de ajuste aproximados do modelo com a correção de Satorra Bentler demonstraram-se também excelentes (Kline, 2011): RMSEA(sb) = 0,045 (<0,05), CFI(sb) = 0,987 (>0,90), TLI(sb) = 0,983 (>0,90) e SRMR = 0,029 (<0,05).

Ao analisar as relações e influências entre fatores na Figura 01, percebe-se que o fator de *Percepções_ônibus* sofre influência das demais variáveis latentes. Por um lado, a influência positiva, embora baixa, de *Percepções_caminhada* demonstra que as caminhadas complementam as viagens no transporte público, uma vez que a percepção da caminhada se faz presente na viagem. Os outros dois fatores influenciam negativamente *Percepções_ônibus*, o que se demonstra coerente, uma vez que quanto mais satisfeitos com as viagens realizadas através do carro e bicicleta, melhor tornam-se as percepções com esses modos, deixando assim o transporte público menos atrativo e eficiente.

Por outro lado, o fator *Percepções_caminhada* também influencia, em maior medida, *Percepções_carro* e *Percepções_bicicleta*, ou seja, os estudantes que têm uma boa percepção sobre o ambiente construído durante a caminhada percebem que as condições da infraestrutura viária influenciam também os outros modos, facilitando também o deslocamento com veículos, motorizados ou não. A pedalada também pode ser percebida como positiva, indicando escolhas de deslocamentos mais sustentáveis por parte dos alunos, que podem estar percebendo as condições de infraestruturas como propicias para essas escolhas.

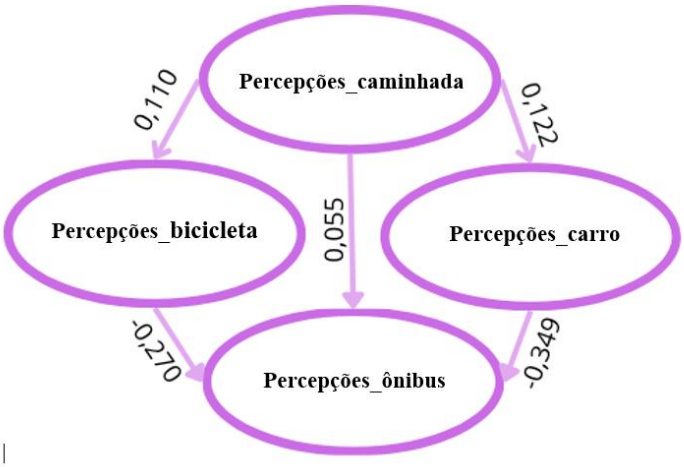


Figura 01. Modelo adotado no SEM.
Fonte: os autores.

Com isso, ao analisar as influências dos fatores latentes entre si, percebe-se que a caminhada tem uma função positiva direta no modelo, melhorando a percepção sobre carro e bicicleta. Porém, quanto as percepções de ônibus, apesar da caminhada ter um efeito direto positivo, ao analisar os efeitos totais, indicados na Tabela 02, percebe-se através dos efeitos indiretos que ela acaba tendo um efeito total negativo sobre as percepções de ônibus, ou seja, mesmo que diretamente influencia de forma positiva, não é suficiente ao analisar todo o modelo e considerar o efeito, negativo, maior das percepções de carro e bicicleta para com as percepções de ônibus.

Variável latente	Direto	Indireto	Total
Caminhada ->Ônibus	0,110	-0,084 -0,058	-0,032
Caminhada ->Carro	0,266		0,266
Caminhada -> Bicicleta	0,214		0,214
Carro -> Ônibus	-0,316		-0,316
Bicicleta -> Ônibus	-0,275		-0,275

Tabela 02. Efeitos calculados no modelo SEM.
Fonte: os autores.

Desta maneira, os resultados servem de auxílio para uma tomada de decisão mais direcionada por parte dos responsáveis do sistema, destacando a qualidade do atendimento no ônibus, as condições para caminhada, a infraestrutura das ciclovias e a manutenção viária são questões decisivas na percepção dos estudantes sobre a mobilidade. Entre eles, a caminhada aparece como elemento crucial, pois influencia de forma direta e positiva os demais modos e favorece escolhas mais sustentáveis, ainda que para as percepções de ônibus, ainda seja necessário investir na diversificação das formas de pagamento, a pontualidade e maior disponibilidade de horários para as linhas, para que assim torne o modo mais atrativo.

Conclusões

Planejar a mobilidade urbana é fundamental para reduzir os impactos gerados no trânsito, principalmente em lugares com uso excessivo do transporte individual. No caso das cidades universitárias, o estudo dos padrões de comportamento dos alunos é fundamental, pois representam um número elevado e possuem características próprias. Assim, o objetivo deste estudo foi analisar as relações entre os fatores relacionados à satisfação dos alunos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, Brasil) em seus deslocamentos até o campus, mediante um modelo de equações estruturais.

A partir dos resultados obtidos, percebeu-se que as percepções dos alunos da UFSM quanto aos modos de deslocamento são, principalmente, influenciadas pela qualidade do atendimento no transporte público e aspectos relacionados a infraestrutura para carro, bicicleta e caminhada. Já quanto as influências de um fator sobre o outro, verificou-se que as percepções de caminhada afetam de forma direta e positiva todos os outros modos, uma vez que complementa todos os outros tipos de deslocamento, porém ao observar os efeitos totais, não é suficiente para influenciar de maneira positiva as percepções sobre o ônibus. Ainda, as percepções positivas sobre as viagens realizadas de carro ou bicicleta afetam negativamente os deslocamentos de ônibus, demonstrando a preferência pelos outros modos.

Assim, os resultados mostram-se úteis para auxiliar gestores da mobilidade em cidades universitárias na construção do planejamento urbano, fomentando a sustentabilidade do transporte direcionando investimentos em calçadas e ciclovias para incentivo aos modos ativos e fidelização dos usuários do transporte público mediante um serviço eficiente e de qualidade. Ainda,

como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se uma análise da influência de variáveis socioeconômicas no modelo proposto e diferenças nas percepções dos usuários segundo o modo predominantemente usado.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq e da CAPES.

Referências bibliográficas

ALOMARI, Ahmad H.; KHEDAYWI, Taisir S.; JADAH, Asalah A.; MARIAN, Abdel Rahman O. Evaluation of Public Transport among University Commuters in Rural Areas. **Sustainability**, v. 15, n. 1, p. 312, 25 dez. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su15010312.

ATOMBO, Charles; DZIGBORDI WEMEGAH, Tina. Indicators for commuter's satisfaction and usage of high occupancy public bus transport service in Ghana. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, v. 11, p. 100458, set. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100458.

CHEN, Xumei; YU, Lei; ZHANG, Yushi; GUO, Jifu. Analyzing urban bus service reliability at the stop, route, and network levels. **Transportation Research Part A: Policy and Practice,** v. 43, n. 8, p. 722–734, out. 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tra.2009.07.006.

DE OÑA, Juan; DE OÑA, Rocío. Is it possible to attract private vehicle users towards public transport? Understanding the key role of service quality, satisfaction and involvement on behavioral intentions. **Transportation**, v. 50, n. 3, p. 1073–1101, jun. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11116-022-10272-1.

KIM, Saehoon; PARK, Sungjin; LEE, Jae Seung. Meso- or micro-scale? Environmental factors influencing pedestrian satisfaction. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 30, p. 10–20, jul. 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.05.005.

KLINE, Rex.B.: **Principles and Practice of Structural Equation Modeling**, 3rd edn. Guilford Press, New York (2011).

LARRANAGA, Ana Margarita; ARELLANA, Julián; RIZZI, Luis Ignacio; STRAMBI, Orlando; CYBIS, Helena Beatriz Bettella. Using best–worst scaling to identify barriers to walkability: a study of Porto Alegre, Brazil. **Transportation**, v. 46, n. 6, p. 2347–2379, dez. 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11116-018-9944-x.

MAHMOUD, Moataz; HINE, Julian. Measuring the influence of bus service quality on the perception of users. **Transportation Planning and Technology**, v. 39, n. 3, p. 284–299, 2 abr. 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1080/03081060.2016.1142224.

OESTREICH, Letícia; RHODEN, Paula Sandri; VIEIRA, Jéssica Da Silva; RUIZ-PADILLO, Alejandro. Impacts of the COVID-19 pandemic on the profile and preferences of urban mobility in Brazil: Challenges and opportunities. **Travel Behaviour and Society**, v. 31, p. 312–322, abr. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tbs.2023.01.002.

SOLTANI, Ali; ALLAN, Andrew; NGUYEN, Ha Anh; BERRY, Stephen. Students' commuting pattern from the viewpoint of environmentalism: comparing Australia with China**. International Journal of Sustainability in Higher Education**, v. 20, n. 1, p. 91–114, 7 jan. 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1108/IJSHE-08-2018-0146.

SORIANO, Marina De Almeida Gomes; ARAÚJO, Rodrigo Freitas; MEIRA, Leonardo Herszon; MAIA, Maria Leonor Alves. Gestão de demanda por viagens: estudo sobre as iniciativas institucionais na busca por uma mobilidade urbana sustentável através de um índice (IMOC). **Transportes**, v. 28, n. 1, p. 50–62, 30 abr. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.14295/transportes.v28i1.1850.

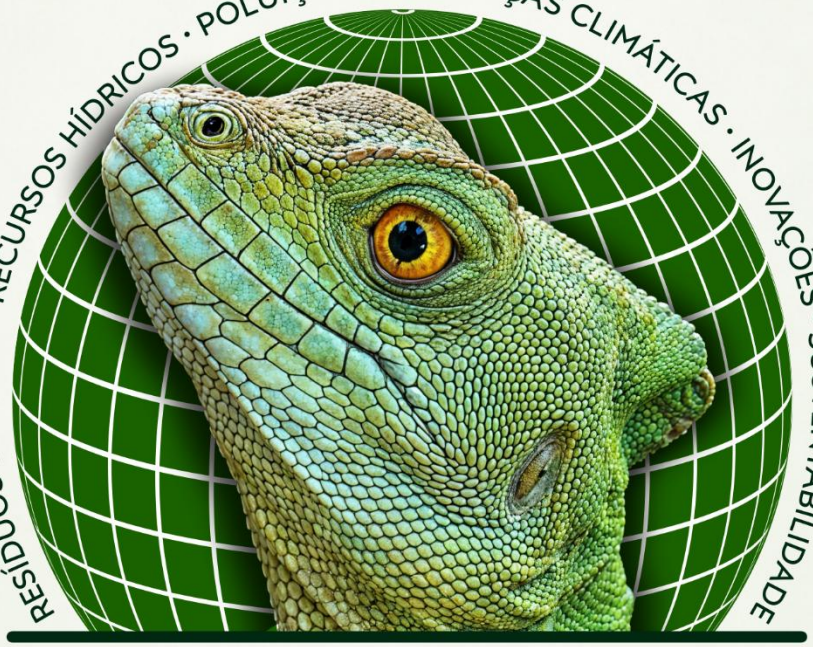
UFSM: UFSM em Números. 2025. Disponível em https://portal.ufsm.br/ufsm-em-numeros/publico/index.html, último acesso em 30/09/2025

WELLE, Ben; LIU, Qingnan; LI, Wei; ADRIAZOLA-STEIL Claudia; KING, Robin; SARMIENTO, Claudio; OBELHEIRO, Marta **. Cities safer by design**. WRI Ross Center for Sustainable Cities, Washington, DC (2015).

ZHOU, Jiangping. Sustainable commute in a car-dominant city: Factors affecting alternative mode choices among university students. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 46, n. 7, p. 1013–1029, ago. 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.04.001.

ÁREA TEMÁTICA 20

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E EVENTOS EXTREMOS



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

SOILFUTURES-BR: BIAS-CORRECTED SOIL TEMPERATURE PROJECTIONS FOR BRAZIL

1 Dimaghi Schwamback, 2 Bruna S. Aguiar, 3 Jullian S. Sone, 4 Abderraman R. A. Brandão, 5 André S. Ballarin, 6 Jarbas Honorio de Miranda, 7 Edson C. Wendland

1 Graduate Program in Environmental Science and Technology, Federal University of Technology dimaghis@professores.utfpr.edu.br; 2 Department of Hydraulics and Sanitation, University of São Paulo: brunasiqueira@usp.br; 3 Department of Economics, University of Waterloo: julliansone@gmail.com; 4 Department of Hydraulics and Sanitation, University of São Paulo: abde.brandao@gmail.com; 5 Department of Hydraulics and Sanitation, University of São Paulo: asballarin@gmail.com; 6 Department of Biosystems Engineering, University of São Paulo: jhmirand@usp.br; 7 Department of Hydraulics and Sanitation, University of São Paulo: ew@sc.usp.br

Keywords: soil temperature, climate change, sustainable agriculture

Introduction

Climate change presents a formidable challenge to global food security, with Brazil standing at a particularly vulnerable intersection due to its vast agricultural landscape and complex hydroclimatic zones (Zilli et al, 2023). While atmospheric shifts are widely monitored, recent evidence suggests that soil thermal regimes are often more susceptible to rapid fluctuations than air temperatures, especially in low-latitude regions where climate signals emerge more abruptly (Olesen et al., 2007). This sensitivity is critical; soil temperature is a primary driver of agricultural vitality, governing the biophysical pathways of root development, nutrient mineralization, and moisture retention. When these temperatures rise, they risk triggering a detrimental feedback loop by accelerating subsoil carbon decomposition—a process that simultaneously degrades soil health and amplifies global warming through increased greenhouse gas emissions (Zilli et al., 2023).

To anticipate these shifts, researchers have traditionally relied on Global Climate Models (GCMs), yet these tools frequently lack the granular resolution necessary to account for the local topography and land-use patterns that define regional environments. While dynamical downscaling through Regional Climate Models provides higher fidelity, its use is often restricted by immense computational requirements and inherent parameterization uncertainties. To bridge this data gap, statistical downscaling has become an essential methodology. By applying rigorous bias correction and regridding techniques, scientists can translate coarse global data into precise, localized projections that preserve the environmental heterogeneity required for effective agricultural adaptation and risk management (Ballarin et al., 2023).

In developing nations like Brazil, the historical scarcity of validated, high-resolution soil temperature data has long hindered our ability to model landscape-level soil processes. Addressing this void, the SoilFutures-BR dataset (openly available at https://doi.org/10.57760/sciencedb.29673) introduces a robust framework of bias-corrected projections aligned with the Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) from the IPCC's Sixth Assessment Report. By providing a multi-model ensemble of 15 distinct climate models spanning from 1950 to 2100, this resource offers a transparent, data-driven foundation for both scientists and policy stakeholders. Ultimately, SoilFutures-BR empowers the agricultural community to better understand how shifting soil temperatures impact land productivity, providing a strategic defense against disruptions to the global food supply chain.

Materials and Methods

We developed the SoilFutures dataset described here by selecting 15 Global Circulation and Earth System Models (GCMs/ESMs) within the Coupled Models Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) (Table 1). These models were selected based on their availability of monthly soil temperature (tsl) for the historical period (1950-2014) and future projections (2015-2100) under the r1i1p1f1 variant and a maximum nominal spatial resolution of 250 km. The r1i1p1f1 member was used because it is it represents the first realization (r1), initial initialization (i1), first physics version (p1), and first forcing dataset (f1) in climate model ensembles, providing a standardized baseline that reduces variability caused by different initial conditions or model configurations, ensuring a homogeneous ensemble and avoiding unequal model weighting. Future projections were expressed in terms of the middle-of-the-road (SSP2-4.5), regional rivalry (SSP3-7.0), and fossil-fueled development (SSP5-8.5) Shared Socioeconomic Pathways, which describe alternative trajectories of future anthropogenic emissions and radiative forcing. The SSP2-4.5 corresponds to an intermediate pathway characterized by moderate socioeconomic development and mitigation efforts, leading to a stabilized radiative forcing level of 4.5 Wm−2 by 2100. On the other hand, the SSP3-7.0 represents a high-emission scenario associated with regionalized development, limited international cooperation, and continued dependence on fossil fuels, resulting in radiative forcing of 7.0 Wm−2. Lastly, the SSP5-8.5 depicts a worst-case, fossil-fueled development pathway, with rapid economic growth, energy-intensive lifestyles, and minimal climate policies, driving radiative forcing to 8.5 Wm−2 by the end of the century. The three chosen scenarios represent updates of the previous Representative Concentration Pathways (RCPs) from the CMIP5 15. These scenarios are fundamental in climate modeling for assessing future climate responses, evaluating risks, and informing mitigation and adaptation strategies under varying socioeconomic and policy conditions.

Pre-Processing

Reanalysis soil temperature data from 1950 to 2014 included in the ERA5 dataset (Hersbach et al., 2020) were used for bias correction, described in the following section, since there is no reliable ground-based information for the entire country.

Reanalysis datasets are widely used in scientific research due to their ability to provide consistent, high- resolution, and long-term records of atmospheric and surface variables. In the development of this dataset, we considered soil temperature for three standardized depths consistent with ERA5 reanalysis data: 0.07 m, 0.28 m, and 1.00 m, as our main goal is to enable a wide range of future agricultural studies.

Given the coarse spatial resolution of the selected GCMs/ESMs, we performed a follow-up bilinear interpolation to regrid all climate models to a common 0.25°spatial grid in agreement with the ERA5. The bilinear method adopted in regrinding is a well-known method used for its ability to generate a smoother and more continuous representation of spatial data (Ballarin et al., 2023; Mishra; Bhatia; Tiwari, 2020; Tang; Clark; Papalexiou, 2022). This technique utilizes the values of the four nearest grid points surrounding a target point to compute the interpolated value, thereby ensuring that the output grid captures essential spatial variations while maintaining the integrity of the original data's physical meaning. Bilinear interpolation is especially beneficial for climate data as it minimizes abrupt discontinuities and produces a gradual transition between grid points.

Bias Correction Procedure

Climate models have inherent deficiencies when simulating current climate conditions, triggering systematic errors that propagate into future simulations, especially temperature (Christensen et al., 2008). Thus, we corrected this systematic bias from the selected climate models using the delta quantile mapping method (Cannon; Sobie; Murdock, 2015). This technique explicitly preserves relative and absolute changes between historical and future simulations based on the delta quantile change and detrended quantile mapping methods (Bürger et al., 2012). In this way, the trends projected by future simulations are maintained after bias correction. The procedure encompasses three steps, in which all future trends are firstly removed from projected quantiles of the soil temperature data series. Then, the bias of the detrended quantiles is corrected using the quantile mapping technique. In the last step, the projected trends of the quantiles are superimposed on the corrected data series.

Results and Discussion

Bias Correction Performance

The performance of the bias correction procedure in representing observed soil temperature during the historical period in both each individual and ensemble models will be evaluated. In general, ensembles outperform any individual model since this combination better reflects the inherent uncertainties of each model alone, a reason why we also included it in our dataset. To obtain a first-order view of bias correction performance, we computed the relative and absolute bias between long-term (1980–2014) means from the CMIP6 models and the ERA5 reanalysis, contrasting raw against bias-corrected records. Relative bias was calculated as the difference between the model and reference dataset (ERA5) divided by the reference value and expressed as a percentage, while absolute bias corresponds to the direct difference between model and reference values in the original units. Both raw and bias-corrected multimodel ensemble mean overall overestimate long-term soil temperature at all three depths, as shown in Fig. 3, with much warmer deviations (up to +3°C) exhibited by the raw ensemble mean. Specifically in the Caatinga Biome, the raw ensemble presents a cold bias of up to -3°C, which is attenuated in the bias-corrected ensemble, now presenting a slightly warmer bias compared to the other biomes. After bias correction, residual biases were reduced to near zero despite the slight warm bias in the Cerrado-Amazonia transition and Caatinga. The cold bias observed in the raw outputs over the Caatinga—an arid to semi-arid biome—has been associated in CMIP6 land-surface schemes with deficiencies in latent heat flux, surface downwelling shortwave radiation, and surface albedo parameterizations. This negative bias relative to ERA5 likely reflects the region's strong climatic variability, low evapotranspiration, reduced gross primary production, sparse vegetation cover, and widespread land degradation, which make the surface energy and water balances particularly difficult for models to represent accurately (Almagro et al., 2020; De Oliveira et al., 2022).

Overall, the QDM substantially improved the historical simulations, reducing systematic bias in both long- term means and extremes across all depths, with a clear depth-dependent improvement. After correction, relative biases are largely confined to [−1.6%, +1.6%] and cluster around zero, indicating that QDM addressed not only the mean offset but also quantile-dependent errors in the raw GCM/ESM distributions.

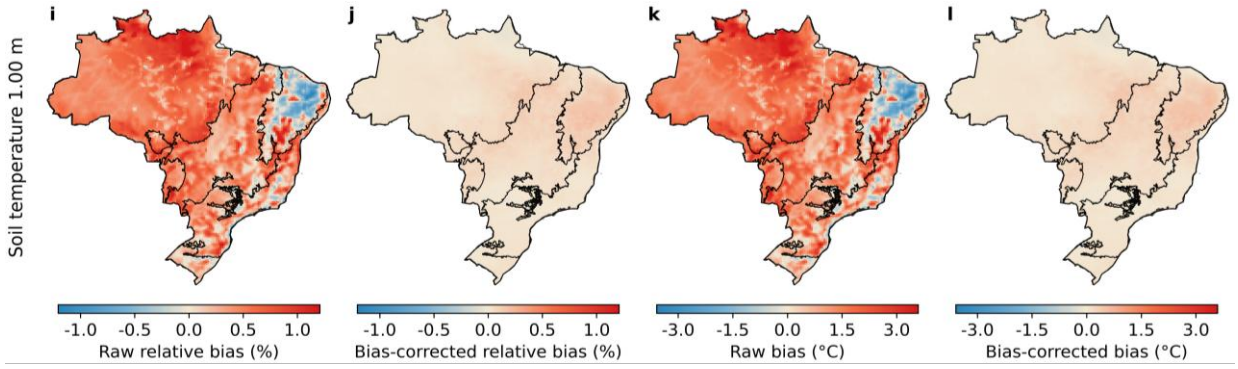


Figure 1: Climatological mean soil-temperature bias (1980–2014) over Brazil at 1m depths, comparing raw (raw) and bias-corrected (BC) ensemble means against ERA5. Columns show: (i) raw relative bias (%), (j) BC relative bias (%), (k) raw absolute bias (◦C), and (l) BC absolute bias (◦C). Color scales are diverging and centered at zero (blue = model colder than ERA5; red = warmer). Thin outlines indicate biome boundaries.

Future Soil Temperature Pathways

Our dataset includes projections extending through the end of the 21st century, allowing us to explore projected changes in soil temperature under potential future climate conditions. For analytical conciseness, the soil temperature results presented in this main text are relative to the superficial soil layer (0-0.07 m) and based on the projected changes in the distant future period (2070-2100) for all Shared Socioeconomic Pathways (i.e., SSP2- 4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5). As the order and magnitude of projected changes in the other deeper soil layers are consistent with those in the superficial layer, these other results are depicted in the Supplementary Material. Thus, the analyses covered here for the most superficial depth also relate to the other soil depths. Across all scenarios, soil temperature is expected to increase in the distant future all over Brazil, mainly in the most pessimistic scenario (SSP5-8.5) with an average increase of 4.30°C (Figure 2). In terms of long- term means, the projected increase in soil temperature is homogeneous over the territory, with negligible differences among biomes. Projected increase in extreme temperatures differs, on the other hand, among biomes. Larger increments in extreme low soil temperatures compared to the historical period are expected in the southern portion of Brazil, consistent across SSPs and more noticeable in the SSP5-8.5, with an average increase of 2.51°C in the Pampa biome (Figure 2). On the other extreme end, future high soil temperatures are expected to significantly increase in the North and Central regions of Brazil. The most optimistic scenario (SS2-4.5) projected an increase of 2°C in these two biomes, homes of important agricultural activities and environmental conservation that may face future disruptions due to these changes in soil temperature. Again, the SSP5-8.5 presents the largest increments in soil temperature of up to +5°C over the Amazon and Cerrado biomes (Figure 2). This most pessimistic trajectory indicates an increase in extreme high soil temperatures of 10°(≈ 40% relative change) C in some locations in these two biomes. It means having a superficial soil layer with up to 40°C by the end of 2100 in SSP5-8.5. Overall, the results indicate an upward shift of the entire quantile distribution, not only the extremes. These findings suggest potential risks for soil moisture retention, microbial activity, and crop productivity, especially in the Cerrado, where agriculture is an important economic sector.

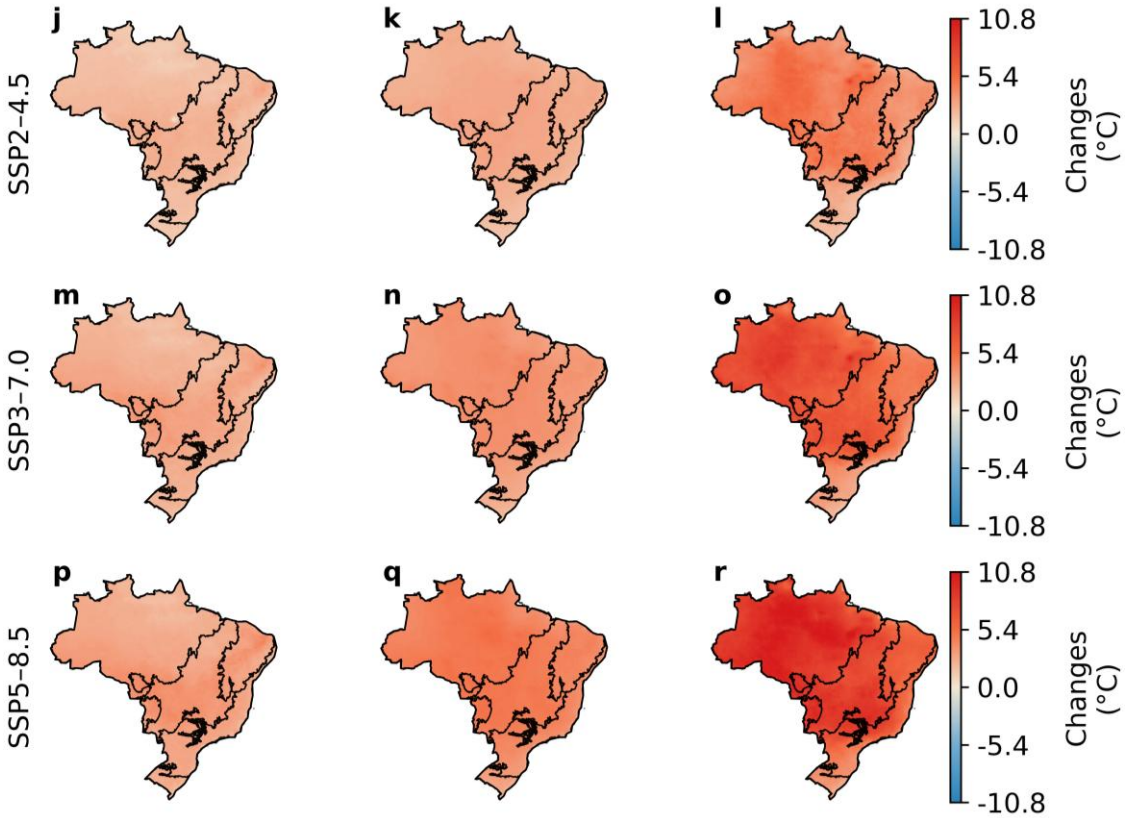


Figure 2: Relative and absolute changes in the long-term mean and extreme (5th and 95th percentiles) values of soil temperature at superficial soil layer (0-0.7 m) between the historical (1980-2014) and distant future (2070-2100) periods based on the bias-corrected multimodel ensemble.

Final Considerations

The availability of our dataset SoilFuture Data (https://doi.org/10.57760/sciencedb.29673) - a gridded soil temperature dataset - offers significant benefits for scientific research in both climate, environment, and agriculture fields. By providing consistent, bias-corrected data across historical and future periods, it enables more accurate assessments of soil thermal regimes under changing climate and socioeconomic scenarios. In environmental studies, this dataset supports improved modeling of land–atmosphere interactions, hydrological processes, and ecosystem dynamics. In agriculture, soil temperature is a key variable influencing productivity and sustainability, along with variables such as moisture dynamics, seed germination, root development,

and microbial activity. Additionally, unsustainable agricultural practices progressively erode both current soil conditions and the trajectory of their future functioning, thereby undermining soil health. Intensive input-driven systems and conventional practices such as heavy tillage, monocropping, excessive chemical fertilizers and pesticides, and poor residue management accelerate the loss of soil organic matter, intensify erosion, compaction, salinization, acidification, and contamination, and sharply reduce soil biodiversity. Over time, these processes compromise climate resilience by depleting soil carbon stocks and increasing greenhouse gas emissions, locking soils into degraded states that are costly or impossible to fully restore. Our SoilFutures-BR dataset (Schwamback et al., 2026) provides an adequate spatial resolution for crop modeling, agricultural planning, and climate adaptation strategies from a soil-plant-atmosphere improved understanding.

Bibliographic References

ALMAGRO, A. et al. Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. Atmospheric Research, v. 244, p. 105053, nov. 2020.

BALLARIN, A. S. et al. CLIMBra - Climate Change Dataset for Brazil. Scientific Data, v. 10, n. 1, p. 47, 20 jan. 2023.

BÜRGER, G. et al. Downscaling Extremes—An Intercomparison of Multiple Statistical Methods for Present Climate. Journal of Climate, v. 25, n. 12, p. 4366–4388, 15 jun. 2012.

CANNON, A. J.; SOBIE, S. R.; MURDOCK, T. Q. Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? Journal of Climate, v. 28, n. 17, p. 6938–6959, 1 set. 2015.

CHRISTENSEN, Jens H. et al. On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. Geophysical Research Letters, v. 35, n. 20, 30 out. 2008.

DE OLIVEIRA, M L. et al. Remote sensing-based assessment of land degradation and drought impacts over terrestrial ecosystems in Northeastern Brazil. Science of The Total Environment, v. 835, p. 155490, ago. 2022.

HERSBACH, H. et al. The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 15 jul. 2020.

MISHRA, V.; BHATIA, U.; TIWARI, A. Deep. Bias-corrected climate projections for South Asia from Coupled Model Intercomparison Project-6. Scientific Data, v. 7, n. 1, p. 338, 12 out. 2020.

OLESEN, J. E. et al. Uncertainties in projected impacts of climate change on European agriculture and terrestrial ecosystems based on scenarios from regional climate models. Climate Change, v. 81, p. 123–143, 2007).

SCHWAMBACK, D. et al. SoilFutures-BR: Bias-Corrected Soil Temperature Projections for Brazil.

TANG, G.; CLARK, M. P.; PAPALEXIOU, S. M.. EM-Earth: The Ensemble Meteorological Dataset for Planet Earth. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 103, n. 4, p. E996–E1018, abr. 2022.

ZILLI, M. The impact of climate change on Brazil's agriculture. Science of The Total Environment, v. 740, 139384, 2020.

REVISÃO SOBRE A RESILIÊNCIA DAS INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE FRENTE A EVENTOS CLIMÁTICOS DISRUPTIVOS

1 Giovana Denardi Parcianello, 1 Alexandre Grings, 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: Resiliência; Infraestrutura; Transporte.

Introdução

Nos sistemas de transportes, destacam-se dois conceitos fundamentais para sua funcionalidade que, apesar de serem fortemente conectados, são distintos: as infraestruturas e as redes de transporte (Martín *et al.*, 2021). As infraestruturas fazem referência aos ativos físicos necessários para o transporte (como estradas, pontes, túneis e ferrovias) (Argyroudis *et al.,* 2019), e exercem influência direta nas redes, as quais contemplam a organização e a interconexão dos elementos de infraestrutura e viabilizam os fluxos de pessoas e mercadorias.

Nas últimas duas décadas, eventos naturais extremos têm ocorrido com maior frequência e intensidade em diversas regiões do mundo, afetando as infraestruturas e, consequentemente, as redes de transportes terrestres (rodovias e ferrovias). Esses episódios, como terremotos e tempestades são comumente classificados como eventos disruptivos (Dong *et al.*, 2020) e provocam atrasos e interrupções na operação da rede, instabilidade de taludes e sobrecarga nos sistemas de drenagem (Argyroudis *et al.*, 2019), com impactos no deslocamento de pessoas, no fluxo de mercadorias e no acesso a serviços essenciais. As consequências incluem prejuízos econômicos, devido aos danos materiais, custos de reparo e perdas de produtividade associadas à paralisação de fluxos e ao tempo de recuperação (Twumasi-Boakye e Sobanjo, 2019).

Assim, a vulnerabilidade dessas infraestruturas evidencia a necessidade de implementação de sistemas mais resilientes, sistemas capazes de manter e restaurar o nível de serviço durante crises, considerando os custos de mitigação (Twumasi-Boakye e Sobanjo, 2019). Nesse sentido, um sistema resiliente deve ser projetado para se adaptar a eventos disruptivos, possibilitando sua operação diante de adversidades. Dessa forma, estudos que buscam mensurar a resiliência considerando aspectos múltiplos, como criticidade dos riscos e magnitude dos impactos, adquirem relevância (Martín *et al.*, 2021; Zhang e Wang, 2016). Além disso, alguns dos estudos apontam que aspectos relacionados às infraestruturas são cruciais para a funcionalidade e resiliência dos sistemas de transportes terrestres. Assim, esses aspectos devem ser considerados na formulação de métricas que visem aprimorar a resiliência diante dos desafios atuais e futuros (Bi *et al.,* 2023).

Portanto, este trabalho tem como objetivo principal reconhecer as principais características associadas às infraestruturas no contexto da resiliência das redes de transporte terrestres, detalhando, em especial, os indicadores relacionados. Para isso, é conduzida uma revisão sistemática da literatura, mediante a metodologia ProKnow-C, visando a revisão de artigos recentes destacados pela sua relevância científica. Os resultados desta revisão contribuem na literatura existente fornecendo um embasamento científico que conecte fortemente o conceito de resiliência das redes às infraestruturas. Dessa forma, espera-se dar suporte à comunidade científica no desenvolvimento de ferramentas para medir a resiliência dos transportes terrestres e na formulação de estratégias mais eficazes de mitigação e adaptação a eventos disruptivos. Por outro lado, a pesquisa amplia a compreensão sobre o tema e fortalece a base científica para futuras pesquisas e aplicações práticas, evidenciando lacunas importantes.

Metodologia

Para a formação de um portfólio bibliográfico abrangente, adotou-se a metodologia ProKnow-C (Knowledge Development Process - Constructivist) para realizar a busca, análise e seleção de artigos científicos alinhados ao objetivo proposto. A referida metodologia é reconhecida em diversas áreas do conhecimento por combinar critérios de relevância científica e originalidade das contribuições, promovendo uma sistematização rigorosa da pesquisa bibliográfica e permitindo a identificação estruturada, em diferentes etapas, e eficiente dos estudos mais pertinentes (De Carvalho *et al*., 2020). Inicialmente, foram definidas as palavras-chave, juntamente com a *string* de busca. Em sequência, foram escolhidos os bancos de dados de acordo com sua relevância na área da engenharia, bem como definidos os filtros iniciais: o período de pesquisa (2014-2024), a área temática (Engenharia) e o tipo de documento (*paper*).

Após isso, os documentos foram sucessivamente filtrados, como mostrado na Figura 01 e, finalmente, os títulos selecionados partiram para a fase das análises, incluindo tanto as informações bibliométricas, por meio de uma extensão do software RStudio (denominada Bibliometrix), como do conteúdo dos artigos do portfólio. Assim, os artigos foram analisados em relação ao ano de produção, país de origem e número de citações, além de identificar os principais indicadores de resiliência e suas formas de categorização.

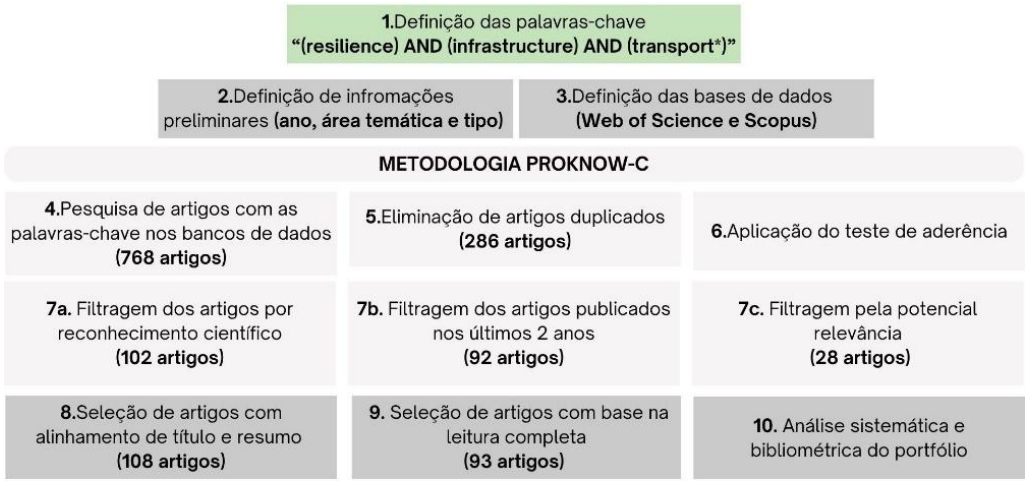


Figura 01: Metodologia da Revisão Sistemática de Literatura.
Fonte: elaboração própria

Resultados

Análise Bibliométrica

A análise dos 93 artigos do portfólio bibliográfico revelou os 5 países com maior predominância no conjunto final de artigos selecionados, conforme exposto na Figura 2. A imagem evidencia um aumento significativo nas produções a partir de 2020, já que 63% dos artigos foram publicados a contar deste ano. Assim, demonstra-se a crescente importância e interesse da comunidade acadêmica internacional pela temática.

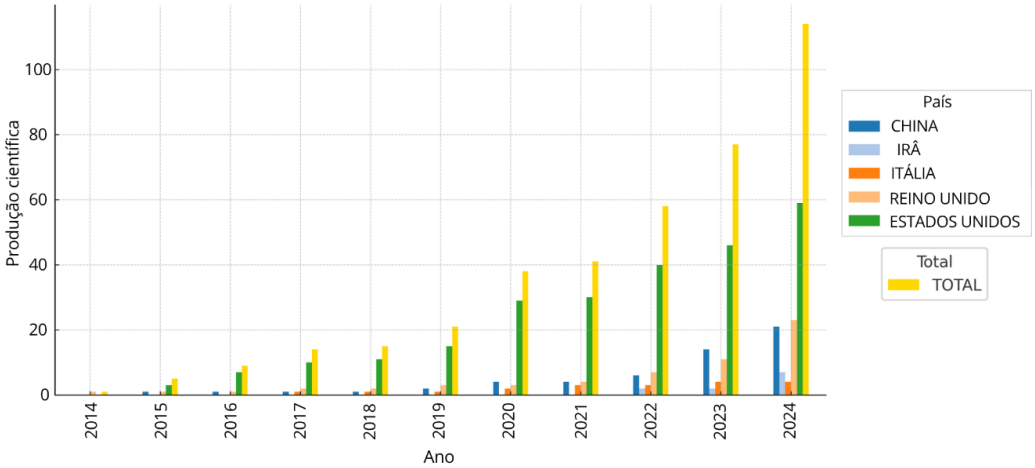


Figura 02: Produção científica ao longo do tempo.
Fonte: elaboração própria

Salienta-se a preponderância das publicações procedentes dos Estados Unidos sobre os demais (Cordero *et al.,*2024), realidade ratificada na investigação da relevância científica das produções. Isso porque, de um total de 3019 citações, 1505 delas pertencem aos Estados Unidos (Figura 03). A imagem mostra que, apesar da China (Lu *et al*., 2022) ter cinco vezes mais artigos que a Itália (Trucco e Petrenj, 2023), este a supera em citações. Já o Reino Unido, com número similar de artigos, acumula o dobro de citações, evidenciando maior relevância científica.

Contudo, a análise bibliométrica mostra crescimento global na pesquisa sobre resiliência em transportes, mas com grande disparidade entre Norte e Sul Global, onde apenas China e Irã se destacam. Assim, diante da escassez de estudos em países subdesenvolvidos, especialmente na América Latina e África, que enfrentam eventos disruptivos e possuem infraestruturas mais vulneráveis, destaca-se como uma das lacunas de pesquisa no tema a realização de estudos que contemplem a análise de resiliência nesses contextos específicos.

Características associadas à resiliência das infraestruturas de transporte

Sobre as características de resiliência, destacaram-se aspectos físicos, operacionais e de gestão (Mostafavi, 2017). Entre os físicos, salientam-se pavimentos, pontes, túneis, bueiros, sinalização e estabilidade de taludes, elementos essenciais para manter o funcionamento do sistema e que devem apresentar integridade estrutural e resistência em caso de eventos disruptivos (Dong *et al*., 2020; Zhang e Wang, 2016; Mostafavi, 2017). Quanto à operação e à gestão, a resiliência se associa a recursos financeiros, capacidade de recuperação, planos de emergência e conectividade da rede (Dong *et al.,* 2020; Zhang e Wang, 2016).

Ademais, a gestão de riscos avalia vulnerabilidade e estratégias de mitigação (Mostafavi, 2017). Assim, a colaboração entre organizações e a adaptação contínua a novos desafios são essenciais para o fortalecimento da resiliência.

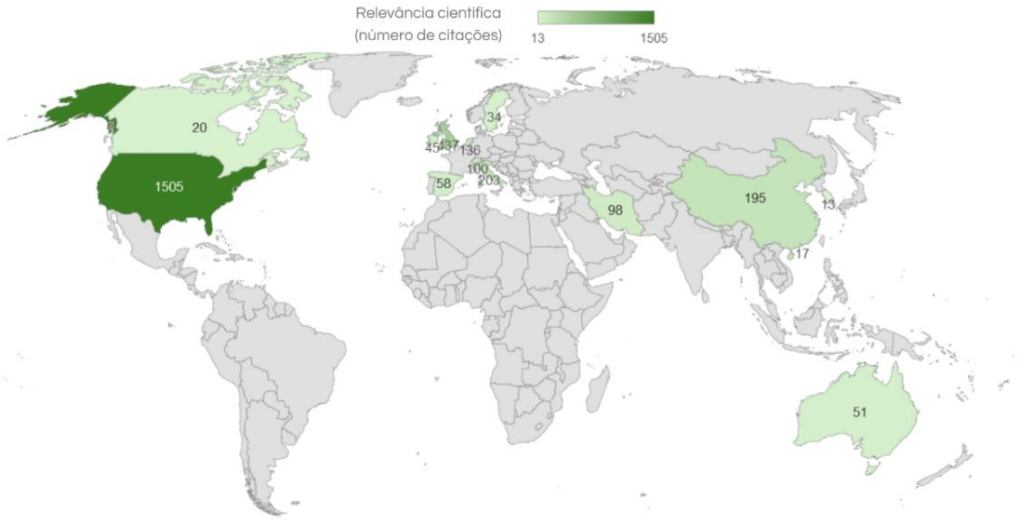


Figura 03: Distribuição geográfica dos estudos segundo relevância científica.
Fonte: elaboração própria

Para estruturar a avaliação de ambos os grupos (infraestrutura e rede), os indicadores foram estruturados em quatro dimensões: Gerenciais, Técnicos, Operacionais e de Usuários. Essa categorização permite compreender como diferentes aspectos da resiliência se vinculam a responsabilidades distintas, evidenciando a abordagem sistêmica e multidimensional necessária (Argyroudis *et al.*, 2019; Bi *et al.,* 2023; Cordero *et al.,*2024). A correlação entre esses grupos e os indicadores-chave revela a complexidade da infraestrutura, como mostra a Figura 04, em que a representação gráfica reflete a frequência dos indicadores.

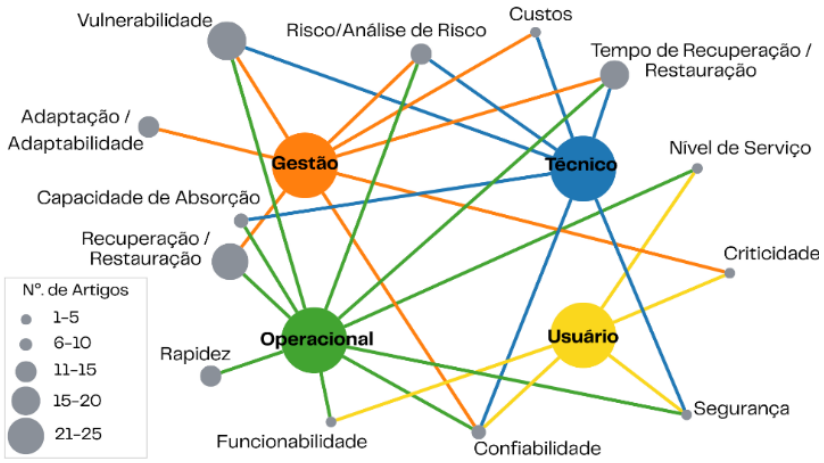


Figura 04: Níveis estratégicos de indicadores em infraestruturas de transportes.
Fonte: autores

Assim, nas infraestruturas de transporte, indicadores como vulnerabilidade, tempo de recuperação e confiabilidade são recorrentes nos grupos Gerencial, Técnico e Operacional, destacando a necessidade de alinhamento entre planejamento estratégico, engenharia de infraestrutura e capacidade operacional frente a falhas ou desastres (Dong *et al.,* 2020). A vulnerabilidade mede a suscetibilidade a danos ou falhas, considerando exposição a riscos e capacidade de mitigação (Martín *et al.,* 2021). O tempo de recuperação refere-se à rapidez com que o sistema retoma operações normais após interrupções, incluindo custos e eficiência das intervenções (Lu *et al.,* 2022). O indicador risco/análise de riscos fundamenta a identificação de pontos críticos e a priorização de ações preventivas e corretivas. Já segurança e funcionalidade aparecem na interface entre os grupos Técnico, Operacional e Usuários, reforçando a integração entre a operação dos sistemas e as expectativas dos usuários (Argyroudis *et al.*, 2019; Zhang e Wang, 2016; Cordero *et al.,*2024). Isso evidencia que os indicadores são interdependentes, refletindo a natureza multidimensional da resiliência. Assim, a sinergia entre os grupos estratégicos é essencial para garantir um sistema de transportes resiliente, com desempenho consistente, adaptabilidade contínua e resposta eficiente a eventos adversos.

Embora não exista consenso na literatura sobre um único indicador, sua escolha depende da natureza da infraestrutura e das perturbações. Assim, a resiliência assume caráter multidimensional, essencial para a segurança e eficiência (Cordero *et*

*al.,*2024). Avaliá-la requer análise integrada de diferentes indicadores, cada um abordando aspectos técnicos, sociais e econômicos da capacidade do sistema de manter-se funcional em crises (Bi *et al.,* 2023).

Conclusão

Diante de eventos climáticos disruptivos, a resiliência em infraestruturas e redes de transporte é fundamental para sustentabilidade, adaptação e mitigação de riscos. Esta revisão revelou uma disparidade entre o número de estudos voltados para o Norte e Sul Global, sendo considerada uma das lacunas do tema de pesquisa, apesar da tendência universal de crescimento. Além disso, salientaram-se diversos indicadores, mostrando que infraestruturas abordam componentes físicos, técnicos, sociais e econômicos, enquanto redes avaliam interações que sustentam a resiliência, considerando topologia, desempenho e economia. Indicadores como vulnerabilidade, rapidez, adaptação e recuperação ressaltam a necessidade de padronização, e robustez, redundância e conectividade destacam a continuidade operacional e redistribuição de fluxos.

Portanto, o estudo consolida o conhecimento sobre resiliência em transportes terrestres, oferecendo uma estrutura analítica com grupos estratégicos e indicadores-chave. Na prática, os resultados auxiliam na orientação de políticas, investimentos e estratégias de mitigação, apoiando gestores na definição de prioridades e alocação de recursos. Frente a mudanças climáticas e maior demanda por mobilidade, reforça-se a importância de metodologias integradas, dados padronizados e pesquisas aplicadas que fortaleçam a adaptabilidade e evolução dos sistemas de transporte. Para estudos futuros, recomenda-se definir metodologias de mensuração dos indicadores identificados e desenvolver uma ferramenta integrada para medir a resiliência de infraestruturas, priorizando intervenções, planejamento e tomada de decisões.

Agradecimentos

Agradece-se aos programas CAPES, PROBIC-FAPERGS e CNPq pelo apoio concedido no desenvolvimento deste trabalho.

Referências

Argyroudis, S. A., Mitoulis, S. A., Winter, M. G., Kaynia, A. M. (2019). Fragility of transport assets exposed to multiple hazards: State-of-the-art review toward infrastructural resilience. *Reliability Engineering and System Safety*, *191*. https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106567

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

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

De Carvalho, G. D. G. G.; Comini, G. M.; De França, A. C. L. Bibliometria e revisões sistemáticas: uma comparação entre o Proknow-C e o Methodi Ordinatio. *Journal of Informetrics*, v. 14, n. 3, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.joi.2020.101043.

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

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

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. A system-of-systems approach for integrated resilience assessment in highway transportation infrastructure investment. *Infrastructures*, v. 2, n. 4, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.3390/infrastructures2040022.

Trucco, P.; Petrenj, B. Characterisation of resilience metrics in full-scale applications to interdependent infrastructure systems. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 235, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109200.

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

Zhang, W.; Wang, N. Resilience-based risk mitigation for road networks. *Structural Safety*, v. 62, p. 57–65, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2016.06.003.

ISOLAMENTO ENERGÉTICO NA AMAZÔNIA: ANÁLISE E MAPEAMENTO DA MATRIZ ELÉTRICA DO ESTADO DO AMAZONAS

1 Marcelo Carvalho Tavares, 2 Fernanda Leonhardt, 3 Fernanda Nicolodi Brum, 4 Joice Mörs, 5 Luana Trevisan Junqueira, 6 Odorico Konrad

1 Universidade do Estado do Amazonas, e-mail: mtavares@uea.edu.br; 2 Universidade do Vale do Taquari, e-mail: fernanda.leonhardt@universo.univates.br; 3 Universidade do Vale do Taquari, e-mail: fernanda.brum@universo.univates.br; 4 Universidade do Vale do Taquari, e-mail: joice.mors@universo.univates.br; 5 Universidade do Vale do Taquari, e-mail: luana.junqueira@universo.univates.br; 6 Universidade do Vale do Taquari, e-mail: okonrad@univates.br

Palavras-chave: Sistema Isolado; Geração Térmica; Sistema Nacional Interligado

Introdução

O acesso à energia elétrica constitui elemento essencial para o desenvolvimento social, econômico e humano (MACGINLEY et al., 2025; SOUZA; NUNES; VISSOCI, 2022). Apesar dos elevados índices nacionais de eletrificação, a região Norte do Brasil ainda apresenta importantes desigualdades energéticas, especialmente em áreas remotas do Amazonas (THIVES; GHISI; THIVES JÚNIOR, 2022; BEZERRA et al., 2022). O estado do Amazonas exemplifica essa realidade devido à sua complexa configuração territorial, marcada por grandes distâncias, baixa urbanização, limitações de infraestrutura e predominância de áreas ambientalmente protegidas, terras indígenas e áreas alagadas (IBGE, 2024; PEREIRA et al., 2023). Essas condições dificultam a expansão do Sistema Interligado Nacional - SIN, tornando os Sistemas Isolados - SISOL a principal solução para o abastecimento energético de inúmeras localidades (EPE, 2024; ONS, 2025). Contudo, a predominância de termelétricas movidas a diesel gera elevados custos econômicos, forte dependência logística e significativos impactos ambientais, como a emissão de CO_2 (CCEE, 2024; URUCHI et al., 2025). Assim, compreender a organização espacial da matriz elétrica amazonense é fundamental para subsidiar políticas públicas e estratégias de transição energética.

Materiais e Métodos

A pesquisa foi desenvolvida com base em abordagem exploratória e analítica, utilizando conjunto de dados provenientes de diferentes instituições:

- Bases cartográficas e estatísticas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE;
- Dados energéticos da Empresa de Pesquisa Energética - EPE;
- Relatórios operacionais da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE;
- Informações territoriais da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA e do Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas - IPAAM;
- Georreferenciamento complementar via Google Earth.

Os dados foram processados em ambiente QGIS utilizando o sistema de referência geodésico SIRGAS 2000, conforme metodologia amplamente aplicada em análises territoriais energéticas (PEREIRA et al., 2023), permitindo:

- Mapeamento da distribuição espacial dos SISOL;
- Identificação das localidades conectadas ao SIN;
- Correlação entre infraestrutura elétrica, cobertura territorial e restrições ambientais;
- Avaliação da dependência energética regional.

Resultados e Discussão

Os resultados revelam que o Amazonas concentra mais de 80% dos SISOL do Brasil, com 96 usinas em operação no ano de 2024. Destas, 91 utilizam óleo diesel, as quais consumiram aproximadamente 484.559.224 de litros para gerar 1.789.550 MWh de energia elétrica. E as demais usinas (5) utilizam gás natural proveniente da Província de Urucu, e neste mesmo ano consumiram cerca de 65.902.328 m^3 de gás para gerar 206.664 MWh (EPE, 2024; CCEE, 2024). A geração de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis possui um custo operacional elevado, e o preço do combustível é o que mais impacta no custo total, com destaque para o óleo diesel, cuja cotação é sensível às variações do mercado internacional. Esse custo é mitigado pela Conta de Consumo de Combustíveis - CCC, que rateia os gastos excedentes entre os consumidores nacionais (FONTES et al., 2025; CCEE, 2024). Além disso, a expansão de linhas de transmissão enfrenta entraves relacionados à economia, conservação ambiental, presença de Terras Indígenas e limitações geográficas (ANA, 2024; YUWONO et al., 2025). Nesse cenário, o modelo atual de geração apresenta-se incompatível com metas de redução de emissões de gases do efeito estufa, pois juntas emitiram 1.473.582 tonelada de CO_2 (AHMADI et al., 2023; EPE, 2024). Os dados reforçam a necessidade de investimentos em alternativas energéticas renováveis descentralizadas, mais adequadas às condições regionais.



Figura 01: Mapa da Matriz Elétrica do Amazonas

Conclusão

A matriz elétrica do estado do Amazonas é fortemente condicionada por fatores econômicos, territoriais, ambientais e logísticos que limitam a expansão da infraestrutura convencional e perpetuam a dependência de sistemas fósseis isolados. O estudo evidencia que o isolamento energético regional não é apenas uma condição técnica, mas também estrutural, exigindo abordagens integradas de planejamento energético. Os resultados obtidos por meio das técnicas de geoprocessamento e integração de bases de dados demonstram que esse modelo energético apresenta elevados custos operacionais, dependência logística significativa e impactos ambientais relevantes, especialmente relacionados à emissão de gases de efeito estufa. Desta maneira a adoção de fontes renováveis descentralizadas surge como caminho estratégico para: reduzir emissões de gases de efeito estufa; diminuir custos operacionais de longo prazo; promover segurança energética e favorecer inclusão social e desenvolvimento sustentável. Portanto, políticas públicas orientadas por análises espaciais detalhadas e tecnologias adaptadas às especificidades do Amazonas são fundamentais para transformar o atual modelo energético regional.

Referências Bibliográficas

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA. **Catálago de metadados: Terras Indígenas**. ANA: Brasília, 2024. Mapa. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/3fa8cc38-79b4-4aa1-8179-bba315baea4b. Acesso em: 14 de março de 2025.

AHMADI, Mohammad Mahdi; *et al*. **A multi-approach framework for developing feasible, viable, and sustainable hybrid energy systems in remote areas: The case of Com Dao island in Vietnam**. Journal of Cleaner Production. vol. 426, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652623032304?via%3Dihub. Acesso em: 15 de agosto de 2025.

BEZERRA, Paula Borges da Silveira; *et al*. **The multidimensionality of energy poverty in Brazil: A historical analysis**. Energy Policy. vol. 171, 2022. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421522004876?via%3Dihub. Acesso em: 17 de setembro de 2024.

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Conta de Consumo de Combustíveis – CCC: 2024**. Disponível em: https://www.ccee.org.br/en/boletim-infoccc. Acesso em: 24 de março 2025.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Portal de Acompanhamento e informações dos sistemas isolados**: 2024. Disponível em https://pasi.epe.gov.br/PainelInterativo. Acesso em: 24de março 2025.

FONTES, jassiel V. H. *et al*. **Operational challenges and potential Environmental Impasts of High-Speed Vessels in the Brazilian Amazon**. Sustainability. vol. 17, 2025. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/17/23/10673. Acesso em: 09 de janeiro de 2026.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados**. 2024. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/am.html. Acesso em: 20 de setembro 2024.

MACGINLEY, Tamara J; *et al*. **Electricity access advances human development…but not always**. Energy for Sustainable Development, vol. 88, 2025. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082625001206?via%3Dihub. Acesso em: 18 de agosto de 2025.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Sin Maps**. 2025. Disponível em: https://sig.ons.org.br/app/sinmaps/. Acesso em: 05 de junho 2025.

PEREIRA, Jackeline da Silva. *et al*. **Electrification in Remote Regions: An Analysis of the More Light for Amazon Program**. Energies. Vol. 16. N. 12. 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/16/12/4663. Acesso em: 10 de janeiro de 2026.

SOUZA, A C Zambroni de; NUNES, Matheus Paranahiba Maciel; VISSOCI, Pedro Henrique de Souza. **O Problema da Acessibilidade e o Furto de Energia Elétrica.** Sociedade Brasileira de Automática (SBA) IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2022, vol. 2, n. 1, p. 251-258. 2022. Disponível em: https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sbse/article/view/2912. Acesso em: 09 de setembro 2024.

THIVES, L. P.; GHISI, E.; THIVES JÚNIOR, J. J. **Regional inequalities in electricity access versus quality of life in Brazil**. Ambiente Construído, Porto Alegre, vol. 22, n. 3, p. 47-65, 2022. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ac/a/cKhGzB9nFCvT9FtZRwwRnqS/?lang=en. Acesso em: 23 de agosto de 2024.

URUCHI, Nikole Teran; *et al*. **Techno-Economic Optimization of an Isolated Solar Microgrid: A Case Study in a Brazilian Amazon Community**. Eng. vol. 6, n. 7, 2025. Disponível em: https://www.mdpi.com/2673-4117/6/7/133?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 15 de novembro de 2025.

YUWONO, Bintang; *et al*. **Incorporating grid development in capacity expansion optimisation – case study for Indonesia.** vol 378, 2025. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261924022207?via%3Dihub. Acesso em: 18 de agosto de 2025.

EMATER-DF NO CLIMA: PROGRAMA DE ADAPTAÇÃO DOS PRODUTORES RURAIS DO DISTRITO FEDERAL ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

1 Anne Caroline Lobo Borges, 2 Icléa Almeida de Queirós Silva
1 Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural, e-mail: anne.borges@emater.df.gov.br; 2 Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural, e-mail: iclea.silva@emater.df.gov.br

Palavras-chave: Extensão Rural, Práticas Conservacionistas, Mercado de Carbono

Introdução

A Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Distrito Federal (Emater-DF) atua, desde 1978, na promoção do desenvolvimento rural sustentável e da segurança alimentar, ofertando assistência técnica e extensão rural gratuita a mais de 18 mil produtores rurais no Distrito Federal. Sua atuação se estrutura na difusão de tecnologias, no fortalecimento da produção agropecuária e na promoção de práticas sustentáveis, contribuindo para a geração de renda, inclusão produtiva e melhoria da qualidade de vida no meio rural.

No âmbito do manejo e conservação de água e solo, as ações institucionais tiveram início em 1981, com a execução do Programa de Manejo e Conservação do Solo, em parceria com a Secretaria de Agricultura do Distrito Federal. Esse eixo consolidou-se como estratégico ao longo das décadas, incorporando práticas como terraceamento, adequação de estradas rurais, recuperação de áreas degradadas e proteção de nascentes, com foco na sustentabilidade dos sistemas produtivos e na conservação dos recursos naturais.

A partir de 2012, a atuação da Emater-DF nessa temática foi ampliada com a participação no Projeto Produtor de Água na bacia do ribeirão Pipiripau, localizado em Planaltina/DF. Desenvolvido em parceria com 14 instituições e coordenado pela Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (Adasa), o projeto tem como objetivo fomentar a política de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), incentivando produtores rurais a adotarem práticas conservacionistas voltadas à proteção hídrica. Entre as ações implementadas destacam-se a recomposição de vegetação nativa, o cercamento de áreas de preservação permanente, a construção de estruturas de conservação do solo e o monitoramento hidrológico. Os resultados obtidos evidenciaram melhorias na infiltração de água, redução da erosão e aumento da segurança hídrica na bacia.

O êxito do Projeto Produtor de Água no Pipiripau possibilitou, em 2019, a replicação da iniciativa na bacia do rio Descoberto, principal manancial de abastecimento do Distrito Federal. Essa expansão reforça a relevância de estratégias integradas de gestão de recursos hídricos, aliando instrumentos econômicos, assistência técnica e governança interinstitucional para a promoção da sustentabilidade ambiental.

Nas últimas décadas, o agravamento das mudanças climáticas tem imposto desafios significativos ao setor agropecuário, com a intensificação de eventos extremos, como secas prolongadas e chuvas intensas. O Distrito Federal, inserido no bioma Cerrado, apresenta elevada vulnerabilidade a essas variações, o que demanda a adoção de estratégias de adaptação no meio rural. Nesse contexto, a Emater-DF reconhece o papel estratégico dos produtores rurais na transição para sistemas produtivos resilientes, por meio da adoção de práticas como o manejo conservacionista do solo, a diversificação de culturas, a integração lavoura-pecuária-floresta e o uso eficiente da água.

Diante desse cenário, foi concebido o programa “Emater-DF no Clima: Programa de Adaptação dos Produtores Rurais do Distrito Federal às Mudanças Climáticas”. A iniciativa tem como objetivo estruturar e integrar ações voltadas à adaptação climática no meio rural, promovendo capacitação técnica, incentivo à adoção de tecnologias sustentáveis e acesso a mecanismos inovadores, como o mercado de carbono. Além disso, o Programa busca fortalecer a segurança hídrica, contribuir para a conservação do Cerrado e posicionar o Distrito Federal como referência nacional em estratégias de adaptação às mudanças climáticas no setor agropecuário.

Material e Métodos

O Programa Emater-DF no Clima foi lançado em 11 de setembro de 2024, em alusão ao Dia do Cerrado. Trata-se de uma iniciativa estratégica que busca integrar ações de adaptação no meio rural, alinhando a produção agropecuária, a conservação ambiental e a geração de novas oportunidades econômicas, especialmente no contexto dos mercados de serviços ambientais e de carbono.

A fase inicial do Programa concentrou-se no levantamento da situação ambiental das sub-bacias hidrográficas do Distrito Federal, com abordagem territorial. A definição das áreas prioritárias considerou, entre outros aspectos, a situação fundiária dos imóveis rurais, a presença de passivos ambientais, o grau de conservação da vegetação nativa e a relevância das áreas para a proteção de recursos hídricos. Nesse processo, foi fundamental o uso do sistema de georreferenciamento Terrageo, da Companhia Imobiliária de Brasília (Terracap), que possibilitou a análise espacial detalhada e a identificação de regiões com maior potencial para intervenção.

Com base nesse levantamento, foi possível estabelecer as regiões do Distrito Federal que estão aptas para execução dos dois eixos operacionais do Programa: o Projeto Plantar Cerrado e o Projeto Fazendas de Carbono. O Projeto Plantar Cerrado tem

como finalidade fomentar a adoção de práticas conservacionistas, tais como recomposição de vegetação nativa, manejo adequado do solo, implantação de bacias de infiltração, terraceamento e proteção de nascentes e áreas de preservação permanente. Essas ações visam não apenas a adequação ambiental das propriedades, mas também a melhoria da quantidade e qualidade da água, contribuindo diretamente para a segurança hídrica regional.

Complementarmente, o Projeto Fazendas de Carbono direciona-se à identificação e estruturação de imóveis rurais com potencial de inserção no mercado de carbono. A iniciativa envolve a avaliação técnica das áreas, a quantificação de estoques e fluxos de carbono, bem como o desenvolvimento de projetos aptos à certificação por padrões reconhecidos, viabilizando a comercialização de créditos de carbono em mercados voluntários e regulados. Dessa forma, o Programa amplia as possibilidades de geração de renda aos produtores, associando conservação ambiental a mecanismos econômicos inovadores.

A operacionalização das ações ocorre em etapas integradas, iniciando-se com o levantamento por imagens de satélite para identificação de áreas prioritárias, seguido de visitas técnicas de campo realizadas por equipe especializada. Essas visitas têm como objetivo validar as informações obtidas remotamente, caracterizar as propriedades rurais e promover a sensibilização e o engajamento dos produtores. A partir desse diagnóstico, são definidos planos de intervenção individualizados, considerando critérios técnicos, legais e produtivos.

As metas estabelecidas incluem a ampliação da cobertura vegetal, a recuperação de áreas degradadas, a adoção de práticas conservacionistas do solo e da água e a implantação de soluções de saneamento rural. Ao participar do Programa, o produtor rural passa a ser reconhecido como prestador de serviços ambientais e agente ativo na proteção do clima, sendo incentivado a incorporar boas práticas agrícolas que promovam a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

Nesse contexto, evidencia-se a necessidade de suporte técnico contínuo e de mecanismos de financiamento que viabilizem a implementação das ações propostas. O apoio institucional é fundamental para garantir a adesão dos produtores e a efetividade das intervenções, especialmente diante dos custos associados à adequação ambiental e à transição para práticas mais sustentáveis.

Com caráter pioneiro, o Programa Emater-DF no Clima inaugura uma nova abordagem no enfrentamento das mudanças climáticas no Distrito Federal, ao articular assistência técnica, inovação, instrumentos econômicos e políticas públicas. Ao promover a inserção dos produtores rurais no mercado de carbono, a iniciativa contribui para a construção de um modelo de desenvolvimento rural resiliente, de baixo carbono e alinhado às demandas contemporâneas de sustentabilidade.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos evidenciam a consolidação de uma agenda institucional voltada à adaptação às mudanças climáticas no meio rural do Distrito Federal, em consonância com a missão da Emater-DF de promover o desenvolvimento econômico, social e ambiental por meio da assistência técnica e extensão rural. A atuação das engenheiras ambientais, em articulação com equipes multidisciplinares, demonstrou a importância da integração entre capacitação técnica, planejamento territorial e construção de parcerias estratégicas para a efetividade das ações.

A visita técnica ao município de Extrema-MG, para conhecer o Projeto Conservador das Águas, representou um marco na fase de concepção do Programa Emater-DF no Clima. A imersão nesse Projeto permitiu a análise de um modelo consolidado de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), baseado em instrumentos econômicos e na adesão voluntária dos produtores rurais. Observou-se que a priorização de ações preventivas, como a proteção de nascentes e recomposição florestal resulta em ganhos ambientais consistentes e duradouros. Além disso, a governança local estruturada, associada à continuidade administrativa do projeto, foi identificada como fator crítico de sucesso. Esses elementos serviram de referência para a adaptação metodológica no contexto do Distrito Federal, especialmente quanto à necessidade de institucionalização e escalabilidade das ações.

No DF, as visitas técnicas à bacia do rio São Marcos e às regiões do Recanto do Buriti e Córrego Crispim contribuíram para o aprofundamento do levantamento territorial em áreas estratégicas. A bacia do rio São Marcos, caracterizada por conflitos pelo uso da água entre irrigação agrícola e geração de energia, evidenciou a complexidade da gestão integrada de recursos hídricos. A identificação de propriedades rurais inseridas nessas áreas, atendidas pela Emater-DF, possibilitou mapear demandas específicas, como adequação ambiental, uso eficiente da água e adoção de práticas conservacionistas. Essas informações são fundamentais para a definição de áreas prioritárias de intervenção e para a customização das ações do Programa, reforçando a necessidade de abordagens territorializadas.



Figura 01: Propriedade rural localizada na Bacia Hidrográfica do rio São Marcos.
Fonte: Emater-DF (2024)

Após as visitas técnicas, foi concebido o Programa Emater-DF no Clima e, em 11 de setembro de 2024, realizado seu lançamento, o qual constituiu um relevante avanço institucional ao formalizar uma estratégia estruturada de adaptação climática no meio rural. O Programa está estruturado em múltiplos eixos de atuação, incluindo capacitação de produtores e técnicos, incentivo à adoção de tecnologias sustentáveis, promoção de serviços ambientais e inserção no mercado de carbono. Entre os projetos estruturantes, destacam-se o Plantar Cerrado, voltado às práticas conservacionistas, recomposição de vegetação nativa e recuperação de áreas degradadas, e as Fazendas de Carbono, com foco na mensuração, certificação e comercialização de créditos de carbono. A participação da Emater-DF em conselhos deliberativos também amplia sua capacidade de influência na formulação de políticas públicas, contribuindo para a institucionalização da agenda climática. Na ocasião do lançamento foi apresentado o selo do Programa:



Figura 02: Selo do Programa Emater-DF no Clima.
Fonte: Emater-DF (2024)

A ampla divulgação do Programa nos meios de comunicação desempenhou papel estratégico na sensibilização de produtores rurais e na atração de parceiros institucionais. Esse processo de comunicação contribuiu para ampliar a compreensão sobre a relevância das práticas conservacionistas e das oportunidades associadas ao mercado de carbono. Inserido em um contexto global de intensificação do debate climático, reforçado pela realização da COP30 no Brasil em 2025, o Programa se apresenta como uma iniciativa alinhada às diretrizes internacionais, fortalecendo o protagonismo local na implementação de soluções práticas para adaptação.

Em outubro de 2024 ocorreu a visita à Reserva Legado Verdes do Cerrado, em Niquelândia-GO, que proporcionou aprofundamento técnico sobre projetos de carbono no bioma Cerrado, especialmente no âmbito do desmatamento evitado conhecido como mecanismo REDD+. A análise das etapas de estruturação do projeto, incluindo inventário florestal, monitoramento, validação e certificação, evidenciou os requisitos técnicos e institucionais necessários para inserção no mercado de carbono. Observou-se que, além dos benefícios ambientais, há potencial significativo de geração de receita a partir da comercialização de créditos, o que pode representar uma alternativa econômica para produtores rurais do Distrito Federal. Contudo, também foram identificados desafios, como a necessidade de capacitação técnica especializada, custos iniciais elevados e complexidade regulatória.

Logo em seguida, em novembro de 2024, realizou-se o "I Seminário Emater-DF no Clima: A solução para as mudanças climáticas está no campo!", consolidando-se como espaço de articulação e difusão de conhecimento. A participação de aproximadamente 70 pessoas, entre técnicos, estudantes e representantes institucionais, permitiu o intercâmbio de experiências e a discussão de temas estratégicos, como práticas agrícolas resilientes, conservação hídrica e mercado de carbono. O evento

contribuiu para o fortalecimento de redes de cooperação e para a sensibilização de diferentes atores sobre o papel do meio rural no enfrentamento das mudanças climáticas.

No ano de 2025, foram definidas novas áreas prioritárias e estruturado um projeto piloto, além da realização de tratativas com produtores rurais, consolidação de uma lista de interessados, estabelecimento de parcerias e elaboração de questionário a ser aplicado aos produtores, com o objetivo de avaliar a percepção quanto às mudanças climáticas. A articulação entre conhecimento técnico, planejamento territorial e instrumentos econômicos mostrou-se fundamental para a efetividade das iniciativas.

Considerações Finais

Ao longo de sua trajetória institucional, iniciada em 1978, a Emater-DF consolidou sua atuação na prestação de assistência técnica e extensão rural, incorporando progressivamente a dimensão ambiental em suas atividades. A partir dos anos 2000, observa-se a intensificação dessa abordagem, com destaque para iniciativas relacionadas à gestão ambiental, como a participação no Programa Produtor de Água, o apoio ao licenciamento ambiental de atividades agropecuárias e a promoção de práticas adequadas de destinação de resíduos, incluindo embalagens de agrotóxicos.

A inserção de profissionais com formação em engenharia ambiental no quadro técnico, iniciada em 2010 e ampliada a partir de 2014, representa um marco na consolidação de uma abordagem interdisciplinar na instituição. Esse movimento reforça o compromisso da Emater-DF com a qualificação de suas ações e com a incorporação de conhecimentos técnicos especializados voltados à sustentabilidade ambiental.

Nesse contexto, destaca-se o Programa Emater-DF no Clima idealizado pelas extensionistas rurais com formação em Engenharia Ambiental, Anne Caroline e Icléa Silva, que, em articulação com os demais profissionais da instituição, têm desempenhado papel relevante na implementação de políticas ambientais e no fortalecimento de iniciativas voltadas ao enfrentamento das mudanças climáticas.

As evidências apresentadas demonstram que a construção e implantação do Programa Emater-DF no Clima configuram um avanço institucional relevante na incorporação da agenda de adaptação climática à assistência técnica e extensão rural no Distrito Federal. O processo de estruturação do Programa, fundamentado em diagnósticos de campo, definição de áreas prioritárias, articulação com produtores rurais e estabelecimento de parcerias, permitiu a consolidação de uma abordagem integrada, que alia conhecimento técnico, planejamento territorial e instrumentos econômicos.

Como resultado, observa-se o fortalecimento da capacidade institucional para atuação em temas relacionados às mudanças climáticas, bem como a ampliação do entendimento dos produtores quanto à adequação ambiental de suas propriedades e à gestão sustentável dos recursos naturais, especialmente no que se refere às bacias hidrográficas. A fase de implantação evidencia o papel estratégico da atuação interdisciplinar no assessoramento técnico, na estruturação de projetos e na promoção de práticas conservacionistas, contribuindo para a integração entre produção agropecuária e conservação ambiental. Destaca-se, nesse contexto, o potencial do Programa para inserção dos produtores em novas dinâmicas econômicas, como o mercado de carbono, reforçando o reconhecimento do produtor rural como agente ativo na adaptação às mudanças climáticas.

Por fim, a consolidação do Programa Emater-DF no Clima depende da continuidade dos investimentos na capacitação do corpo técnico, do fortalecimento de parcerias interinstitucionais e do aprimoramento dos mecanismos de monitoramento e avaliação. A institucionalização de uma política contínua de adaptação climática no meio rural mostra-se, portanto, essencial para assegurar a resiliência dos sistemas produtivos, a sustentabilidade dos recursos naturais e a efetividade das ações desenvolvidas no âmbito da assistência técnica e extensão rural no Distrito Federal.

Agradecimentos

As autoras e idealizadoras do Programa Emater-DF no Clima gostariam de agradecer a Deus, pelo dom da vida, ao Presidente da Emater-DF Cleison Medas Duval e Diretora-executiva Loiselene Carvalho da Trindade pelo incentivo e apoio recebidos.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Programa Produtor de Água. Disponível em:<https://www.gov.br/ana/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programa-produtor-de-agua>. Acesso 09/04/2026.

CONSERVADOR DAS ÁGUAS. Disponível em:< https://conservadordasaguas.extrema.mg.gov.br/>. Acesso em 09/04/2026.

GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL – SECRETARIA DE ESTADO DE ECONOMIA. Relatório de Gestão 2025 – Prestação de Contas Anual do Governo – Anexo IV. Disponível em: https://www.economia.df.gov.br/rge. Acesso em 24/04/2026.

ANÁLISE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DA PARAÍBA COM BASE EM TÉCNICAS DE AGRUPAMENTO

1 Joaquim José de Sousa Neto, 2 Mateus do Nascimento Rodrigues, 3 Madson Tavares Silva
1Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: Joaquim.sousa@estudante.ufcg.edu.br; 2Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: te.us.13@hotmail.com; 3Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: madson.tavares@professor.ufcg.edu.br

Palavras-chave: Precipitação; Análise espacial; Agrupamento.

Introdução

A precipitação pluvial apresenta uma grande variabilidade espacial no estado da Paraíba, influenciada diversos fatores geográficos e pela atuação de diferentes sistemas atmosféricos. Essa variabilidade impacta diretamente o planejamento hídrico, especialmente em regiões semiáridas, onde a irregularidade das chuvas representa um desafio significativo para o desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, a análise espacial da precipitação torna-se uma ferramenta essencial para compreender padrões climáticos e subsidiar a gestão dos recursos hídricos no estado.

Material e Métodos

O presente estudo tem como objetivo analisar a distribuição espacial da precipitação no estado da Paraíba por meio da aplicação de métodos de agrupamento hierárquico, visando identificar padrões regionais de similaridade pluviométrica.

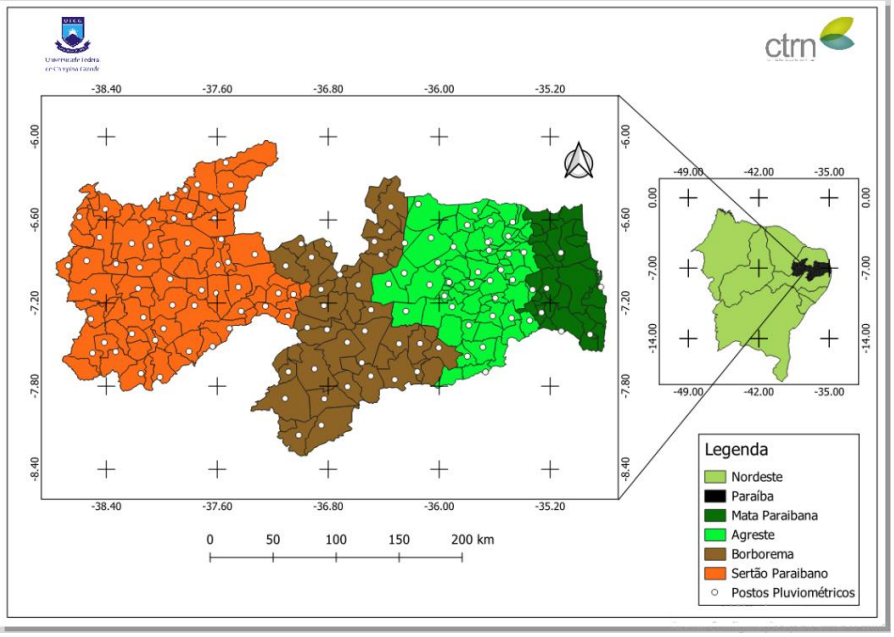


Figura 01: Localização do estado da Paraíba, mesorregiões e postos pluviométricos. Fonte: Autor (2026)

A área de estudo compreende todo o território paraibano, caracterizado por forte heterogeneidade climática e inserção parcial no semiárido brasileiro. Foram utilizados dados de precipitação anual provenientes de 124 postos pluviométricos distribuídos no estado, referentes ao período de 1994 a 2025, disponibilizados pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA).

Inicialmente, foi avaliada a dependência espacial dos dados por meio do Índice Global de Moran I, permitindo verificar o grau de autocorrelação espacial da precipitação. Em seguida, aplicou-se o método de agrupamento hierárquico de Ward, que possibilita a formação de grupos com mínima variabilidade interna, a partir da análise da distância entre os dados. Essa abordagem permite identificar regiões com comportamento pluviométrico semelhante, contribuindo para uma melhor compreensão da organização espacial da chuva.

Resultados e Discussão

Os resultados evidenciaram a formação de sete grupos homogêneos de precipitação, distribuídos de forma coerente com as características climáticas regionais. Observou-se que áreas do Sertão apresentaram maior extensão espacial e uniformidade pluviométrica, enquanto regiões litorâneas registraram maiores acumulados anuais. Por outro lado, áreas da Borborema destacaram-se pelos menores índices de precipitação, evidenciando a influência de fatores orográficos do estado.

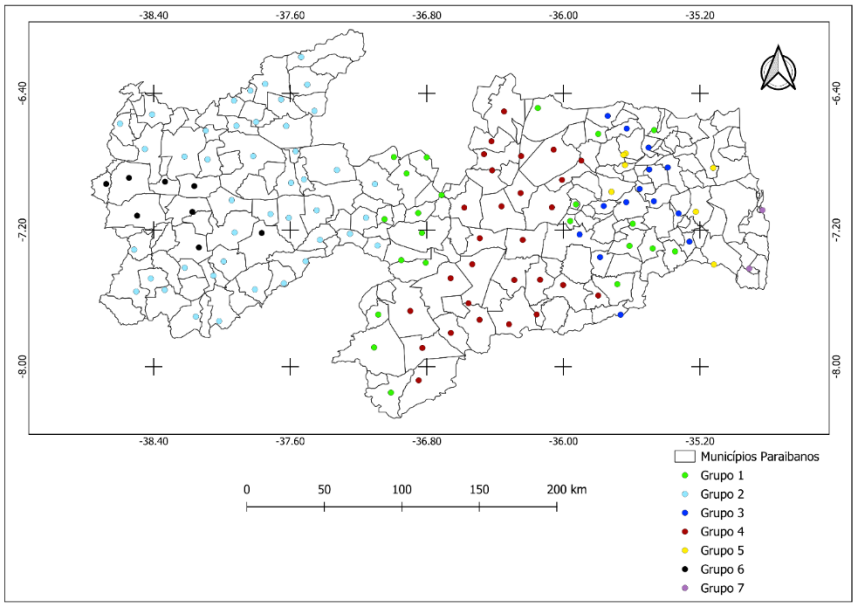


Figura 02: Grupos homogêneos de precipitação pluvial anual no estado da Paraíba. Fonte: Autor (2026)

A análise espacial revelou ainda que regiões geograficamente próximas podem apresentar padrões distintos de precipitação, reforçando a complexidade climática do estado. A aplicação do método de agrupamento mostrou-se eficiente na identificação de padrões regionais, constituindo uma ferramenta importante para estudos climatológicos e ambientais.

Considerações Finais

Dessa forma, os resultados obtidos contribuem para o avanço do conhecimento sobre a variabilidade espacial da precipitação na Paraíba, oferecendo subsídios relevantes para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, bem como para a mitigação de impactos associados à variabilidade climática no semiárido.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e à Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA) pelo apoio e fornecimento dos dados utilizados.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, H. A.; FARIAS, M. P. Potencial de captação de água de chuva no semiárido paraibano. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2015.

ARAÚJO, H. A. et al. Influência da Zona de Convergência Intertropical e dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis na precipitação do Nordeste. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2017. Anais [...]. 2017.

CHAGAS NETO, J. Variabilidade espaço-temporal da precipitação no Brejo paraibano. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2016.

GOMES, H. B. Modelagem estocástica da variação espacial da precipitação na Paraíba. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

MEDEIROS, R. M. Eventos extremos de precipitação em João Pessoa. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2018.

MEDEIROS, R. M. et al. Regimes de precipitação no Agreste e Zona da Mata da Paraíba. Revista Brasileira de Climatologia, 2015.

MOURA, M. S. B. Importância do complexo Coremas–Mãe d'Água para o desenvolvimento regional. João Pessoa: Governo do Estado da Paraíba, 2007.

NASCIMENTO, F. J.; ALVES, J. M. B. Ecoclimatologia do Cariri paraibano. Revista Brasileira de Meteorologia, 2008.

OLIVEIRA, R. S. Eventos de chuva no Alto Sertão da Paraíba. Cajazeiras: Universidade Federal de Campina Grande, 2020.

RODRIGUES, R. R. Caracterização dos reservatórios hídricos da Paraíba. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2009.

SANTOS, C. A. C. Distribuição espacial das chuvas no estado da Paraíba. Revista Brasileira de Meteorologia, 2009.

SILVA, J. A. Variabilidade pluviométrica na microrregião de Campina Grande. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2021.

SOUZA, L. F. Variabilidade espacial da precipitação na Paraíba. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2022.

XAVIER, T. M. B. S. Análise espacial das chuvas na bacia do rio Taperoá, região semiárida da Paraíba. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 9, n. 5, p. 1357–1369, 2016.

ESTRATÉGIAS DE ENFRENTAMENTO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA CONFORTO TÉRMICO NAS ÁREAS URBANAS DE DOURADOS - MS

1 João Victor Alves Freire, 2 Rosa Maria Farias Asmus

[1] Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), e-mail: joaovictoralves.jvaf@gmail.com; [2] Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), e-mail: rosaasmus@uems.br

Palavras-chave: Conforto térmico; Ilhas de calor urbanas; Mudanças climáticas

Introdução

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios da atualidade. O serviço de Mudanças Climáticas Copernicus (C3S) da União Europeia confirmou que 2023 foi o ano mais quente já registrado no planeta, estando em média 1,48 graus Celsius acima do período pré-industrial de 1850 a 1900 (Abnett, 2024). Esse aquecimento global intensifica a ocorrência de eventos climáticos extremos, como as ondas de calor, com impactos desproporcionais sobre populações vulneráveis (Geirinhas, 2016).

Em áreas urbanas, o fenômeno das Ilhas de Calor Urbanas (ICUs) agrava ainda mais esse cenário. As ICUs são caracterizadas pela elevação das temperaturas em zonas urbanizadas em comparação com as áreas rurais adjacentes, resultado da substituição de superfícies vegetadas por concreto e asfalto, da ausência de arborização e da emissão de calor por veículos e sistemas de climatização (Lombardo, 1985; Bidone, 1999). Em bairros periféricos, onde a infraestrutura é precária e a renda é baixa, esse desconforto se torna ainda mais severo, comprometendo a saúde, a produtividade e a qualidade de vida da população (Gomes, 2012).

Em Dourados, no Estado de Mato Grosso do Sul, classificado com clima Cwa (mesotérmico úmido, verões quentes e invernos secos), os dados dos Boletins Agrometeorológicos da Embrapa (2022, 2023, 2024) revelam um aumento progressivo e preocupante nas temperaturas, com médias mensais superando em até 4ºC a média histórica dos últimos anos. Diante desse contexto, torna-se urgente a identificação e a análise de estratégias de enfrentamento ao calor urbano que sejam acessíveis, eficazes e aplicáveis à realidade socioeconômica local.

Material e Métodos

A pesquisa foi conduzida por meio de uma abordagem mista, estruturada em três etapas complementares.

A primeira etapa consistiu em uma revisão bibliográfica em livros e artigos científicos sobre mudanças climáticas, ilhas de calor urbanas e estratégias de adaptação em ambientes urbanos, visando identificar soluções potencialmente aplicáveis à realidade de Dourados-MS.

A segunda etapa envolveu pesquisa de campo, por meio de observação sistemática em bairros periféricos de Dourados-MS, com foco em padrões estruturais do ambiente construído relacionados ao conforto térmico. A técnica de observação, fundamentada em Danna e Matos (2015), permitiu registrar aspectos da realidade urbana como a presença ou ausência de arborização, os materiais de construção predominantes nas edificações e as condições de sombreamento e ventilação natural nas vias públicas.

A terceira etapa consistiu na análise e organização dos dados coletados, com a identificação de padrões e a seleção das estratégias mais pertinentes para a promoção do conforto térmico urbano, considerando o contexto socioeconômico da população estudada. Como produto complementar, foi elaborado material de apoio para ações de extensão voltadas a populações vulneráveis, a ser utilizado pela UEMS ou pelo Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária.

Resultados e Discussão

Os dados meteorológicos de Dourados, sistematizados na Tabela 01, evidenciam o aumento das temperaturas e a instabilidade das precipitações observadas entre 2022 e 2024.

Tabela 01: Variações de temperaturas médias e precipitação em Dourados-MS, 2022-2024.

Período	Temp. Média (°C)	Desvio da Média Histórica	Precipitação (mm)
Jan/2022	27,4	+2°C acima da média de 22 anos	56 (média histórica: 165 mm)
Ago/2023	23,0	+2°C acima da média de 23 anos	136 (média histórica: 54 mm)
Mar/2024	27,5	+2°C acima da média de 24 anos	38 (média histórica: 139 mm)
Jun/2024	23,0	Quase +4°C acima da média histórica	1,2 (um dos menores índices registrados)

Fonte: Infoteca Embrapa (2022, 2023, 2024a, 2024b).

A observação de campo nos bairros periféricos permitiu registrar as condições do ambiente construído: baixa densidade de arborização nas calçadas e lotes, predominância de telhas de fibrocimento nas habitações populares, ausência de dispositivos de sombreamento de fachadas e pavimentação de alta absortância solar nas vias públicas. Essas características físicas do espaço urbano contribuem diretamente para a intensificação do desconforto térmico nessas áreas.

A partir da revisão bibliográfica e da análise dos dados de campo, foram identificadas três categorias principais de estratégias técnicas de baixo custo com elevado potencial de aplicação em Dourados-MS. A primeira delas é o uso de materiais refletivos, como tintas térmicas, telhas de alta refletância e pavimentos com maior albedo, que reduzem a absorção de calor solar e podem diminuir a temperatura interna dos edifícios em até 5°C (Silva et al., 2020). Para habitações populares, a telha cerâmica porosa clara destaca-se como a opção mais viável, apresentando refletância de aproximadamente 0,54, superior ao fibrocimento, e custo acessível (Michels; Güths; Marinoski, 2019). Internacionalmente, o programa Cool Pavement de Los Angeles (EUA) pintou ruas com tinta refletiva CoolSeal, alcançando reduções de até 10°C na temperatura superficial do asfalto (ArchDaily, 2018), como ilustrado na Figura 01 abaixo.



Figura 01: Aplicação do Cool Pavement em ruas de Los Angeles, EUA, como estratégia de mitigação do calor urbano.
Fonte: ARCHDAILY (2019)

A arborização urbana constitui outra estratégia de grande relevância, uma vez que as árvores atuam como moderadoras microclimáticas ao oferecer sombreamento e promover a evapotranspiração, podendo reduzir a temperatura ambiente em até 8°C em áreas densamente urbanizadas (EcoCasa, 2023). Além de combater as ICUs, a vegetação melhora a qualidade do ar e contribui para o equilíbrio hídrico do solo. A Figura 02 apresenta o registro de uma edificação em Dourados-MS com brise-soleil instalado na fachada e telhado branco, combinando duas estratégias de resfriamento passivo em contexto local real.



Figura 02: Casa com brise-soleil e telhado branco em Dourados-MS, 2025.
Fonte: Autoria própria

Complementarmente, as tecnologias de resfriamento passivo se destacam como alternativas sustentáveis e de baixo custo. Os brises-soleils, dispositivos de sombreamento de fachada, reduzem a carga térmica interna em até 40% sem consumo de energia (Costa, 2017). Já o resfriamento evaporativo com materiais naturais, como a bucha vegetal (Luffa cylindrica), demonstrou eficiência superior à de aparelhos convencionais em pesquisas realizadas na UFMG (Oliveira, 2007), enquanto experimentos com câmaras de adobe na UFMS alcançaram reduções de até 13°C na temperatura interna sem uso de energia elétrica (Cassundé, 2024). Todas essas estratégias apresentam maior eficácia quando combinadas entre si, configurando uma abordagem sinérgica capaz de transformar o microclima urbano de forma sustentável e equitativa.

Considerações Finais

Os objetivos desta pesquisa foram plenamente atingidos. O estudo demonstrou que existem estratégias viáveis, de baixo custo e alta eficiência para mitigar o desconforto térmico nos bairros periféricos de Dourados-MS, especialmente relevantes para a população de baixa renda que enfrenta de forma mais intensa os efeitos das mudanças climáticas e das ilhas de calor urbanas.

Entre as estratégias analisadas, a arborização urbana emergiu como a mais completa e multifuncional; as telhas cerâmicas porosas claras como a solução mais acessível e eficiente para coberturas populares; os brises-soleils como intervenção eficaz no controle da radiação solar direta; e o resfriamento evaporativo com materiais naturais como alternativa sustentável e inovadora. Contudo, para que essas soluções alcancem seu potencial máximo, é fundamental que transcendam a esfera individual e sejam incorporadas em políticas públicas de planejamento urbano, incluindo um plano municipal de arborização e a revisão de códigos de obras para incentivar o uso de materiais e designs bioclimáticos.

Recomenda-se, para a continuidade da pesquisa, a implementação de projetos-piloto para monitoramento quantitativo do desempenho dessas estratégias em campo, bem como a análise dos fatores socioeconômicos que podem facilitar ou dificultar sua adoção em larga escala.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), ao CNPq e à PROPPI/UEMS pelo apoio financeiro por meio do Edital UEMS/CNPq Nº 01/2024 – PIBIC, que tornou possível o desenvolvimento desta pesquisa de Iniciação Científica.

Referências Bibliográficas

ABNETT, K. 2023 é o ano mais quente já registrado, confirma serviço climático da UE. Reuters, Bruxelas, 9 jan. 2024. Disponível em: https://www.reuters.com. Acesso em: 21 nov. 2024.

ARCHDAILY. Los Angeles está pintando suas ruas de branco para combater o aumento da temperatura. 2018. Disponível em: https://www.archdaily.com.br. Acesso em: 21 nov. 2024.

BIDONE, E. D. Ecologia urbana e resíduos. São Paulo: Oficina de Textos, 1999.

CASSUNDÉ, C. C. de M. Avaliação do comportamento higrotérmico de um resfriador evaporativo em adobe. 2024. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) — Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2024.

COSTA, A.; ALMEIDA, P. Estratégias de resfriamento passivo para cidades tropicais. Revista Brasileira de Conforto Ambiental, v. 18, n. 2, p. 45-61, 2023.

ECOCASA. A importância da arborização urbana para o conforto térmico. EcoCasa Arquitetura Sustentável, 2023. Disponível em: https://www.ecocasa.arq.br. Acesso em: 21 nov. 2024.

EMBRAPA AGROPECUÁRIA OESTE. Boletim Agrometeorológico, fev. 2022; ago. 2023; mar. 2024a; jun. 2024b. Dourados, MS: Embrapa Agropecuária Oeste. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br. Acesso em: 20 nov. 2024.

GEIRINHAS, J. Ondas de calor e saúde. Lisboa: Instituto Nacional de Saúde Doutor Ricardo Jorge, 2016.

GOMES, M. A. S. Habitação e desconforto térmico em áreas urbanas periféricas. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 4, n. 2, p. 193-202, 2012.

LOMBARDO, M. A. Ilha de calor urbana: o exemplo de São Paulo. São Paulo: Hucitec, 1985.

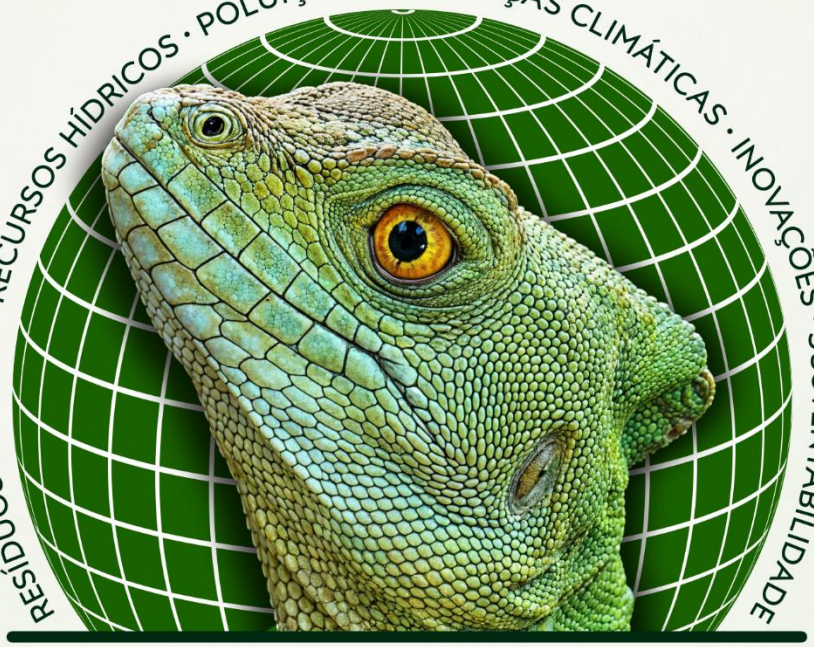
MICHELS, C.; GÜTHS, S.; MARINOSKI, D. L. Análise da influência da umidade no desempenho térmico de telhas cerâmicas. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2019. Anais... p. 1493-1502, 2019.

OLIVEIRA, A. M. de. Climatização por resfriamento evaporativo: estudo teórico e experimental de protótipos. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SILVA, R.; ALVES, M.; GOMES, C. Uso de tintas térmicas e coberturas refletivas para mitigação do calor urbano. Revista Nacional de Engenharia Climática, v. 12, n. 4, p. 33-48, 2020.

ÁREA TEMÁTICA 21

POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE
ENGENHARIA AMBIENTAL

ANÁLISE DO APRISIONAMENTO E TRANSPORTE ADVECTIVO DO OZÔNIO TROPOSFÉRICO SOB INFLUÊNCIA DE SISTEMAS FRONTAIS NA REGIÃO DE ITABORAÍ-RJ.

1 Carlos Felipe de Jesus Lauriano Antonio, 2 Daniela Montanari Migliavacca Osório, 3 Marcio Barreiro de Souza Gonçalves, 4 Renato Alvares Santiago, 5 Sérgio Gonçalves Rodrigues dos Reis, 6 Thaisi Caroline Tavares Oliveira

1 Ambiental RB, e-mail: carlos.antonio@ambientalrb.com; 2 Ambiental RB, e-mail: daniela.migliavacca@ambientalrb.com; 3 Ambiental RB, e-mail: márcio.barreiro@ambientalrb.com; 4 Ambiental RB, e-mail: renato.santiago@ambientalrb.com; 5 Ambiental RB, sergio.reis@ambientalrb.com; 6 Ambiental RB, e-mail: thaisi.tavares@ambientalrb.com

Palavras-chave: Qualidade do ar; Sistema Frontal; Meteorologia.

Introdução

O monitoramento do ozônio troposférico (O_3) é fundamental para a avaliação da qualidade do ar, uma vez que esse poluente secundário é formado por reações fotoquímicas envolvendo óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COV), na presença de radiação solar, estando diretamente associado a impactos adversos à saúde humana. No Brasil, o monitoramento de O_3 tem se mostrado essencial diante da complexidade de sua formação e dos impactos associados à saúde e ao clima. Estudos realizados na Região Metropolitana do Rio de Janeiro demonstram que o ozônio troposférico apresenta comportamento complexo, fortemente influenciado por condições meteorológicas, transporte regional de poluentes e dinâmica fotoquímica. Estudos mais recentes indicam que ultrapassagens dos padrões de qualidade do ar ocorrem ao longo de todo o ano na região metropolitana, com maior intensidade em períodos quentes e secos, evidenciando a influência sazonal e a necessidade de ampliação da rede de monitoramento (SILVA et al., 2021; BOARI et al., 2023). Oliveira et al. (2021) relataram que análises baseadas em modelagem e séries temporais indicam que variáveis como radiação solar, temperatura e a interação com NO_x são determinantes para a variabilidade do O_3 na região do Rio de Janeiro, evidenciando seu caráter fotoquímico. Em escala regional, análises espaciais também demonstram variabilidade significativa das concentrações de O_3 em função de fatores meteorológicos e fontes locais de emissão, como observado no Nordeste brasileiro (SOUZA et al., 2024). Nesse contexto, o monitoramento contínuo da qualidade do ar e dos parâmetros meteorológicos constitui uma importante atividade executada pela Ambiental RB. Essa atividade está presente em diversos estados do Brasil, dentre eles Minhas Gerais, Rio Grande do Sul e Pará. O presente estudo teve sua origem na rotina de avaliação operacional da equipe técnica da Ambiental RB, a partir da observação de comportamentos atípicos nas concentrações de O_3 em períodos distintos do monitoramento nas estações de qualidade do ar na região de Itaboraí/RJ, em que determinados picos de concentração não condiziam com o ciclo fotoquímico do poluente como esperado. Essa percepção, fundamentada na análise direta de dados provenientes de sensores e analisadores, motivou a investigação acerca da influência de sistemas sinóticos na modulação das concentrações de ozônio, especialmente por meio de mecanismos de transporte regional e aprisionamento pós-frontal.

Metodologia

O O_3 foi medido em um analisador automático O42e, fabricante ENVEA, através do método de análise por absorção ultravioleta, a faixa de medição é de 0 a 10 ppm, limite de detecção de 0,2 ppb, resolução de 0,1 ppb, com certificação ISO 13964/1998, EN 14625/2012 e EN15267/2017. Para a realização deste diagnóstico, foram utilizados os dados horários disponibilizados pelo Instituto Estadual do Ambiente através do Portal SigQAr (INEA, 2026) na região de Itaboraí/RJ. A análise seguiu os critérios de representatividade estabelecidos pelo Guia de Monitoramento da Qualidade do Ar do Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2019). De um total de 31 dias monitorados em maio/2025, 29 apresentaram comportamento fotoquímico padrão e 1 evento anômalos, entre os dias 10, 11 e 12, foi selecionado para análise aprofundada, que representa as dinâmicas meteorológicas observadas que caracterizam esse comportamento atípico: O evento tem duração de 72 horas. A análise dos dados foi descrita utilizando o processamento dos dados realizado com a linguagem de programação Python, com a utilização das bibliotecas adequadas para o tratamento das séries temporais, geração dos meteogramas com resolução de três horas, além das rosas de poluentes que relacionam a direção do vento com as faixas de concentração de ozônio no período indicado. Como parâmetros meteorológicos, foram utilizados temperatura do ar (°C), pressão atmosférica (hPa), direção e velocidade do vento (m/s, graus) e umidade relativa do ar (%), também provenientes da mesma estação de monitoramento. Além das cartas sinóticas do Centro de Hidrografia da Marinha.

Resultado e discussão

Na presença de radiação (hv), o O_3 troposférico é formado pela fotólise do NO_2. Segundo Finlaysson-Pitts e Pitts (2000), no ciclo fundamental, há a dissociação do NO_2 e a formação do oxigênio atômico. Esse oxigênio se combina com o O_2 e, assim, se forma o O_3 (Equação 1). No período noturno, com a ausência de radiação, o ozônio é consumido a partir da titulação com o monóxido de nitrogênio e há a regeneração do dióxido de nitrogênio.

$$NO_2 + hv\ (\lambda < 424nm) \rightarrow NO + O_3 \text{ (Equação 1)}$$
$$O(^3P) + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$$

Onde M é a terceira molécula inerte que esteja ao redor da colisão e ^3P é o estado eletrônico do átomo de oxigênio.

$$O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2 \text{ (Equação 2)}$$

Sob condições padrão, o ciclo fotoquímico se comporta perfeitamente, como observado na série temporal evidenciada na Figura 1. Nos dez primeiros dias, o poluente apresenta comportamento cíclico: picos diurnos seguidos por acentuado declínio noturno, chegando a valores próximos a 10 µg/m^3 em decorrência do processo de titulação pelo monóxido de nitrogênio na ausência de luz.

Contudo, é perceptível anomalias significativas nos dias 10 e 23 de maio, coincidindo com a chegada de sistemas frontais. Nestes dias, ocorre uma inversão no padrão de consumo do ozônio no período noturno; as concentrações permanecem elevadas. Esse fenômeno pode estar associado ao aprisionamento do ozônio após o estabelecimento de condições atmosféricas estáveis no período pós-frontal, onde a massa de ar frio e estável comprime a camada de mistura, dificultando a dispersão vertical e horizontal do poluente, favorecendo a persistência de concentrações elevadas de O_3 (OLIVEIRA et al., 2021).

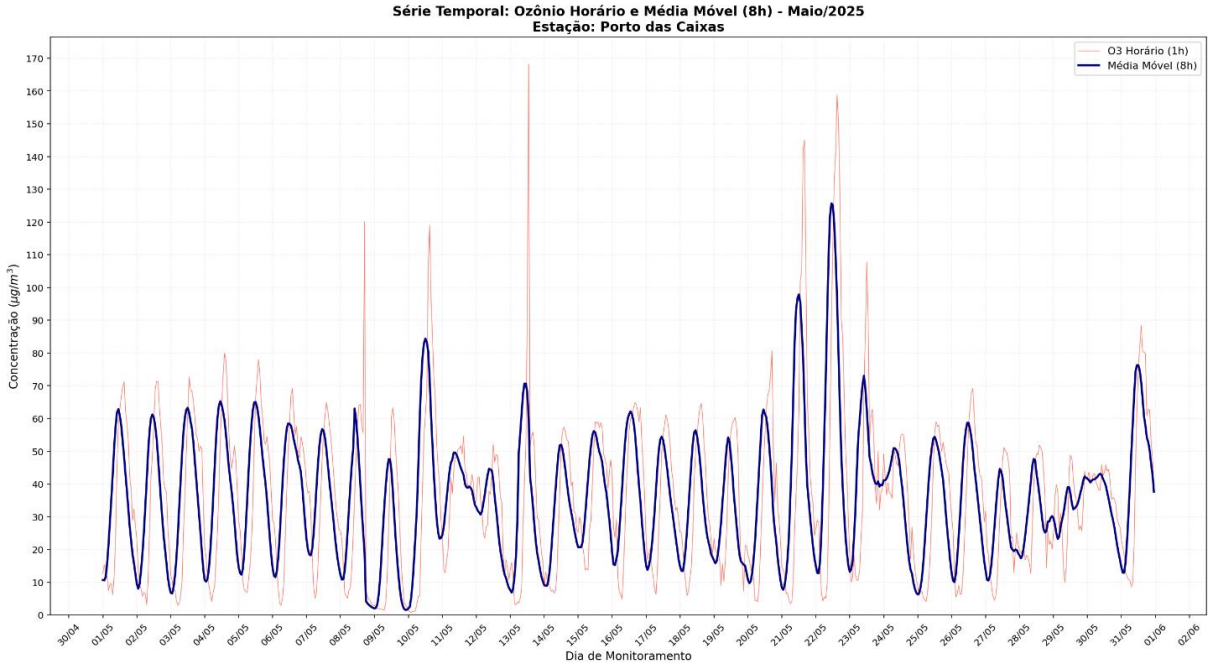


Figura 1: Série temporal das concentrações de ozônio e média móvel (8h) para o mês de maio de 2025, Itaboraí-RJ. Fonte: Autor.

A Figura 2 é composta pelo meteograma e a carta sinótica de superfície da Marinha do Brasil (CHM), às 12Z, referentes ao episódio do dia 10 de maio de 2025. Nela, observa-se que os parâmetros meteorológicos apresentam a assinatura clássica da chegada de um sistema frontal: queda acentuada da temperatura do ar, aumento no valor da pressão, inversão no regime de ventos (do quadrante norte para o sul) e o registro de precipitação. Essa convergência de dados comprova, de forma inequívoca, a incursão da frente fria e a subsequente estabilização da massa de ar pós-frontal sobre a região (REBOITA et al., 2010).

A Figura 3 apresenta uma análise detalhada da interação físico-química no período apresentado. A partir da dinâmica dos parâmetros meteorológicos, conclui-se que o sistema frontal chegou aproximadamente às 16h e, a partir daí, o domínio do sistema de alta pressão pós-frontal. Nota-se que nas 16 primeiras horas do dia 10, o ciclo fotoquímico do ozônio se comporta da forma padrão, sendo quase totalmente titulado – comprovado pelo pico no valor do dióxido de nitrogênio – e dispersado durante à noite, atingindo seu pico em simetria com a máxima radiação solar (área laranja) logo antes a entrada da frente.

Contudo, após a chegada da frente fria e consequente estabilização do sistema de alta pressão transiente, ocorre uma ruptura drástica desse padrão, sendo observada a partir das 20h. O ozônio, que em teoria deveria ser quase que totalmente titulado e dispersado na atmosfera durante à noite, se mantém com valores em torno de 40 µg/m^3. Tal comportamento evidencia a persistência do poluente, mesmo na ausência de radiação solar, indicando que os níveis observados decorrem do estoque acumulado na baixa troposfera sob o domínio do sistema de alta pressão pós-frontal. Esta anomalia técnica tende a se manter no dia subsequente, uma vez que a região permanece sob influência da massa de ar estável associada à pós-frontal (REBOITA et al., 2010; SANTOS et al., 2018).

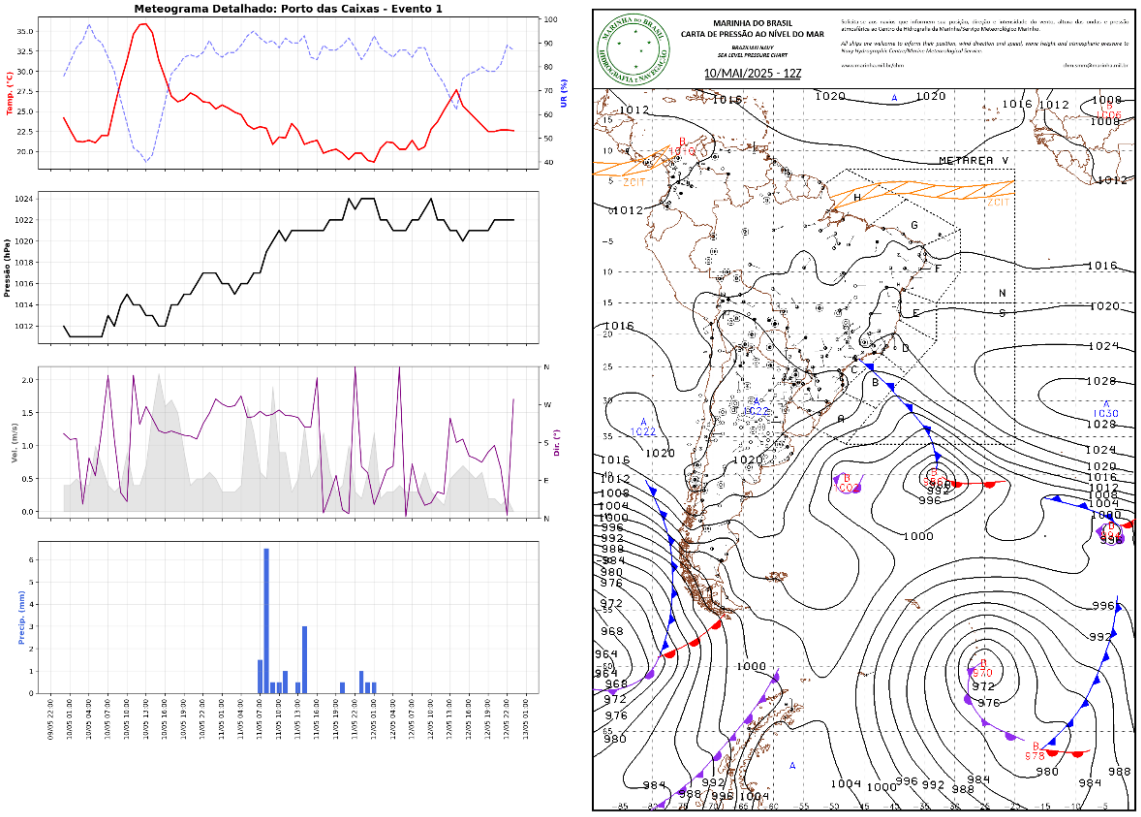


Figura 2: Meteograma e carta sinótica às 12Z para o evento do dia 10 de maio de 2025. Fonte: Autor e Centro de Hidrografia da Marinha.

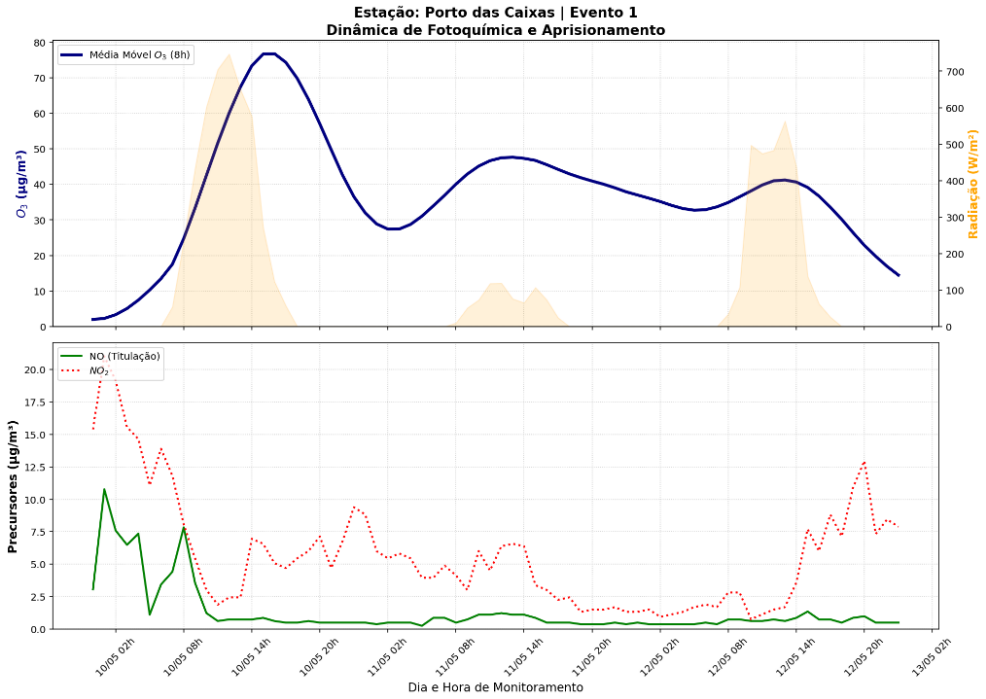


Figura 3: Dinâmica temporal do Evento 1: Interação entre O_3, radiação de onda curta e percursores (NO e NO_2) sob influência da transição para o sistema pós-frontal. Fonte: Autor.

A Figura 4 fornece evidências de que parte desse estoque também é influenciado pelo transporte advectivo regional do poluente. Observa-se que as concentrações mais críticas de ozônio estão associadas a ventos de quadrante Sudoeste, impulsionados pelo escoamento pós-frontal, indicando a contribuição do transporte regional na modulação das concentrações de O_3 (OLIVEIRA et al., 2021).

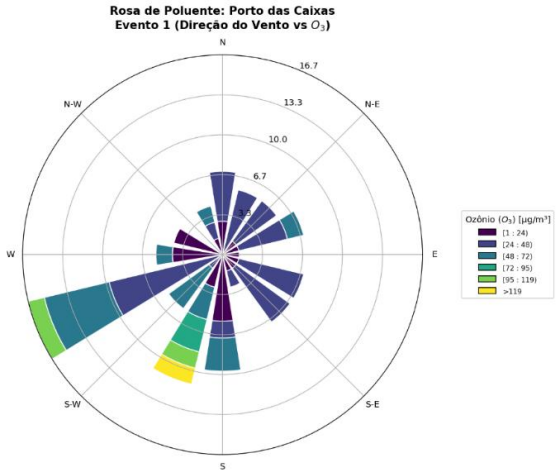


Figura 4: Rosa de poluição para o O_3 na estação de monitoramento em Itaboraí/RJ para o Evento 1, correlacionando as concentrações do poluente com a direção predominante do vento, evidenciando o transporte advectivo. Fonte: Autor.

Conclusões

A análise diária de dados de monitoramento permitiu correlacionar eventos de escala sinótica com a variabilidade local do parâmetro ozônio. Sob condições de estabilidade fotoquímica, os resultados demonstram que o O_3 tem um ciclo previsível de formação na parte do dia, onde há maior incidência de radiação de onda curta e consumo noturno, via titulação por NO, além de sua dispersão na atmosfera. Entretanto, esse ciclo se altera com a passagem de sistemas frontais. A partir da identificação de concentrações residuais elevadas de ozônio em períodos em que esses valores deveriam ser próximos a zero devido à ausência de radiação solar – confirmada pelo desvio na curva típica do poluente – constitui a validação do aprisionamento pós-frontal. Este fenômeno interfere na titulação completa do ozônio e retém a pluma de poluição advectada, impedindo a sua dispersão vertical e horizontal. Nesse contexto, destaca-se que o monitoramento contínuo da qualidade do ar, aliado à análise integrada de parâmetros meteorológicos, constitui uma ferramenta essencial para a adequada interpretação dos processos de dinâmica dos poluentes atmosféricos. Essa atividade, desenvolvida pela Ambiental RB, mostrou-se fundamental para a identificação de comportamentos atípicos nas concentrações de O_3. Além disso, a rotina de avaliação operacional da equipe técnica, a partir da observação de picos de concentração que não condiziam com o ciclo fotoquímico esperado, demonstra o papel estratégico do monitoramento contínuo como ferramenta não apenas de controle ambiental, mas na capacidade de subsidiar diagnósticos precisos e apoiar a tomada de decisão em contextos ambientais complexos.

Referências Bibliográficas

BOARI, A. et al. Long-term trends of ozone concentration in urban areas in Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, [s.l.], v. 30, 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Guia de monitoramento da qualidade do ar**. Brasília: MMA, 2019.

FINLAYSON-PITTS, B. J.; PITTS JR., J. N. Chemistry of the upper and lower atmosphere: theory, experiments, and applications. San Diego: Academic Press, 2000.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (RJ). **Portal de Dados do Sistema de Monitoramento da Qualidade do Ar (SigQAr)**. Rio de Janeiro: INEA, 2026. Disponível em: https://portalsigqar.inea.rj.gov.br/. Acesso em: 30 mar. 2026.

OLIVEIRA, R. C. G. et al. Forecasting tropospheric ozone concentrations in the Metropolitan Area of Rio de Janeiro using multivariate models. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s.l.], v. 193, 2021.

REBOITA, M. S. et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s.l.], v. 25, n. 2, p. 185–204, jun. 2010.

SANTOS, D. C. et al. Influência das condições meteorológicas na dispersão de poluentes atmosféricos no Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 23, p. 123–140, jul./dez. 2018.

SILVA, R. et al. Analysis of urban-industrial expansion and increasing ozone concentration in the Metropolitan Area of Rio de Janeiro. **Land Use Policy**, [s.l.], v. 101, 2021.

SOUZA, J. R. et al. Spatial variability of ozone concentrations and meteorological influences in northeastern Brazil. **Journal of the Air & Waste Management Association**, [s.l.], 2024.

POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA DECORRENTE DE MATERIAL PARTICULADO EM OFICINA MECÂNICA VEICULAR

Jairo Mendes da Silva, Regina Maura de Miranda
EACH-USP, jairo.mendes.silva@usp.br; EACH-USP,remaura@usp.br

Palavras-chave: poluição atmosférica indoor decorrente de material particulado ($MP_{2.5}$); poluição atmosférica em oficina mecânica veicular; síndrome dos edifícios doentes (SED)

Introdução

A poluição atmosférica pode ser definida como a presença, no ar, de substâncias oriundas de fontes naturais ou antrópicas capazes de causar danos aos seres vivos e ao meio ambiente [1]. Dentre os poluentes, um dos mais nocivos à saúde é o material particulado, classificado de acordo com seu diâmetro aerodinâmico: MP_{10}, $MP_{2.5}$ e MP_1 com diferentes impactos na saúde. As denominadas MP_{10}, partículas de diâmetro até 10µm, são retidas pelo trato respiratório superior, afetando essa região, enquanto as $MP_{2.5}$, denominadas partículas inaláveis finas, com diâmetro menor que 2.5µm, conseguem atravessar a traqueia atingindo os bronquíolos, e as menores que 1µm (MP_1) conseguem atingir os alvéolos pulmonares por difusão, se espalhando pela corrente sanguínea e alcançando outros órgãos internos. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), partículas menores apresentam maior área superficial relativa, favorecendo a adsorção de compostos tóxicos e carcinogênicos [2]. Além disso, partículas ultrafinas com diâmetro menor que 0,1µm podem ser formadas por processos de nucleação a partir de gases de combustão, incorporando propriedades químicas nocivas, a OMS também define os limites máximos de concentração de material particulado em ambientes externos em função de sua dimensão. Reações químicas e fotoquímicas podem levar à formação de poluentes secundários, incluindo material particulado, especialmente em condições de má ventilação [3] como ocorre no ambiente de oficinas mecânicas alocadas a galpões abafados. Considerando a poluição em ambientes externos e internos, edificações não projetadas para atividades específicas podem apresentar falhas de ventilação, comprometendo não apenas a dispersão de material particulado, mas também favorecendo sua propagação para outros ambientes, impactando negativamente a Qualidade do Ar Interno (QAI). Assim, os níveis de poluentes podem atingir concentrações de duas a cinco vezes superiores às observadas em ambientes externos [1]. Analisando a frota veicular, dados da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) indicam que veículos com até três anos de uso representam 14% da frota nacional, sendo responsáveis por apenas 10% das emissões totais. Em contrapartida, 86% da frota composta por veículos mais antigos responde por cerca de 90% das emissões, evidenciando o impacto do envelhecimento veicular [4]. Esses veículos com maior grau de deterioração [4,5], são direcionados às oficinas independentes para reparos uma vez que se encontram fora do período de garantia e da rede autorizada de serviços do fabricante. Segundo o Sindicato dos Reparadores Independentes (SINDIREPA), em 2022 o Brasil possuía aproximadamente 750 mil profissionais distribuídos em 121 mil estabelecimentos do setor [6]. No ambiente interno da oficina mecânica durante o funcionamento, motores de combustão interna emitem poluentes primários, como gases, hidrocarbonetos e material particulado, emissões agravadas por falhas ou desgaste [7].

Em oficinas mecânicas, durante os processos de reparo, esses motores avariados emitem poluentes acima da especificação do fabricante, sujeitando os colaboradores a essa exposição via aérea e cutânea. A ausência de legislação específica no Brasil agrava o problema e cria uma lacuna, permitindo que oficinas sejam instaladas em espaços confinados, muitas vezes com ventilação inadequada. Além disso, a crescente densidade de equipamentos e veículos cria barreiras físicas à circulação do ar, dificultando a renovação das massas de ar [8]. Diante desse cenário, projetos de ventilação natural ou sistemas de ventilação inteligente tornam-se essenciais para reduzir as concentrações de poluentes [9]. Tecnologias baseadas em sensores permitem o monitoramento contínuo da qualidade do ar, sendo fundamentais, uma vez que muitos poluentes não são perceptíveis pelos ocupantes [10]. A eficiência da renovação do ar interno depende diretamente da qualidade do ar externo [11]. Tecnologias recentes, como motores com injeção direta de gasolina (GDI), intensificam esse problema, pois dificultam a completa vaporização do combustível, favorecendo a formação de partículas ultrafinas (<23 nm) [12]. Outras fontes relevantes em oficinas incluem sistemas de atrito, como freios e embreagens, que geram partículas contendo metais e compostos cerâmicos potencialmente tóxicos [13]. A exposição prolongada a altas concentrações de poluentes está associada a doenças respiratórias e até câncer da cavidade oral e orofaringe [14,15]. Ambientes internos com elevados níveis de poluentes podem apresentar a chamada Síndrome dos Edifícios Doentes (SED), caracterizada por sintomas como tosse, irritação ocular e espirros, que tendem a desaparecer quando o indivíduo se afasta do local [1]. Entretanto, tanto a variabilidade individual quanto a dinâmica das concentrações podem mascarar esses efeitos, permitindo que a exposição contínua ocorra de forma silenciosa sem os sintomas agudos, mas ainda assim prejudicial à saúde gerando sintomas crônicos. Este estudo monitorou o $MP_{2.5}$ no interior de uma oficina mecânica em São Paulo, analisando a relação entre as concentrações do poluente e as atividades realizadas no local.

Material e métodos

Este estudo foi realizado em uma oficina mecânica veicular entre os meses de outubro e novembro de 2024 onde cerca de 80% dos serviços realizados estão relacionados à manutenção de motores. Foram utilizados sensores do fabricante AIRBEAM (https://www.habitatmap.org/airbeam) monitorando as concentrações de $MP_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) com resolução temporal de um minuto, permitindo assim relacionar com as atividades diárias. Esses sensores funcionam segundo método de dispersão de luz e operam

em conjunto com aparelho celular onde está instalado o software Air Casting. Os equipamentos foram dispostos no interior da oficina e posicionados em pontos críticos onde os colaboradores passam a maior parte do tempo, como na região próxima ao cofre do motor, bancadas de trabalho e banco do motorista, a localização da oficina, equipamentos e posicionamento dos sensores são detalhados na **Figura 01,** as atividades correlacionadas estão descritas no gráfico da **Figura 02** destacando com hachuras os casos de motor em funcionamento onde são esperadas emissões decorrentes do processo de combustão.



Figura 01: Localização e Vista superiores da oficina (a), com sensores AirBeam (b) alocados nos setores (A e C). Fonte: Autor (2026)

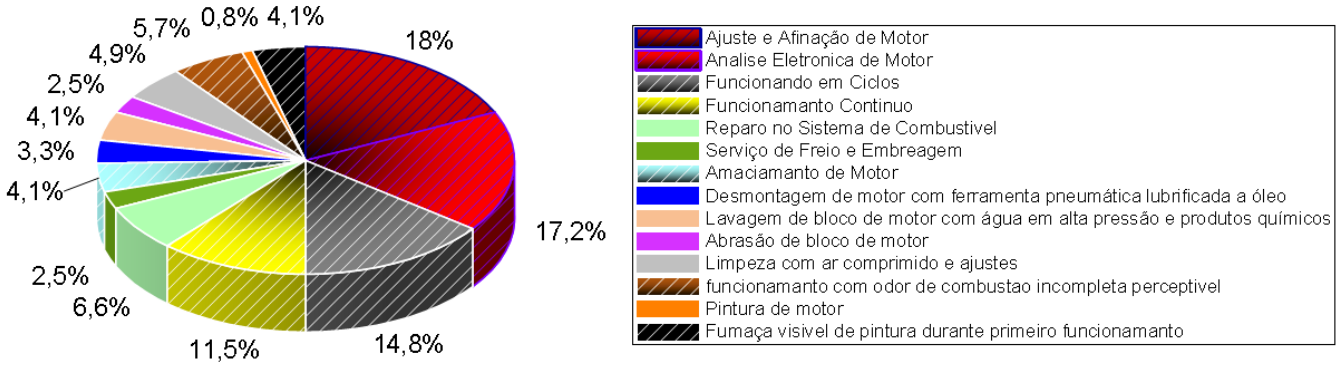
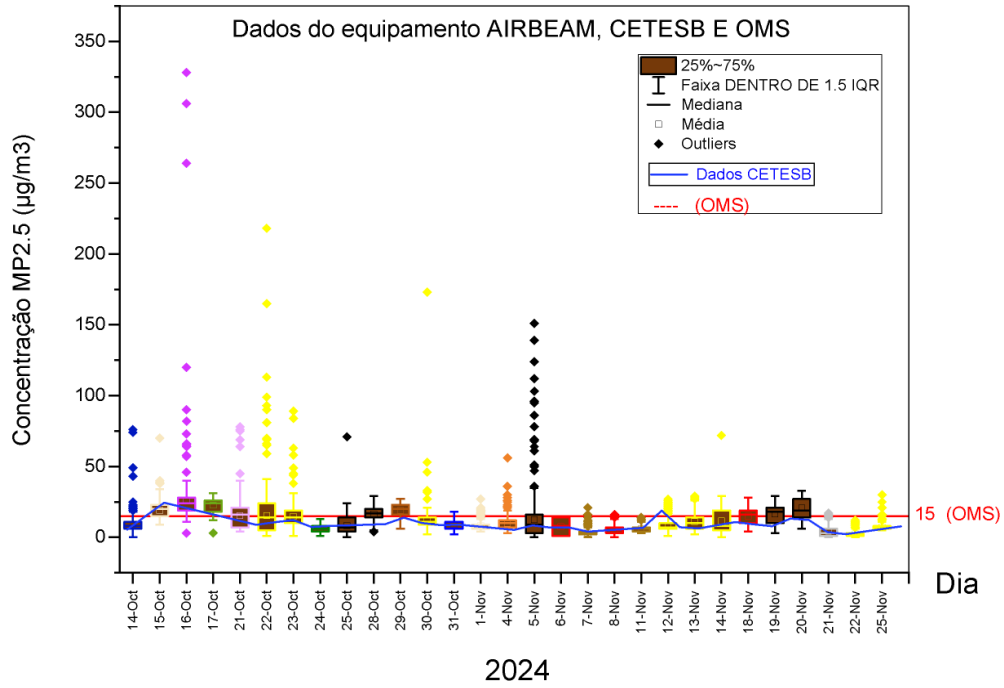


Figura 02: Gráfico das atividades da oficina no período de estudo com hachurado destacando ocorrência de atividades com motor em funcionamento. Fonte: Autor (2026)

Resultado e discussão

O gráfico de caixas (BOXPLOT) da **Figura 03** permite observar o comportamento diário d**o** $MP_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) no interior da oficina. **As atividades realizadas estão descritas na figura 02.**



18

Figura 03: Concentração de $MP_{2,5}$ obtido no ambiente interno da oficina mecânica a partir do AirBeam comparado com gráfico de linhas da estação CETESB mais próxima (linha azul) e limite da OMS (linha vermelha). Fonte: Autor (2026)

Considerações finais

Relacionando temporalmente as atividades com comportamento do material particulado ($MP_{2.5}$) observa-se que:

- Outliers sugerem emissão significativa de $MP_{2.5}$ em curto intervalo de tempo caracterizando picos de concentração que não foram incorporados à variabilidade dos dados ao longo do período analisado, emissões relacionadas a atividades como abrasão de bloco de motor, limpeza com ar comprimido e veículos com emissões perceptíveis.
  Embora um sistema de ventilação mais eficiente possa contribuir para a mitigação desses picos, a dispersão não ocorre de forma instantânea. Ressalta-se que concentrações elevadas em curto período podem desencadear sintomas agudos associados à Síndrome dos Edifícios Doentes (SED), levando os ocupantes a se afastarem do ambiente.
- Variabilidade indica emissões persistentes de $MP_{2.5}$ que, ao longo do tempo, foram gradativamente incorporadas aos quartis do BOXPLOT evidenciando ventilação inadequada para a dispersão, atividades relacionadas ao funcionamento de motores por períodos longos; nesses casos, a ventilação natural pode tornar-se insuficiente, resultando na exposição dos ocupantes a níveis elevados por períodos prolongados. Esse aumento progressivo pode mascarar os sintomas agudos típicos da SED, favorecendo a permanência no ambiente e sintomas crônicos.
- Embora ambientes internos em condições ideais, apresentam menores concentrações de $MP_{2.5}$, os dados obtidos na estação CETESB mais próxima contradizem essa expectativa, sugerindo fontes internas de emissão e/ou má ventilação ultrapassando as recomendações da OMS estipuladas no máximo em 15 $\mu g/m^3$.

Agradecimentos

O autor agradece ao Programa de Pós Graduação em Sustentabilidade da Escola de Artes Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo EACH-USP pelo apoio recebido

Referências Bibliográficas

1. EPA (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). Sick Building Syndrome. Disponível em: https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/inside-story-guide-indoor-air-quality Acesso em: março de 2026

2.. World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization, 2021. Disponível em: https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228. Acesso em: março de 2026.

3..BRANCO, P. T. B. S. *et al. Characterizing indoor air quality in private vehicle cabins under unprecedented traffic conditions during COVID-19 lockdown*. Building and Environment, v. 262, 2024. DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111797. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132324006395. Acesso em: março de 2026.

4. CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Emissões veiculares no estado de São Paulo 2020: relatório de qualidade do ar do estado de São Paulo – 2022* [recurso eletrônico]. São Paulo: CETESB, 2022. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/. Acesso em: março. 2026.

5. SHI, X. et al. Combination of biodiesel–ethanol–diesel fuel and SCR catalyst assembly to reduce emissions from a heavy-duty diesel engine. Journal of Environmental Sciences, v. 20, p. 177–182, 2008. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074208600285 Acesso em: março 2026

6. SINDIREPA. Compilação e estimativas da indústria da reparação de veículos no Brasil.2022. Disponível em: https://www.sindirepabrasil.org.br/anuario-2022/ Acesso em: março de 2026

7. BRAGA JR., Benedito P. F. et al. Introdução à engenharia ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável. São Paulo: Pearson. 2021.

8. VILANOVA, Carolina. A evolução das oficinas de reparação. In: Revista on line O Mecânico: Leves e Pesados. Edição 220 - Qualidade em série. Ano II, XVII. n° 220, 2014.Disponível em: http://www.omecanico.com.br/modules/revista.php?recid=823&edid=65&topicid=2>. Acesso em: março de 2026

9. JARRAHI, A. et al. Enhancing indoor air quality: Harnessing architectural elements, natural ventilation and passive design strategies for effective pollution reduction — A comprehensive review. Science of the Total Environment, v. 954, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.176631. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724067871 Acesso em: março de 2026.

10. KONG, M. *et al. An effective alerting strategy to facilitate occupants' perception of indoor air quality: by alarming concentration of indoor air pollution*. Environmental Pollution, v. 325, 2023. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121428. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121428. Acesso em: março de 2026.

11. ABHIJITH, K. V. *et al. Investigation of air pollution mitigation measures, ventilation, and indoor air quality at three schools in London*. Atmospheric Environment, v. 289, 2022. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2022.119303. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231022003685. Acesso em: março de 2026.

12. PFAU, S. A. *et al. Investigating the effect of volatiles on sub-23 nm particle number measurements for a downsized GDI engine with a catalytic stripper and digital filtering*. Fuels, v. 3, n. 4, p. 682–697, 2022. DOI: 10.3390/fuels3040041. Disponível em: https://doi.org/10.3390/fuels3040041. Acesso em: março de 2026.

13 GÓMEZ YEPES, M. E. *et al. Evaluation of particulate emissions during braking tests in technical–mechanical overhaul workshops in Armenia-Quindío (Colombia)*. Environments, v. 12, art. 39, 2025. DOI: 10.3390/environments12020039.

14. YANG, Z. *et al. Health effects of long-term exposure to ambient $PM_{2.5}$ in Asia-Pacific: a systematic review of cohort studies*. Current Environmental Health Reports, v. 9, n. 2, p. 130–151, 2022. DOI: 10.1007/s40572-022-00344-w.

15. ANDREOTTI, M. *et al.* Ocupação e câncer da cavidade oral e orofaringe. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 22, n. 3, p. 543–552, 2006. Acesso em: março de 2026.

O USO DE LÍQUENS COMO BIOINDICADORES DA QUALIDADE DO AR EM ÁREAS SOB INFLUÊNCIA DE ATIVIDADES DE MINERAÇÃO EM CAÇAPAVA DO SUL, RS

Jocássia da Silva[1], Victória Cardoso de Oliveira[1], Thiago Henrique Lugokenski[2]
[1]Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), e-mail: jocassiasilva.aluno@unipampa.edu.br, victooriacrd@gmail.com;
[2]Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), e-mail:thiagolugokenski@unipampa.edu.br

Palavras-chave: líquens; poluição atmosférica; biomonitoramento.

Introdução

A poluição atmosférica constitui um dos principais problemas ambientais da atualidade, estando diretamente relacionada ao crescimento urbano, industrial e às atividades mineradoras. A emissão de gases tóxicos e material particulado contribui significativamente para a degradação da qualidade do ar, afetando tanto os ecossistemas quanto a saúde humana, principalmente por meio do agravamento de doenças respiratórias e alterações ambientais de longo prazo (CANÇADO et al., 2006; CÉSAR et al., 2013). Entre as principais fontes de poluição atmosférica destacam-se as atividades mineradoras, especialmente em municípios com forte dependência econômica da extração mineral. Durante os processos de lavra, britagem, transporte e beneficiamento dos minérios, ocorre intensa liberação de partículas finas em suspensão, além da emissão de gases provenientes da movimentação de máquinas e equipamentos, contribuindo para alterações significativas na qualidade ambiental (TOLEDO; NARDOCCI, 2011).

A utilização de bioindicadores ambientais tem se mostrado uma importante ferramenta para o monitoramento da qualidade do ar. Os líquens destacam-se por sua sensibilidade aos poluentes atmosféricos, uma vez que absorvem água e nutrientes diretamente da atmosfera e não possuem estruturas de proteção como cutícula e sistema radicular. Essa característica permite que respondam rapidamente às alterações ambientais, funcionando como excelentes organismos para biomonitoramento passivo (SEAWARD, 2008). Os líquens são organismos resultantes da associação simbiótica entre fungos e algas ou cianobactérias, apresentando diferentes formas morfológicas, principalmente crostosa, foliosa e fruticosa. Espécies mais sensíveis tendem a desaparecer em ambientes contaminados, enquanto espécies mais resistentes permanecem predominantes, permitindo inferir diferentes níveis de poluição atmosférica (BENATTI; MARCELLI, 2007; XAVIER FILHO; MARTINS; GARRIDO, 2006).

O município de Caçapava do Sul, localizado na região central do Rio Grande do Sul, apresenta forte influência da atividade mineradora, principalmente voltada à extração de calcário, tornando-se uma área relevante para estudos ambientais relacionados à qualidade do ar. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade atmosférica em áreas sob influência mineradora e em áreas de controle ambiental, utilizando a comunidade liquênica como ferramenta de biomonitoramento.

Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido no município de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, abrangendo áreas próximas às atividades mineradoras e pontos de controle localizados no Parque Natural Municipal da Pedra do Segredo, considerados como áreas de referência ambiental por apresentarem menor influência antrópica. Foram estabelecidos vinte pontos de coleta, sendo onze amostrados até o momento. Em cada ponto foram selecionados seis forófitos arbóreos, totalizando 66 indivíduos analisados. A escolha ocorreu de forma aleatória, priorizando árvores com troncos expostos, ausência de danos mecânicos e condições favoráveis ao desenvolvimento liquênico. A distribuição geral dos pontos de amostragem, incluindo áreas próximas à mineração e pontos de controle, pode ser observada na Figura 1.



Figura 1 – Localização dos pontos de amostragem em Caçapava do Sul, RS, incluindo áreas próximas à mineração e pontos de controle no Parque Natural Municipal da Pedra do Segredo.
Fonte: Elaborado pelas autoras (2026)

Para a padronização da amostragem foi utilizado um reticulum de arame com dimensões de 30 cm × 50 cm, subdividido em quadrantes menores, conforme metodologia adaptada de Ferreira (2008), posicionado a 1,5 metro do solo. Após o posicionamento do reticulum, foram realizados registros fotográficos para posterior análise da cobertura liquênica.

A metodologia adotada foi quali-quantitativa, envolvendo a identificação dos táxons e a estimativa da área ocupada pelos líquens nos troncos arbóreos. A identificação ocorreu predominantemente até o nível de gênero, utilizando características morfológicas macroscópicas como forma do talo, coloração, aderência ao substrato e tipo de crescimento, sendo considerados principalmente os líquens crostosos, foliosos e fruticosos.

A avaliação da qualidade ambiental foi realizada por biomonitoramento passivo, utilizando a frequência relativa dos táxons, a predominância morfológica, a ocupação liquênica e o Índice de Pureza Atmosférica (IPA), além da análise de correlação entre a distância da atividade mineradora e os indicadores ambientais.

Resultados e Discussão

Os pontos amostrados apresentaram variação significativa quanto a distância em relação à principal área mineradora, variando desde 250 metros até 13.200 metros nos pontos de controle localizados no Parque Natural Municipal da Pedra do Segredo. Essa distribuição permitiu avaliar a influência da proximidade da fonte emissora sobre a comunidade liquênica e a qualidade do ar. A análise de frequência demonstrou predominância dos gêneros *Parmotrema sp*, *Cryptothecia sp* e *Coccocarpia sp*, que representam a maior parte das amostras identificadas, conforme apresentado na Figura 2.

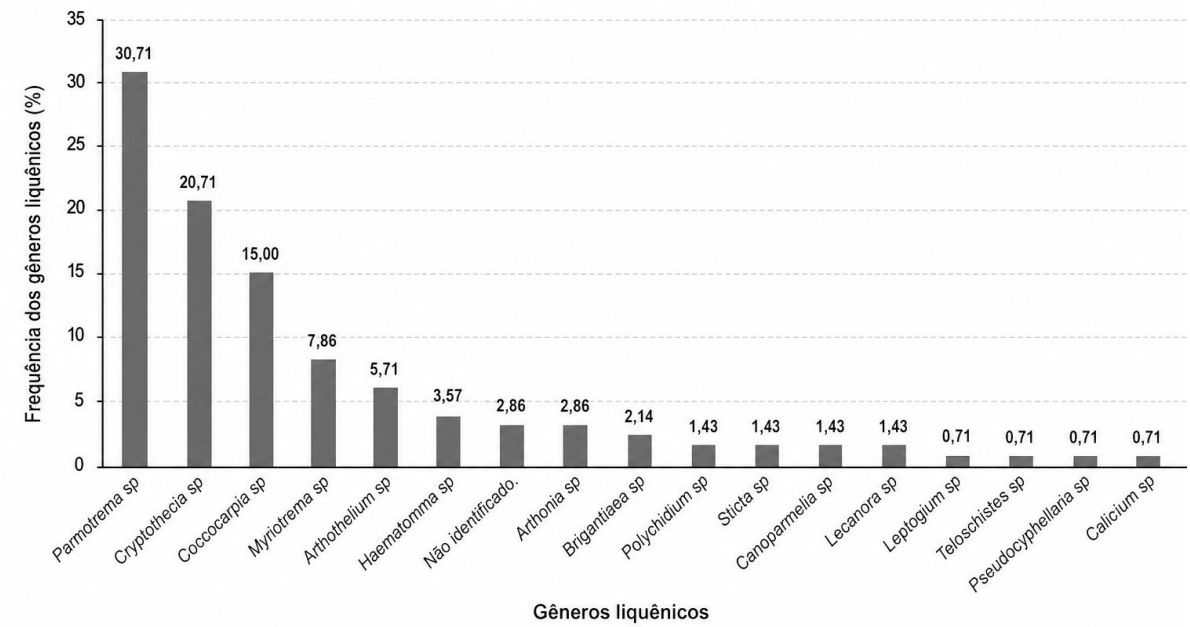


Figura 2 – Frequência dos gêneros liquênicos identificados nos pontos amostrados.
Fonte: Elaborado pelas autoras (2024)

O gênero *Parmotrema sp* apresentou ampla distribuição entre os pontos avaliados, indicando maior tolerância a diferentes condições ambientais. Já *Cryptothecia sp,* frequentemente associada a ambientes mais impactados, foi registrada com maior ocorrência nas áreas próximas à mineração. Quanto à morfologia, observou-se predominância de líquens crostosos nas áreas com maior influência mineradora, especialmente nos pontos mais próximos à fonte de poluição atmosférica.

Esse padrão está relacionado à maior resistência dos líquens crostosos a condições ambientais adversas, como elevadas concentrações de material particulado e gases poluentes. Em contrapartida, nos pontos mais distantes da atividade mineradora, verificou-se aumento na ocorrência de líquens foliosos e fruticosos, formas geralmente associadas a ambientes com melhor qualidade do ar. A ocupação liquênica acompanhou esse gradiente espacial, apresentando crescimento progressivo conforme o distanciamento da área mineradora, com os maiores valores registrados nos pontos de controle, conforme demonstrado na Figura 3.

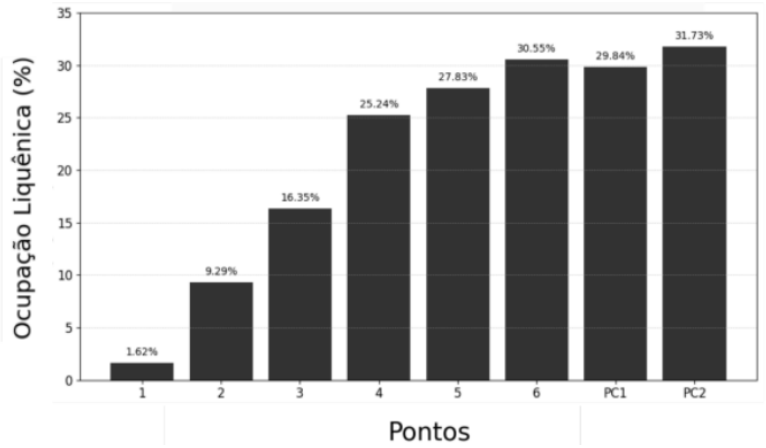


Figura 3 – Ocupação Liquênica (%) por ponto amostrado.
Fonte: Elaborado pelas autoras (2024)

O ponto mais próximo da mineração apresentou menor cobertura e menor diversidade, enquanto os pontos controle registraram os maiores percentuais de ocupação, evidenciando melhores condições ambientais favoráveis e menor influência de contaminantes atmosféricos.

O Índice de Pureza Atmosférica (IPA) também variou significativamente entre os pontos analisados. O ponto localizado mais próximo da mineração apresentou IPA de 0,83, sendo classificado como qualidade do ar péssima, o que indica contaminação extremamente elevada. Por outro lado, os pontos mais distantes apresentaram aumento gradual nos valores do índice, alcançando IPA de 15,78 nos pontos controle, conforme apresentado na Figura 5.

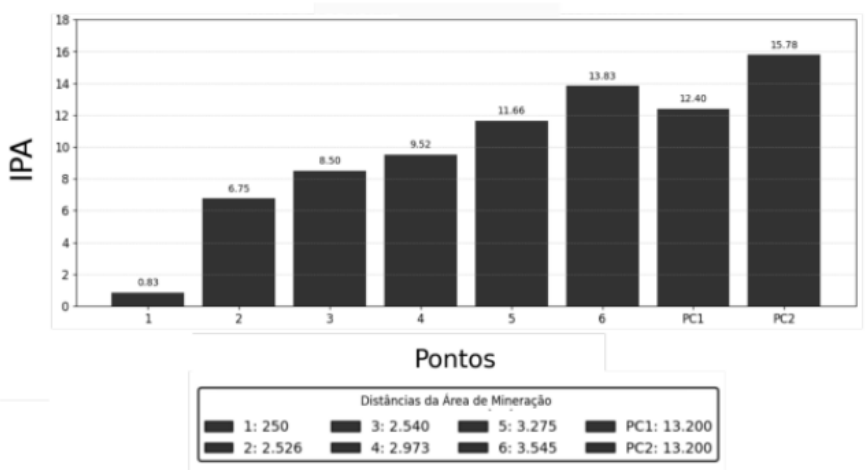


Figura 4 – Índice de Pureza Atmosférica (IPA) nos pontos amostrados.
Fonte: Elaborado pelas autoras (2024)

A análise de correlação linear demonstrou forte relação positiva entre a distância da atividade mineradora e os indicadores ambientais avaliados. O coeficiente de Pearson apresentou valor de r = 0,98 para IPA e r = 0,95 para a ocupação liquênica, evidenciando que o afastamento da fonte poluidora contribui significativamente para a melhoria da qualidade do ar e para o aumento da biodiversidade liquênica, conforme observado na Figura 5.

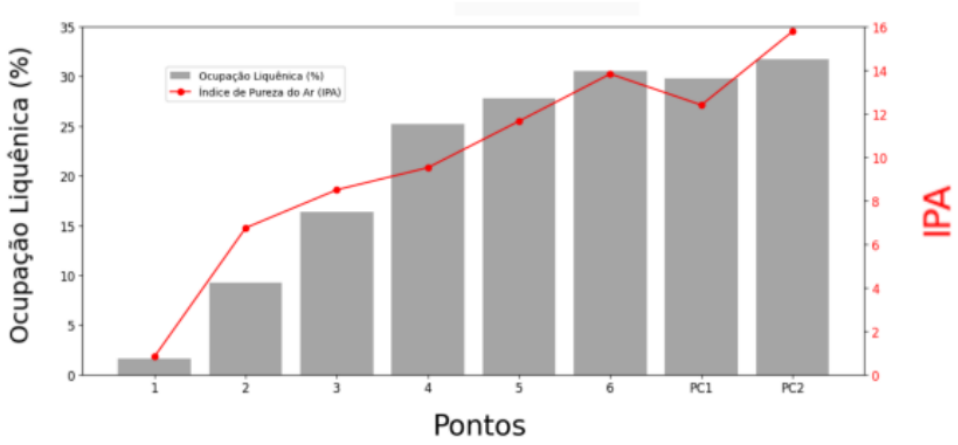


Figura 5 – Correlação linear entre distância da mineração, IPA e ocupação liquênica.
Fonte: Elaborado pelas autoras (2024)

Esses resultados confirmam a sensibilidade dos liquens às alterações atmosféricas e reforçam sua eficiência como bioindicadores ambientais, evidenciando a sua aplicabilidade no monitoramento da qualidade do ar em áreas sob influência de atividades mineradoras.

Considerações Finais

O uso de líquens como bioindicadores mostrou-se eficiente na avaliação da qualidade do ar em áreas sob influência de atividades mineradoras no município de Caçapava do Sul. A predominância de líquens crostosos nas áreas mais impactadas e o aumento da diversidade de formas foliosas e fruticosas em áreas mais preservadas evidenciam a sensibilidade desses organismos às alterações atmosféricas.

Os resultados obtidos por meio da frequência liquênica, ocupação liquênica, Índice de Pureza Atmosférica e análise de correlação confirmaram a influência direta da mineração sobre a qualidade ambiental local. O estudo contribui para o fortalecimento de estratégias de monitoramento ambiental e reforça a importância da adoção de práticas preventivas e de gestão sustentável nas atividades mineradoras.

Agradecimentos

Os autores agradecem à instituição de ensino e aos colaboradores envolvidos no desenvolvimento da pesquisa.

Referências Bibliográficas

BENATTI, Michel Navarro; MARCELLI, Marcelo Pinto. Gêneros de fungos liquenizados dos manguezais do Sul-Sudeste do Brasil, com enfoque no manguezal do Rio Itanhaém, Estado de São Paulo. Acta Botanica Brasilica, v. 21, p. 863-878, 2007.

CANÇADO, J. E. D. et al. Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica. Jornal Brasileiro de Pneumologia, 2006.

CÉSAR, A. et al. Poluição atmosférica e seus impactos ambientais. 2013.

SEAWARD, Mark RD. Environmental role of lichens. Lichen biology, v. 2, 2008.

TOLEDO, G.; NARDOCCI, A. Poluição atmosférica e fontes de emissão no Brasil. 2011.

XAVIER FILHO, L.; MARTINS, L. M.; GARRIDO, M. Biologia de líquens. São Paulo: Editora Científica, 2006.

INFLUÊNCIA DA UMIDADE RELATIVA DO AR NA DETERMINAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO

1 Eloiza Desselmann Parolin dos Santos, 2 Julia Jankovski Forgiarini, 3 Ramiro José Espinheira Martins, 4 Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: eloizadesselmannsantos@alunos.utfpr.edu.br; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: juliajankovski@alunos.utfpr.edu.br; 3 Instituto Politécnico de Bragança, e-mail: rmartins@ipb.pt; 4 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: jpietrobelli@utfpr.edu.br.

Palavras-chave: Amostragem; Monitoramento Atmosférico; Método Gravimétrico.

Introdução

A poluição atmosférica ocorre quando um ambiente é contaminado por substâncias químicas, físicas ou biológicas que alteram as características naturais da atmosfera. Nas últimas décadas, a poluição atmosférica vem se tornando uma das maiores causas de doenças respiratórias no mundo, com seus efeitos de exposição, podendo ser relacionada a cerca de 7 milhões de mortes prematuras por ano (WHO, 2024). Diante do exposto, torna-se imprescindível o monitoramento da qualidade do ar, especialmente em centros urbanos e industriais (MOLINA; MOLINA, 2004).

O Material Particulado (MP) representa um dos principais poluentes atmosféricos; trata-se de um conjunto de partículas sólidas e líquidas que permanecem suspensas no ar. De acordo com Braga et al. (2002), sua composição química e tamanho variam de acordo com a fonte emissora, abrangendo desde compostos orgânicos e metais até fragmentos de solo e poeira de vias. O MP é classificado pelo seu diâmetro aerodinâmico, sendo MP2,5 as partículas menores que 2,5 µm, MP10 as partículas menores que 10 µm e as Partículas Totais em Suspensão (PTS), que englobam o conjunto de partículas com diâmetro de até 50 µm (Braga et al., 2002).

Entretanto, a precisão na determinação gravimétrica dessas partículas pode sofrer interferências significativas em função da umidade relativa do ar. Isso ocorre devido à natureza higroscópica tanto do meio filtrante quanto das próprias partículas, que tendem a absorver vapor de água, o que pode levar à superestimação da massa real coletada (Wang et al., 2020).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da umidade relativa do ar na determinação da concentração de PTS atmosférico, em uma indústria localizada na cidade de Ponta Grossa - PR.

O procedimento de amostragem foi realizado de acordo com as regras estabelecidas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente, para o monitoramento da qualidade do ar (Brasil, 2024).

Material e Métodos

Para a realização das campanhas de monitoramento, foi utilizado um Amostrador de Grande Volume (AGV) com controle de vazão volumétrica e dotado de cabeçote para PTS.

De acordo com Lapolli (2023), este dispositivo é amplamente utilizado para a determinação de PTS mediante a aspiração de grandes volumes de ar, que retêm o material particulado em filtros de fibra de vidro para posterior análise gravimétrica.

O instrumento foi instalado em um ponto estratégico da área industrial, operando com vazão entre 1,1 e 1,7 m³/min. Como meio filtrante, utilizaram-se filtros de fibra de vidro.

O procedimento de preparação e pesagem dos filtros foi realizado em balança analítica, calibrada com kit de referência, e uma unidade dessecadora (Figura 01) contendo sílica de gel, este sendo utilizado para o condicionamento dos filtros, removendo a umidade e garantindo a determinação precisa da massa seca.



Figura 01: Unidade Dessecadora

Fonte: Autoria Própria (2026)

O estudo foi conduzido em um complexo industrial do setor de processamento de soja, localizado em Ponta Grossa (PR), com coletas realizadas em pátio externo, utilizando o método gravimétrico para determinação de Partículas Totais em Suspensão (PTS), conforme a norma NBR 9547 (ABNT, 1997).

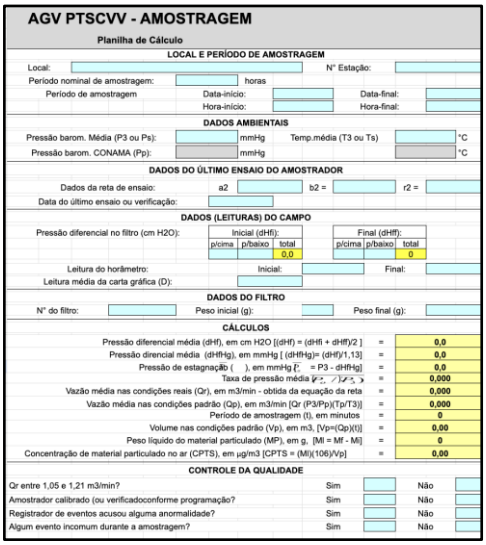
O procedimento iniciou-se com a preparação dos filtros, que foram colocados no dessecador por 24 horas para a remoção da umidade e, posteriormente, pesados para a obtenção da massa inicial.

Realizou-se a montagem e calibração do equipamento AGV com base na Tabela de Calibração fornecida pela SOMAR, a fim de garantir a confiabilidade das condições operacionais durante a coleta.

Após a calibração, iniciou-se a amostragem, na qual o filtro foi inserido no topo, seguida do posicionamento da carta gráfica de registro. Para a viabilização dos cálculos posteriores, foi realizada a marcação do horímetro para avaliar o tempo real de duração da amostragem, além da instalação de medidores para monitorar a temperatura e pressão durante o período. A partir disso, a amostragem foi realizada em intervalos distintos, com duração variável entre 16 e 70 horas de coleta contínua.

Após a coleta das amostras, os filtros retornaram ao dessecador por 24 horas para a pesagem final, assegurando que a massa medida correspondesse estritamente ao material particulado coletado, isento de umidade.

Para o processamento dos dados, utilizou-se uma Planilha de Amostragem, conforme Figura 02, na qual foram inseridos os parâmetros de massa, tempo e condições termodinâmicas. Por meio de fórmulas predefinidas nesta planilha, obtiveram-se o peso líquido e a concentração final de PTS, em µg/m³. Por fim, os resultados foram comparados com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 506/2024 para a avaliação da conformidade ambiental.


AGV PTSCVV - AMOSTRAGEM

Planilha de Cálculo

LOCAL E PERÍODO DE AMOSTRAGEM

Local: N° Estação:

Período nominal de amostragem: horas

Período de amostragem Data-início: Data-final:

Hora-início: Hora-final:

DADOS AMBIENTAIS

Pressão barom. Média (P3 ou Ps): mmHg Temp.média (T3 ou Ts) °C

Pressão barom. CONAMA (Pp): mmHg °C

DADOS DO ÚLTIMO ENSAIO DO AMOSTRADOR

Dados da reta de ensaio: a2 b2 = r2 =

Data do último ensaio ou verificação:

DADOS (LEITURAS) DO CAMPO

Pressão diferencial no filtro (cm H2O): Inicial (dHf): p/cima p/baixo total 0,0 Final (dHf): p/cima p/baixo total 0

Leitura do horâmetro: Inicial: Final:

Leitura média da carta gráfica (D):

DADOS DO FILTRO

N° do filtro: Peso inicial (g): Peso final (g):

CÁLCULOS

Pressão diferencial média (dHf), em cm H2O [(dHf) = (dHfi + dHff)/2] = 0,0

Pressão direncial média (dHfHg), em mmHg [(dHfHg)= (dHf)/1,13] = 0,0

Pressão de estagnação ( ), em mmHg [= P3 - dHfHg] = 0,0

Taxa de pressão média = 0,000

Vazão média nas condições reais (Qr), em m3/min - obtida da equação da reta = 0,000

Vazão média nas condições padrão (Qp), em m3/min [Qr (P3/Pp)(Tp/T3)] = 0,000

Período de amostragem (t), em minutos = 0

Volume nas condições padrão (Vp), em m3, [Vp=(Qp)(t)] = 0,00

Peso líquido do material particulado (MP), em g, [MI = MF - MI] = 0

Concentração de material particulado no ar (CPTS), em µg/m3 [CPTS = (MI)(106)/Vp] = 0,00

CONTROLE DA QUALIDADE

Qr entre 1,05 e 1,21 m3/min? Sim Não

Amostrador calibrado (ou verificadoconforme programação? Sim Não

Registrador de eventos acusou alguma anormalidade? Sim Não

Algum evento incomum durante a amostragem? Sim Não

Figura 02: Planilha de Amostragem (SOMAR)
Fonte: Autoria Própria (2026)

Resultados e discussão

A partir dos procedimentos experimentais realizados, observou-se uma variação significativa nos parâmetros analisados. Ao todo, foram realizadas 12 medições, com tempos de amostragem entre 16 e 70 horas, conforme apresentado na Tabela 01.

Filtros	Peso liquido (g)	Concentração (ug/m³)	Tempo de coleta (h)	Umidade relativa do ar (%)
D1	0,2025	138,26	23,01	96,50
D2	0,1241	70,35	28,09	92,25
D3	0,1289	29,06	70,00	81,84
D4	0,3727	126,22	47,04	81,41
D5	0,0896	64,62	22,06	85,30
D6	0,1367	94,43	23,07	77,18
D7	0,0131	13,43	17,00	86,84
D8	0,1509	107,66	22,03	75,71
D9	0,2068	141,74	23,04	73,32
D10	0,2317	170,68	22,04	68,27
D11	0,0401	27,36	23,00	99,70
D12	0,0305	20,54	24,09	97,92

Tabela 01: Relação de dados coletados
Fonte: Autoria Própria (2026)

Considerando os dados da Tabela 01, podemos perceber que a indústria está operando em conformidade com a CONAMA 506/2024, visto que a concentração mais alta obtida foi de 170,68 µg/m³, correspondente ao filtro D10. Mesmo o valor mais alto encontrado corresponde a apenas 70% do limite máximo permitido pelas normas ambientais, o que indica que as medidas de controle da empresa são eficazes.

Além disso, nota-se que os filtros D11 e D12 apresentaram os maiores índices de umidade relativa do ar (99,70% e 97,91%, respectivamente) e estão entre as menores concentrações registradas. Comportamento similar foi observado no filtro D7, que obteve a menor concentração e uma umidade elevada (86,84%). Tais resultados indicam que condições meteorológicas de alta umidade influenciam a redução do PTS em suspensão, possivelmente devido ao efeito de deposição úmida.

Essa relação entre o aumento da umidade e a queda na concentração de partículas é reforçada pelos dados da Figura 02.

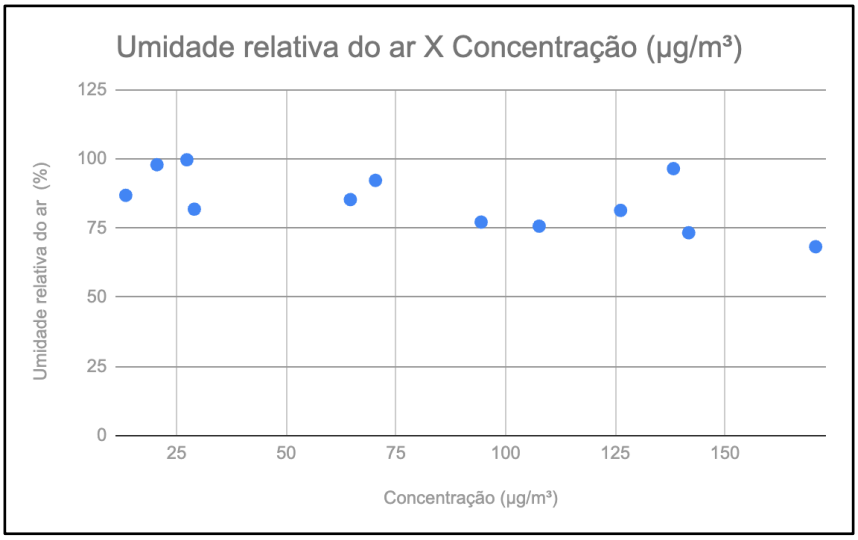


Figura 02: Relação Umidade Relativa do Ar por Concentração
Fonte: Autoria Própria (2026)

Outro dado relevante, obtido a partir das medições experimentais, foi a ausência de relação entre o tempo de coleta e a concentração do MP. Tais informações foram obtidas com base nos dados apresentados na Figura 03.

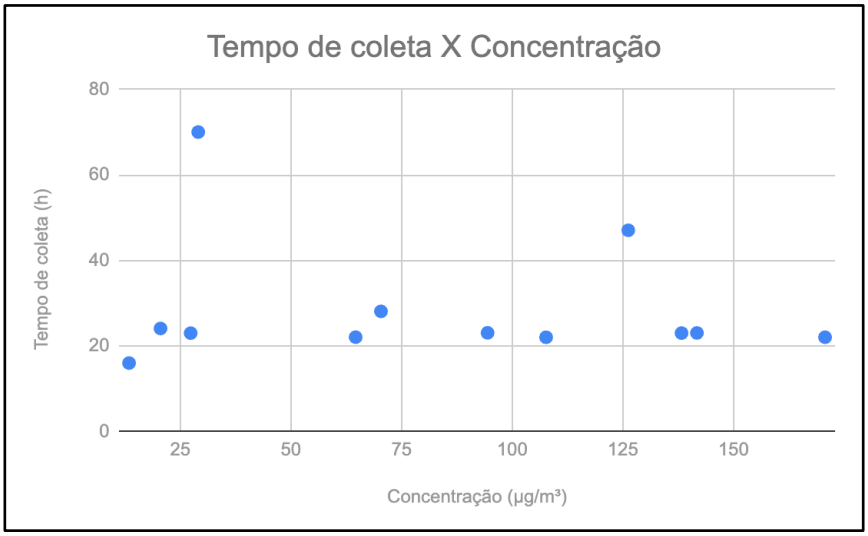


Figura 03: Relação Tempo de coleta por Concentração
Fonte: Autoria Própria (2026)

Considerações finais

Os resultados obtidos evidenciam que as concentrações de PTS em todos os períodos de amostragem ficaram abaixo do limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 506/2024, de 240 µg/m³. Dessa forma, a indústria de óleo de soja analisada está em conformidade legal e suas medidas de controle da indústria estão sendo eficazes.

Além disso, a partir dos testes experimentais, nota-se que a umidade elevada favorece a redução da concentração medida devido ao efeito de deposição úmida. Também se concluiu que o tempo de amostragem (entre 16 e 70 horas) não apresentou correlação direta com o aumento da concentração de poluentes.

Em suma, o presente estudo comprova a necessidade técnica de integrar variáveis meteorológicas à interpretação de dados ambientais. Também ressalta que a análise isolada das concentrações, sem o contexto climático, pode levar a interpretações incompletas sobre o comportamento dos poluentes em áreas industriais.

Agradecimentos

Ao Departamento Acadêmico de Engenharia Química da UTFPR, Campus Ponta Grossa, pelo apoio institucional. Ao grupo de pesquisa Sistemas de Tratamento e Aproveitamento de Resíduos (STAR), pelo suporte técnico e científico. À unidade industrial de extração de óleo de soja, pela disponibilidade e cooperação durante as etapas de coleta de dados.

Referência Bibliográfica

BRAGA, B. *et al*. **Introdução à engenharia ambiental**: unidades de medida, poluição do ar, tratamento de água e esgoto, resíduos sólidos. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2002.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024**. Estabelece padrões de qualidade do ar. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 129, p. 81, 8 jul. 2024.

HOINASKI, L. **Métodos para identificação e quantificação da contribuição de fontes de poluição atmosférica**. 2010. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

LAPOLLI, R. A. **Amostrador de Grande Volume: funcionamento e testes para determinação de material particulado**. Orientadora: Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli. 2023. 7 f. Relatório de Iniciação Científica (Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2023.

MOLINA, M. J.; **MOLINA**, L. T. Megacities and Atmospheric Pollution. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 54, n. 6, p. 644-680, 2004. DOI: 10.1080/10473289.2004.10470936.

WANG, L. Y.; **YU**, L. E.; **CHUNG**, T. S. Effects of relative humidity, particle hygroscopicity, and filter hydrophilicity on filtration performance of hollow fiber air filters. **Journal of Membrane Science**, v. 595, p. 117561, 2020.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Air pollution**. Geneva: WHO, 2024. Disponível em: https://www.who.int/health-topics/air-pollution. Acesso em: 30 mar. 2026.

ABSORÇÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS POR POPULAÇÕES DE LÍQUENS EM ÁREA DE MINERAÇÃO.

1 Jorge Paulino Oliveira Brião, 2 Thammy Ferreira da Silva, 3 Victória Cardoso de Oliveira, 4 Thiago Henrique Lugokenski.

Universidade Federal Do Pampa (UNIPAMPA), e-mail:jorgebriao.aluno@unipampa.edu.br; Universidade Federal Do Pampa (UNIPAMPA),e-mail:thammysilva.aluno@unipampa.edu.br; Universidade Federal Do Pampa (UNIPAMPA), e-mail:victooriacrd@gmail.com; Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), e-mail thiagolugokenski@unipampa.edu.br.

Palavras-chave: Bioindicadores; líquens; poluição atmosféricas.

Introdução

A poluição atmosférica representa um dos principais problemas ambientais da atualidade, sendo responsável por impactos significativos à saúde humana e aos ecossistemas naturais. O aumento das atividades industriais e urbanas intensificou a emissão de poluentes na atmosfera, incluindo gases tóxicos e material particulado, que podem comprometer a qualidade do ar e causar danos ambientais (CAVALCANTE, 2010). No Brasil, dados do Ministério da Saúde indicam que 300 mil pessoas morreram por doenças causadas por fumaça e poluição (BRASIL,2022) entre 2019 e 2021, e globalmente um estudo recente estimou em 1,5 milhão e mortes anuais decorrentes da poluição atmosférica (XU et al.,2024). Nesse contexto, acordos internacionais, como o Acordo de Paris, reforçam a necessidade de monitoramento e controle das emissões atmosféricas para reduzir os impactos das mudanças climáticas (ONU, 2015). Dentre os mais nocivos contaminantes atmosféricos destacam-se o monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (Nox), óxidos de enxofre (Sox) e material particulado contendo diferentes substâncias químicas, incluindo metais pesados (CETESB, 2010). Esses poluentes originam-se de diversas fontes, como processos industriais, emissões veiculares e atividades mineradoras.

A mineração em especial, está associada à liberação de grande quantidade de partículas em suspensão e metais potencialmente tóxicos. Durante as etapas de extração, transporte e processamento mineral ocorre a dispersão de poeira e outros contaminantes que podem se depositar no solo, na vegetação e nos organismos vivos (FELLENBERG, 2001). Neste sentido, o município de Caçapava do Sul, localizado no estado do Rio Grande do Sul, destaca-se como o maior centro produtor de calcário do país, tendo papel fundamental para a agricultura e construção civil nacional, mas também tendo um potencial de contaminação atmosférica que não pode ser desprezado. (FRANÇA et al., 2019).

Nesse contexto, organismos bioindicadores podem ser utilizados para avaliar a qualidade atmosférica de modo rápido, prático e de baixo custo. Os líquens, organismos resultantes da simbiose entre fungos e algas ou cianobactérias, são amplamente utilizados como bioindicadores de poluição atmosférica devido à sua elevada capacidade de absorção de substâncias presentes no ar (CONTI; CECCHETTI, 2001). Diferentemente das plantas, os líquens não possuem cutícula ou estruturas de proteção eficientes, absorvendo diretamente nutrientes e contaminantes da atmosfera (HALE, 1983). Diversos estudos demonstram que a presença, abundância e composição das comunidades liquênicas podem refletir as condições de qualidade do ar em determinada região. Dessa forma, a análise desses organismos pode fornecer informações relevantes sobre a presença de poluentes atmosféricos e seus possíveis impactos ambientais (PUCKETT, 1988).

Dentre as principais formas morfológicas que ocorrem em líquens, os crostosos são os mais simples e mais tolerantes a poluição, sendo indicados como bioindicadores quando se compara áreas sabidamente de baixa qualidade do ar, sendo vantajoso sobre ou formas liquênicas que podem não estar presentes em nenhuma amostra ao longo de toda a área, não fornecendo uma visão sobre a pluma de contaminação neste tipo de local. Em especial, o gênero *Cryptothecia spp*. é largamente difundido em áreas florestadas, sendo um bioindicador promissor de utilização ampla devido a ser sensível a poluentes e extremamente comum.

Assim, o presente estudo teve como objetivo investigar a capacidade de absorção de poluentes atmosféricos por populações de líquens do gênero *Cryptothecia spp.* em uma área de mineração e estimar a qualidade do ar em área de influência de atividade de mineração de calcário.

Materiais e Métodos

A área de estudo foi no munícipio de Caçapava do Sul, RS, sendo o primeiro ponto de coleta as margens da br-392 nas imediações de mina de calcário e planta de processamento em funcionamento; o segundo ponto de coleta foi na localidade Bairro da Aviação, na periferia da área urbana da cidade. Por fim, a área que serviu como um grupo controle foi amostrado em localidade pouco afetada por poluição no Parque Municipal da Pedra do Segredo (figura 1). Os locais de coleta foram nomeados como A1, A2 e A3, para a área adjacente a atividade mineradora, para a área nas imediações da área urbana e para o local usado como controle, respectivamente.

Em cada ponto de coleta foram analisados seis forófitos e realizada a coleta de amostras liquênicas utilizando estilete para raspagem cuidadosa dos talos, evitando danos ao tronco das árvores. As amostras foram armazenadas em envelopes de papel e preparadas e analisadas posteriormente em laboratório. Ainda, foi analisado a frequência líquens do gênero *Cryptohtecia* nos forótitos com o uso de um *reticulum* de 50 por 40 centímetros, subdivididos em dez parcelas de 20 por 10 centímetros, nos quais foi contato a presença de líquens do gênero de interesse. A frequência foi calculada a partir da razão entre o número total de quadrantes avaliados pelo número de quadrantes com a presença do líquen.

Após o trabalho de campo, as amostras foram as amostras coletadas foram lavadas com água deionizada, secas e maceradas para análise laboratorial. A identificação dos elementos químicos presentes nas amostras foi realizada por meio da técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X (XRF), que permite determinar qualitativamente e quantitativamente a presença de diversos elementos químicos, em espectômetro de raios X modelo S1 Turbo, marca Bruker.

Os dados de frequência foram submetidos a análise de variância (ANOVA) seguido por post hoc de Tukey. Ainda, foi analisado a correlação entre a frequência de liquênica e a concentração dos elementos presentes nas amostras por análise de correlação linear simples. Ambos os testes estatísticos foram realizados com o software GraphPad Prism.

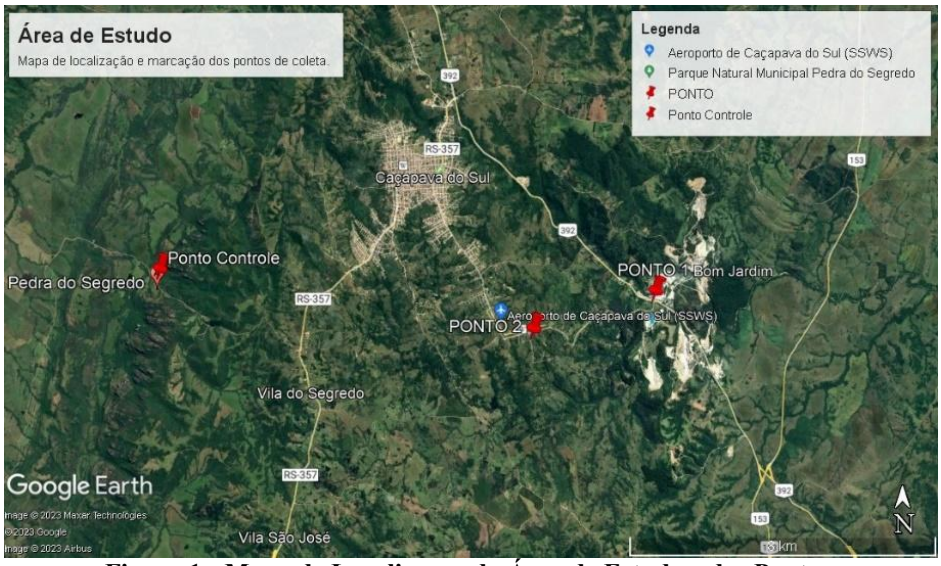


Figura 1 - Mapa de Localizaçao da Área de Estudo e dos Pontos.
FONTES: Autores, 2023.

Resultados e Discussão

A análise da frequência do líquen crostoso *Cryptothecia spp.* indicou diferenças entre os pontos amostrados. O ponto localizado próximo à área de mineração apresentou menor ocorrência de líquens em comparação com o ponto urbano e o ponto controle (figura 2). A menor frequência observada na área mineradora pode estar relacionada à maior presença de material particulado e outros poluentes atmosféricos associados às atividades de extração mineral. Estudos indicam que ambientes com maior concentração de poluentes tendem a apresentar menor diversidade e abundância de líquens, devido à sensibilidade desses organismos às alterações na qualidade do ar (COPPINS, 1973).

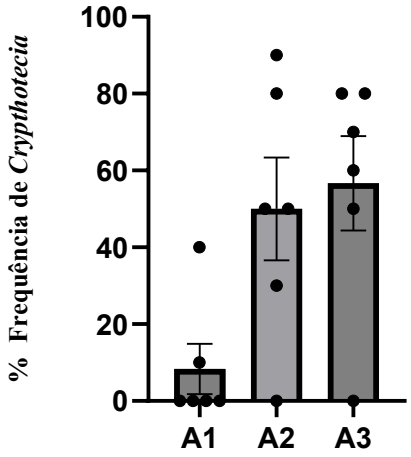


Figura 2 – Porcentagem de frequência de líquens do gênero *Cryptothecia spp.* nos caules dos forófitos analisados nas 3 áreas avaliadas. Resultados apresentados como média e desvio padrão.

As análises realizadas por espectrometria de fluorescência de raios-X identificaram a presença de diversos elementos químicos nas amostras de líquens, sendo os com concentrações mais relevantes os elementos magnésio (Mg), alumínio (Al), silício (Si), ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn), cádmio (Cd), cério (Ce), manganês (Mn), Cloro (Cl), Potássio (K) e cálcio (Ca) (tabela 1). O equipamento utilizado não é capaz de detectar átomos pequenos, motivo pelo qual não se obtiveram os teores de carbono, nitrogênio e oxigênio.

Como observado na tabela 1, a presença de alguns destes elementos parecem diferir entre as áreas de mineração, urbana e controle, os resultados indicaram que determinados elementos apresentaram maiores concentrações nas amostras coletadas próximas às áreas de mineração. Isso sugere que os líquens foram capazes de absorver e acumular partículas presentes no ambiente, reforçando seu potencial como bioindicadores de poluição atmosférica. A área 1 está situado em proximidade a uma área de exploração mineral de calcário, onde os elementos Mg (Magnésio), Ca (Cálcio), Al (Alumínio), Si (Silício), Mn (Manganês), Fe (Ferro), Cu (Cobre) e Zn (Zinco) são detectados como resultado da atividade de mineração. Adicionalmente, os elementos Rh (Ródio), Cd (Cádmio) e Ce (Cério) são identificados como impurezas nos minérios extraídos ou associados às emissões industriais vinculadas a esse processo. Watson et al. (1998) identificam os veículos movidos a diesel como importantes fontes de emissão de poluentes atmosféricos, destacando a presença de cálcio (Ca) e ferro (Fe), o que explica os maiores teores na área 2, mais próxima da área urbana e com mais intenso tráfego de veículos.

Tabela 1 – Teores dos elementos nas amostras de líquens nas 3 áreas estudadas. Valores expressos em porcentagem.

	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Mn	Fe	Cd
A1	6,63±1,95	0,41±0,36	0,10±0,05	0,11±0,01	0,25±0,04	1,73±0,07	0,01±0,0	0,61±0,05	0,06±0,01
A2	6,59±1,01	-	0,13±0,12	0,11±0,0	0,27±0,01	0,33±0,0	0,03±	0,94±0,01	0,10±0,08
A3	6,05±0,35	-	0,08±0,07	0,12±0,01	0,21±0,01	1,09±0,02	-	0,26±0,01	-

Com o intuito de explorar as relações entre as variáveis em nosso estudo, foi conduzida uma análise de correlação, buscando identificar padrões e associações. As frequências liquênicas e os teores dos elementos foram analisados por regressão linear simples, conforme mostrado na figura 3 para os elementos magnésio, cálcio e alumínio. O magnésio mostrou uma fraca correlação negativa, com leve aumento de teores em área com menor frequência de líquens. Possivelmente este dado seja somente um ruido estatístico, não demonstrando uma relação causal. Já no caso dos elementos alumínio e cálcio houve uma correlação negativa significativa, onde locais com alta concentração destes elementos apresentando muito baixa frequência liquênica. O cálcio em altas concentrações é usualmente tóxico para a maioria dos líquens, apesar de algumas espécies serem tolerantes a este elemento. Em específico, diversas espécies do gênero *Cryptothecia* são capazes de lidar com este elemento ionizando o cálcio e formando cristais que são depositados na medula, ficando teoricamente neutralizados. Deste modo, é possível que esta correlação seja causal, com o excesso de cálcio reduzindo os números de líquens, mas não se pode descartar que as causas da morte dos líquens sejam o material particulado em si ou outros elementos e este esteja variando em conjunto com os teores de cálcio. Já o alumínio é um conhecido elemento tóxico para líquens, incluindo líquens crostosos como o aqui estudado. Este elemento tende a causar instabilidade das membranas e consequente diminuição da eficiência de absorção de nutrientes, ainda seu acúmulo pode causar redução da atividade fotossintética, sugerindo que a correlação observada possivelmente seja causal entre os teores de alumínio e a menor frequência de líquens.

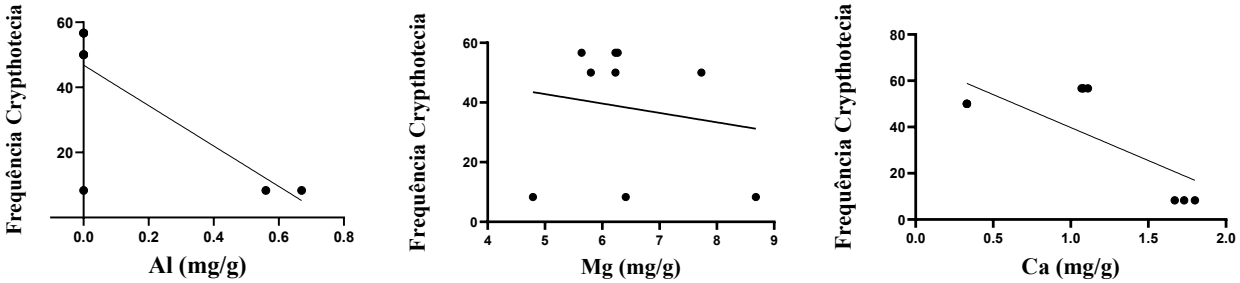


Figura 3 - Correlação entre a frequência do gênero Cryptothecia spp. e a concentração de elementos químicos nas amostras, alumínio (Al), magnésio (Mg) e cálcio (Ca). Os pontos representam as amostras analisadas e a linha contínua indica a reta de regressão linear.

Considerações Finais

Os resultados obtidos confirmam que os líquens apresentam potencial como bioindicadores da qualidade do ar em áreas impactadas por atividades mineradoras. A redução da frequência liquênica observada em locais próximos à mineração indica possível influência da poluição atmosférica sobre esses organismos.

Além disso, a detecção de diversos elementos químicos nas amostras analisadas reforça a capacidade dos líquens de absorver e acumular contaminantes presentes na atmosfera. Esses resultados evidenciam a importância da utilização de bioindicadores no monitoramento ambiental, contribuindo para a avaliação dos impactos das atividades humanas sobre os ecossistemas. A redução observada foi relacionada a variação nos teores de elementos nas amostras liquênicas, em especial de cálcio e alumínio que possivelmente estão causando a redução observada e sejam os principais contaminantes no local estudado.

No entanto, destaca-se a necessidade de estudos futuros com maior número de amostras e pontos de coleta, bem como análises ao longo de diferentes períodos do ano, a fim de obter resultados mais representativos e aprofundar a compreensão das relações entre poluição atmosférica e comunidades liquênicas.

Referências Bibliográficas

ARAÚJO, A.; LUCENA, L. Avaliação da Gestão de Resíduos Sólidos Gerados pelo Setor de Mineração e Beneficiamento de Calcário no RN. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 38. 2018, Maceió.:Enegep,2018. P. 1-14.

BRASIL. Ministério da saúde. Indicadores de mortalidade e fatores de risco relacionados à poluição do ar no Brasil (2019-2021). BRASÍLIA: Ministério da saúde, 2022.

CAVALCANTE, P. M. P. S. Modelo de Gestão da Qualidade do Ar-Abordagem Preventiva e Corretiva. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

CETESB. – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo -2010.

CONTI, M. E.; CECCHETTI, G. Biological monitoring: lichens as bioindicadors of air pollution assessment – a review. Environmental Pollution, v. 114, p. 471 -75, 2001.

COPPINS, B. J. FERRY, B. W.; BADDELEY M. S.; HAWKSWORTH D. L. Air pollution and lichens. The Athlone Press, London, p. 124-142. 1973.

FELLENBERG, G. Introdução aos Problemas da poluição ambiental. São Paulo. 2001.

FRANÇA, HÉLIO et al. Boletim do Setor Mineral. Brasília: 2019. 26 p.

HALE, Jr. M. E. The Biology of Lichens. 3rd. Ed. Baltimore, Edward Arnold, 190 p, 1983.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Dados climáticos e territoriais do município de Caçapava do Sul.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Acordo de Paris. 2015.

PUCKETT, K. Lichens and air pollution. Canadian jornal of Botany, 1988.

XU, R. et al. Global, regional, and national mortality burden attributable to landscape fire-sourced air pollution. The lanced, 2024.

AVALIAÇÃO TEMPORAL DE ODOR POR OLFATOMETRIA DE CAMPO: ESTUDO DE CASO COM MONITORAMENTO SISTEMÁTICO (2024-2026)

1 João Vitor Correa Palhano, 2 Beatriz Mulek, 3 Thomas Augusto Santos Carvalho, 4 Humberto Sadao Hirae, 5 Débora Lia Perazzoli, 6 André Luciano Malheiros

1 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: joao.palhano@envexengenharia.com.br; 2 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: beatriz.mulek@envexengenharia.com.br; 3 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: thomas.carvalho@envexengenharia.com.br; 4 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: humberto.hirae@envexengenharia.com.br; 5 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: debora.perazzoli@envexengenharia.com.br;6 EnvEx Engenharia e Consultoria, e-mail: andre.malheiros@envexengenharia.com.br

Palavras-chave: Poluição por odor; olfatometria; IPO – Índice de Percepção de Odor.

Introdução

O odor, na maioria dos casos, é uma sensação odorante percebida pelo olfato humano resultante da mistura complexa de diversas substâncias odorantes (Gottfried, 2010). No âmbito da poluição atmosférica, o odor é um parâmetro importante em áreas urbanas, pois pode causar incômodo aos receptores (vizinhos de fontes emissoras) (Laor *et al.*, 2014). Ao contrário dos poluentes atmosféricos clássicos, regulados por padrões de qualidade do ar, a legislação nacional é escassa quanto a odor em todas as esferas (federal, estadual e municipal) (Vieira, 2013), além de ser muito subjetiva e não estabelecer critérios quantitativos claros, o que dificulta o tratamento e solução do problema (Perazzoli, 2022). O odor pode ser enquadrado como poluente, segundo a Resolução CONAMA 506/2024, se causar inconveniente ao bem-estar público ou for prejudicial ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade (Brasil, 2024). Neste contexto, o monitoramento do odor surge como uma necessidade e uma ferramenta para o diagnóstico, bem como o acompanhamento a longo prazo da eficácia de medidas e sistemas de controle (Perazzoli, 2022). Existem diversos métodos de monitoramento disponíveis, tanto métodos analítico-instrumentais como métodos sensoriais (olfatométricos) (Bax, Sironi, Capelli, 2020), dentre os quais a olfatometria de campo se destaca pela versatilidade para monitoramento da imissão, ou seja, no receptor situado na comunidade (Perazzoli, 2022).

As condições meteorológicas interagem com os processos de emissão de poluentes atmosféricos e com sua dispersão no ambiente (Schmegel, 2024). Portanto, o registro de dados meteorológicos ao longo do monitoramento de odor é importante para auxiliar a interpretação dos resultados obtidos.

O objetivo deste este artigo é apresentar um estudo de caso da avaliação de impacto de odor com olfatometria de campo no entorno de uma indústria emissora de odor, empregando os critérios de referências internacionais e o Índice Ponderado de Odor (IPO) (Malheiros *et al.*, 2018), comparando os resultados com dados meteorológicos registrados no período de monitoramento.

Material e Métodos

Caracterização da área, dados e período de pesquisa: A área do estudo abrange o entorno de uma indústria emissora de substâncias odoríferas, localizada no estado de Santa Catarina, com presença de zonas residenciais vizinhas. O órgão ambiental licenciador solicitou a realização do monitoramento de odores com frequência bimestral. Portanto, o estudo abrangeu os resultados de oito campanhas de monitoramento de odor em campo, realizadas entre novembro/2024 e janeiro/2026, cada qual com duração de três dias, contemplando diversas medições em dez pontos distribuídos na área de interesse no entorno da indústria. Adicionalmente, os registros das condições meteorológicas da região, isto é, temperatura, pressão atmosférica, precipitação, velocidade e direção do vento, obtidos por estação oficial do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, foram utilizados para a interpretação dos resultados do monitoramento de odor.

Metodologia Aplicada: O monitoramento de odor empregou o método da Olfatometria de Campo (OC) com o olfatômetro *Nasal Ranger*, equipamento portátil capaz de auxiliar o usuário a medir a concentração de odor em campo de forma objetiva (St. Croix Sensory, Inc, 2020). Seu princípio de funcionamento se resume em uma mistura, em razões volumétricas discretas, de ar ambiente contendo odores, com ar filtrado livre de odores. Estas razões volumétricas discretas são chamadas de taxas de diluição (em inglês "*Dilution-to-Threshold* – D/T) (St. Croix Sensory, Inc, 2020). O olfatômetro de campo utilizado possui orifícios no disco D/T que medem as seguintes taxas de diluição: 60, 30, 15, 7, 4 e 2, sendo que o nível 60 corresponde ao odor de maior concentração e 2 ao odor de menor concentração.

Para avaliar os resultados obtidos, requer-se a existência de padrões aprovados em legislação. Como não há legislação a nível nacional, utilizaram-se referências especializadas na literatura internacional, já citadas em trabalhos publicados no Brasil por Perazzoli *et al.* (2022, 2024). *Easter et al. (2009*) indica que o critério de avaliação dos impactos dos odores é de um período de 3 minutos, em que o limiar da detecção de pico dos odores deve se manter em 99% dos casos abaixo de 7 D/T. Portanto, foram adotados os critérios já apresentados por Malheiros *et al.* (2018):

- Nível Desejável: Intensidade de Odor no entorno < 7 D/T;
- Nível Tolerável: Intensidade de Odor no entorno entre 7 e 30 D/T;
- Nível de Incômodo: Intensidade de Odor no entorno > 30 D/T.

Além deste critério, foi utilizada a ferramenta matemática denominada Índice Ponderado de Odor (IPO) (Malheiros *et al*., 2018; Perazzoli *et. al*., 2022, 2024). Ele é calculado considerando-se duas variáveis: Concentração de odor (Coi) e Frequência de ocorrência de cada classe de concentração de odor (Foi). O cálculo é realizado através do produto dessas variáveis, como segue:

$$IPO = \sum_{i} \frac{Co_i \times Fo_i}{100}$$

Equação (01)

Onde:
Co_i = Concentração de Odor;
Fo_i= Frequência de ocorrência de odor da classe de concentração de odor;
i = classe de concentração de odor (i = < 2, 2, 4, 7, 15, 30; 60).

O valor mínimo é igual a 1 e refere-se a 100% da frequência de ocorrência de intensidade de odor igual a < 2 D/T. O valor máximo possível deste índice é 60, que se refere a 100% da frequência de ocorrência de intensidade de odor igual ou acima de 60 D/T. Logo, quanto mais próximo a 1, menor o registro de ocorrências de odor com intensidades acima do Nível Desejável.

Para a análise da influência dos dados meteorológicos, os valores de IPO calculados foram tabulados e comparados com dados de precipitação acumulada, temperatura ambiente, pressão atmosférica, velocidade e direção predominante do vento nos períodos de amostragem de cada campanha, obtidos da estação meteorológica automática do INMET mais próxima, a cerca de 2,4 km do empreendimento.

Conforme Perazzoli *et al.* (2022), o cruzamento de dados de concentração de poluentes com dados de direção e velocidade do vento possibilita a construção de gráficos chamados de rosas de poluentes, ferramenta capaz de auxiliar na identificação de fontes de emissão e na interpretação de dados de qualidade do ar. Com base nessa premissa, elaborou-se também uma rosa de distribuição do Índice Ponderado de Odor (IPO), utilizando a linguagem de programação R.

Resultados e Discussão

A Tabela 01 mostra o resultado do Índice Ponderado de Odor (IPO) a partir das variáveis concentração de odor e frequência de ocorrência de concentração de odor, calculado conforme Equação (01) para cada campanha do período de estudo. No período de 2024 a 2026, os resultados mostraram que a concentração de odor esteve no Nível Desejável (abaixo de 7 D/T) em 97% das medições. Em 3% das medições os resultados classificaram-se como Nível Tolerável (entre 7 D/T e 30 D/T). Não foi registrada nenhuma concentração de odor classificada como Nível de Incômodo (> 30 D/T).

Tabela 01: Índice Ponderado de Odor (IPO) para os anos de 2024 a 2026.

Ano	Concentração (D/T)	< 2	2	4	7	15	30	60	Total	Nível (%)	
										Desejável	Tolerável
Nov/24	Frequência (%)	81	3	3	8	5	1	0	100	87%	13%
	Índice IPO	0,81	0,06	0,11	0,53	0,71	0,28	0,0	2,50		
Fev/25	Frequência (%)	90	3	2	1	4	0	0	100	95%	5%
	Índice IPO	0,90	0,06	0,08	0,07	0,60	0,0	0,0	1,71		
Mar/25	Frequência (%)	97	2	1	97	0	0	0	100	100%	0%
	Índice IPO	0,97	0,04	0,04	0,0	0,0	0,0	0,0	1,05		
Mai/25	Frequência (%)	91	6	3	0	0	0	0	100	100%	0%
	Índice IPO	0,91	0,12	0,12	0,0	0,0	0,0	0,0	1,15		
Jul/25	Frequência (%)	86	5	1	6	2	0	0	100	92%	8%
	Índice IPO	0,86	0,10	0,04	0,42	0,30	0,0	0,0	1,72		
Set/25	Frequência (%)	96	3	1	5	0	0	0	100	100%	0%
	Índice IPO	0,96	0,05	0,05	0,0	0,0	0,0	0,0	1,06		
Nov/25	Frequência (%)	89	5	5	1	0	0	0	100	99%	1%
	Índice IPO	0,89	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,89		
Jan/26	Frequência (%)	95	4	1	0	0	0	0	100	100%	0%
	Índice IPO	0,95	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,95		
Período completo	Frequência (%)	91	4	2	2	1	0	0	100	97%	3%
	Índice IPO	0,91	0,08	0,07	0,15	0,16	0,07	0,0	1,44		

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 02 resume as condições meteorológicas da região em cada período monitorado, comparando-as com os valores de índice IPO obtidos. Nela, nota-se que dentre os parâmetros meteorológicos estudados, a direção predominante do vento é o fator que mais influencia a concentração de odor na região estudada. Valores maiores de Índice Ponderado de Odor (IPO) estiveram associados aos registros de vento vindos predominantemente da direção Nordeste (NE), direção favorável ao transporte das fontes de emissão de odor para os pontos de monitoramento do entorno.

Observa-se também que nos meses de maio e julho de 2025, as concentrações de odor na atmosfera, representadas pelo IPO, voltam a subir. Sazonalmente, esses meses também são marcados por temperaturas mais baixas, o que aumenta a estabilidade atmosférica e pode causar inversões térmicas, fenômeno que inibe a dispersão vertical das plumas e confinam os poluentes em camadas rasas próximas ao solo, o que pode resultar em aumento dos valores de Índice Ponderado de Odor (IPO).

Tabela 02: Dados de meteorologia registrados nos períodos de monitoramento de odor.

Ano	Índice IPO	Precipitação Acumulada (mm)	Velocidade do Vento Média (m/s)	Rajada Média (m/s)	Direção Predominante do Vento	Temperatura Média (°C)	Pressão Média (mB)
Nov/24	2,50	39,2	3,32	6,92	NE	24,73	933,27
Fev/25	1,71	9,4	2,99	6,37	NE	26,00	932,96
Mar/25	1,05	0	3,32	6,17	SE	23,91	937,96
Mai/25	1,15	0	3,07	5,59	E	18,44	942,62
Jul/25	1,72	0	3,54	5,93	E	(1)	941,80
Set/25	1,06	7,2	3,31	6,19	E	(1)	938,68
Nov/25	0,89	6,4	2,60	5,04	E	(1)	938,13
Jan/26	0,95	0	4,04	7,73	ESE	(1)	936,42

Nota (1): Sem registro de dados.

Fonte: Elaboração própria.

A fim de auxiliar na avaliação dos resultados e na compreensão da influência da direção do vento em cada campanha, a Figura 01 apresenta uma comparação gráfica dos valores entre 2024 e 2026, juntamente com a rosa de distribuição dos índices por direção predominante do vento. Ressalta-se que as fontes de emissão estão localizadas a Nordeste do empreendimento.

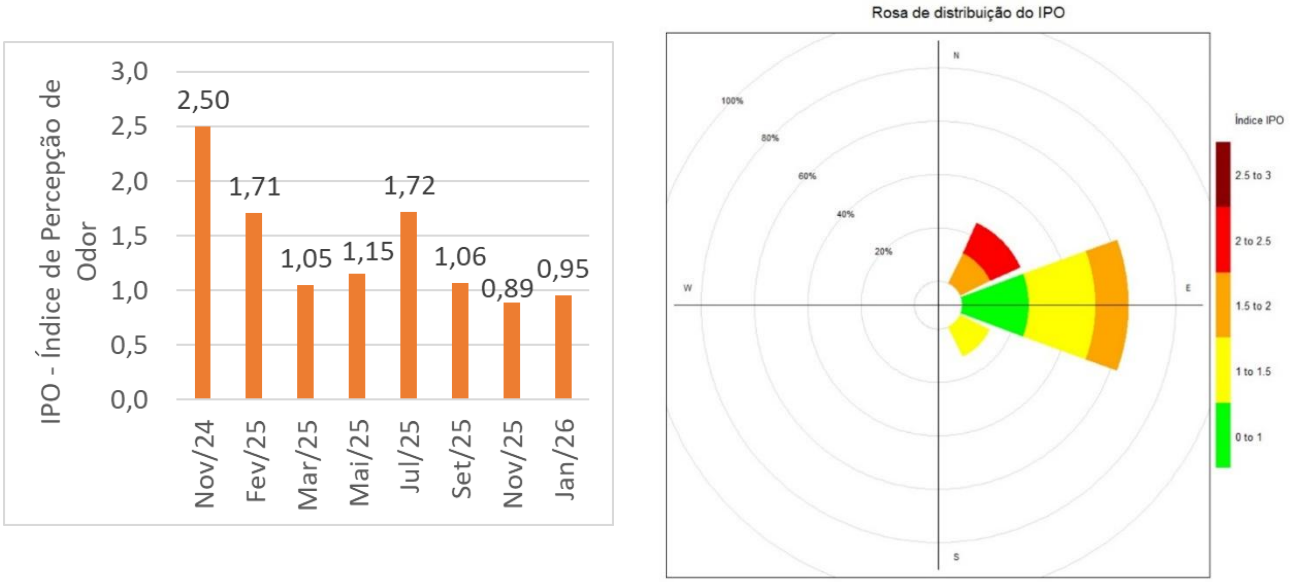


Figura 01: Valores de IPO e suas distribuições por direção predominante do vento para as oito campanhas realizadas entre 2024 e 2026.
Fonte: Elaboração própria.

Conforme esperado devido à localização das fontes de emissão, os ventos nas direções Nordeste (NE) aumentam a percepção de odor no entorno do empreendimento, resultando em maiores valores de Índice Ponderado de Odor (IPO). Observa-se que a direção Leste apresentou uma maior recorrência ao longo das campanhas de monitoramento, mas os resultados obtidos foram inferiores aos da direção Nordeste. No entanto, mesmo com a predominância de ventos nessas direções, os níveis se mantiveram abaixo do limiar de incômodo em todas as campanhas. De modo geral, observa-se uma redução contínua do IPO ao longo das avaliações: entre novembro de 2024 e novembro de 2025, a queda foi de 64,4%, o que indica uma possível melhoria no controle de emissões por parte do empreendimento.

Considerações Finais

Os resultados demonstraram que, embora os níveis de odor tenham se mantido nas faixas desejável e tolerável, houve melhoria da qualidade ambiental ao longo do período avaliado, tendo em vista que os valores calculados do IPO foram reduzindo ao longo do tempo. Além disso, as condições meteorológicas mostraram ser relevantes para os resultados de percepção de odor no entorno. Nota-se que estas condições não são passíveis de serem controladas pela indústria, portanto, fica demonstrado que o monitoramento periódico, em condições meteorológicas diversas e críticas, é de grande importância pra uma adequada avaliação de impacto de odor com olfatometria de campo, conforme já recomendado por outros autores (Vieira, 2013; Laor *et al.*, 2014; Brancher *et al*., 2017; Perazzoli, 2022).

Referências

BAX, C.; SIRONI, S.; CAPELLI, L. How Can Odors Be Measured? An Overview of Methods and Their Applications. **Atmosphere**, v. 11, p.92, 2020.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 506**, de 5 de julho de 2024. Estabelece padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para sua aplicação. Diário Oficial da União, Brasília, 5 jul. 2024.

DCAPELLI, L.; SIRONI, S.; ROSSO, R. D.; CENTOLA, P. II GRANDE, M. **A comparative and critical evaluation of odour assessment methods in a landfill site**. Atmospheric Environment v. 42, p. 7050-7058, 2008.

CAPELLI, L.; SIRONI, S.; ROSSO, R. D.; GUILLOT, J. M. Measuring odours in the environment vs. dispersion modeling: A review. **Atmospheric Environment** v. 79, p. 731-743, 2013.

GOTTFRIED, J. A. Central mechanisms of odour object perception. **Nature reviews Neuroscience**, v. 11, n. 9, p. 628–641, 2010.

LAOR, Y., PARKER, D., PAGÉ, T. Measurement, prediction, and monitoring of odors in the environment: a critical review. **Rev Chem Eng**. v. 30(2), p. 139-166, 2014.

MALHEIROS, A. L. PERAZZOLI, D. L. SCHRAIER, J. A. NOCKO, H. R. Olfatometria de campo como ferramenta de avaliação de impacto ambiental relativo ao odor. **In: SIMPÓSIO MAUI: MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL, 3., 2018, Curitiba. Anais [...]** Curitiba: Setor de Tecnologia da UFPR, 2018. p. 222 - 234.

PERAZZOLI, D. L.; GRAUER, A. F.; MALHEIROS, A. L.; ROCHA JUNIOR, R.; PALHANO, J. V. C. Rosa de poluentes como ferramenta de apoio à interpretação [sic] de dados de qualidade do ar para identificação de fontes emissoras *(source-apportionment*). *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA, 11., 2022, Curitiba. **Anais [...].**

PERAZZOLI, D. L. **Proposta de Estratégias para Avaliação de Odor Ambiental no Brasil**. 232 p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial). Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

PERAZZOLI, D. L.; PALHANO, J. V. C.; PINHEIRO, M. L.; SCHRAIER, J. A.; MALHEIROS, A. L. Monitoramento de odor de longo prazo com olfatometria de campo: um estudo de caso entre 2018 e 2021. **In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**, **11., 2022, Curitiba. Anais [...].**

PERAZZOLI, D. L.; PALHANO, J. V. C.; MALHEIROS, A. L.; NOCKO, H. R.; CARVALHO, T. A. S. Monitoramento de odor de longo prazo com olfatometria de campo: um estudo de caso entre 2018 e 2023. **In: AIR POLLUTION CONFERENCE BRAZIL; CMAS SOUTH AMERICA, 5., 2024, São Paulo. Anais [...].**

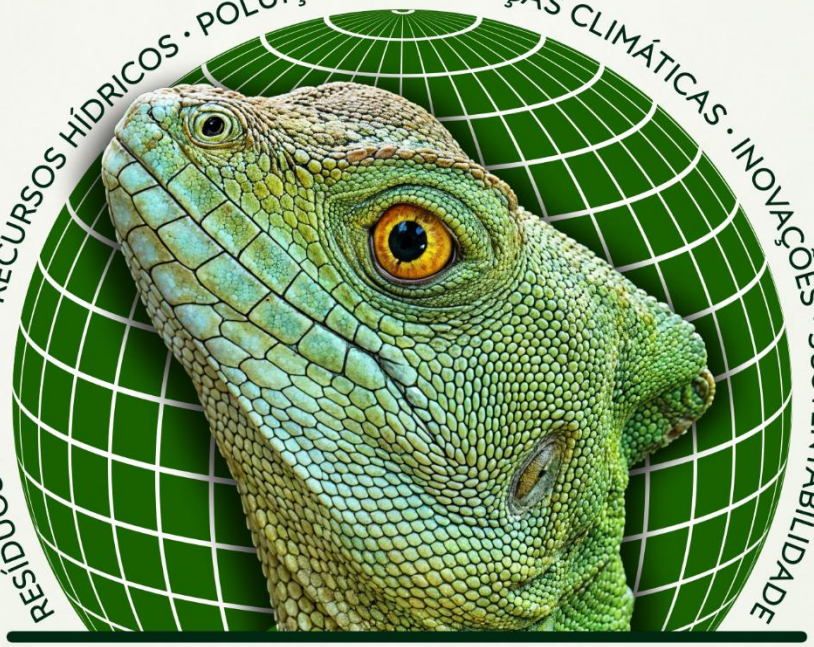
SCHMEGEL, L. **Avaliação dos Controles de Emissões de Poluentes Atmosféricos no Terminal Marítimo Ponta da Madeira, São Luís, MA.** 48 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciências Ambientais) – Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável - ITV DS, Belém/PA, 2024.

VIEIRA, M. M. **Abordagem de procedimentos legais para o controle de incômodos olfativos**. 191 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

ST. CROIX SENSORY, INC. **Nasal Ranger Field Olfactometer – Operation Manual**. U.S. Patent nº 6.595.037, v. 7.1. Lake Elmo: St. Croix Sensory, 2020.

ÁREA TEMÁTICA 23

RACISMO AMBIENTAL E JUSTIÇA SOCIOAMBIENTAL



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

OBSTÁCULOS DE IDENTIFICAÇÃO DE COMPORTAMENTOS PRÓ-AMBIENTAIS NA POPULAÇÃO VULNERÁVEL: O CASO DA REGIÃO METROPOLITANA DE CAMPINAS

Isabela Pereira Gaspar[1], Ana Paula Bortoleto[2]
1 UNICAMP, e-mail:i175182@dac.unicamp.br; 2 FECFAU - UNICAMP, e-mail:bortolet@unicamp.br

Palavras-chave: comportamento pró-ambiental; vulnerabilidade social; General Ecological Behavior

Introdução

A compreensão do processo de tomada de decisão dos indivíduos é fundamental para a promoção de comportamentos pró-ambientais (CPA) (Artinger; Bortoleto; Katsikopoulos, 2016). Diferentes tipos de conhecimento influenciam a adoção dessas práticas, incluindo o conhecimento relacionado à ação, o conhecimento efetivo e o conhecimento do sistema (Frick; Kaiser; Wilson, 2004). Além disso, as normas sociais exercem forte influência sobre o comportamento individual, orientando condutas coletivas e contribuindo para a difusão de práticas ambientalmente responsáveis. Entretanto, diversas ações associadas à sustentabilidade ainda são percebidas como difíceis de serem adotadas, especialmente aquelas relacionadas à geração de resíduos e aos padrões de consumo (Ribeiro-Rodrigues; Bortoleto; Costa Fracalanza, 2021).

No âmbito das escolhas alimentares, os indivíduos frequentemente enfrentam decisões que envolvem diferentes custos e benefícios, como saúde, impacto ambiental e acessibilidade econômica (Bataillard et al., 2022). Nesse contexto, o preço dos alimentos torna-se um fator decisivo, especialmente para populações em situação de vulnerabilidade socioeconômica, que tendem a priorizar opções mais acessíveis. Essa dinâmica se intensifica diante do avanço da insegurança alimentar, um fenômeno complexo influenciado por fatores econômicos, sociais e institucionais (Premanandh, 2011). Dados recentes indicam aumento da insegurança alimentar global, afetando principalmente grupos de baixa renda e limitando o acesso a alimentos nutritivos, como frutas e vegetais (Tavares et al., 2024).

Além dos fatores estruturais, aspectos psicológicos e sociais também influenciam a adoção de comportamentos pró-ambientais. Elementos como valores, atitudes, conhecimento ambiental e controle comportamental percebido contribuem para explicar o engajamento em práticas sustentáveis (Kollmuss; Agyeman, 2002). Entretanto, em contextos de vulnerabilidade socioeconômica, o acesso limitado à educação e à informação, somado às restrições financeiras, pode reduzir a capacidade de adoção dessas práticas, levando indivíduos a priorizar necessidades imediatas em detrimento de preocupações ambientais (Tavares et al., 2024). Dessa forma, políticas públicas voltadas à promoção de comportamentos sustentáveis precisam considerar as desigualdades sociais e integrar dimensões econômicas, sociais e comportamentais para ampliar a participação de populações vulneráveis em práticas pró-ambientais.

Assim, o objetivo deste estudo é analisar como o comportamento pró-ambiental se manifesta entre populações em situação de vulnerabilidade social na Região Metropolitana de Campinas, buscando entender as limitações estruturais e os dilemas presentes em seu cotidiano. Pretende-se então identificar práticas e percepções relacionadas ao comportamento pró-ambiental; analisar como fatores socioeconômicos influenciam a adoção dessas práticas e; discutir as tensões entre responsabilidade ambiental individual e coletiva.

Métodos

Este estudo adotou uma abordagem metodológica quantitativa para investigar os obstáculos enfrentados por populações em situação de vulnerabilidade socioeconômica na adoção de comportamentos pró-ambientais relacionados às escolhas alimentares. Iniciou-se a pesquisa com a aplicação de um questionário composto por três seções: motivação intrínseca pró-ambiental, mensurada pelo instrumento *General Ecological Behavior (GEB)*; conhecimento sobre problemas ambientais relacionados ao desperdício de alimentos; e informações sociodemográficas. O instrumento também incorporou a *Food Insecurity Experience Scale (FIES)*, desenvolvida pela FAO, para avaliar o nível de insegurança alimentar dos participantes. O questionário foi aplicado de forma on-line por meio da plataforma *Google Forms*®, garantindo participação voluntária e anonimato dos respondentes.

A amostra foi composta por aproximadamente 40 participantes. Os participantes compunham a categoria de trabalhadores de empresas terceirizadas que atuam no campus de Barão Geraldo da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). A seleção seguiu uma estratégia de amostragem por cotas estratificada, buscando refletir a distribuição local de sexo, estado civil e escolaridade.

Os dados coletados foram analisados em etapas complementares. Inicialmente, avaliou-se a confiabilidade dos instrumentos por meio do coeficiente alfa de Cronbach e examinaram-se associações bivariadas por correlações de *Spearman*. Em seguida, empregou-se Modelagem de Equações Estruturais (SEM) para investigar relações entre motivação intrínseca, conhecimento ambiental e comportamentos pró-ambientais. Adicionalmente, aplicou-se o modelo de *Rasch* ao instrumento *GEB* para estimar a propensão pró-ambiental em escala intervalar. Por fim, os resultados quantitativos foram integrados às evidências qualitativas, permitindo interpretar como motivações individuais, custos percebidos e heurísticas cognitivas influenciam a adoção de comportamentos pró-ambientais no contexto alimentar.

Resultados e Discussão

Na amostra, observou-se predominância de mulheres na faixa etária entre 40 e 54 anos, com maior presença de participantes solteiros ou divorciados. As ocupações concentraram-se em funções operacionais, como auxiliar de cozinha e serviços gerais, indicando inserção em setores associados a menor remuneração e maior vulnerabilidade socioeconômica. A maioria dos respondentes reside com dois a quatro moradores em municípios da Região Metropolitana de Campinas, principalmente em Campinas, e quase todos declararam não participar de organizações sociais.

Em termos socioeconômicos, predominam rendas domiciliares intermediárias, com associação esperada — embora não linear — entre renda e escolaridade. As análises psicométricas indicaram boa consistência interna dos instrumentos utilizados, especialmente para os construtos de motivação pró-ambiental, conhecimento ambiental e insegurança alimentar. As correlações de *Spearman* (Tabela 01) apontaram tendências positivas entre motivação, conhecimento e comportamento pró-ambiental, embora sem significância estatística, possivelmente em função do tamanho amostral. Por outro lado, foi observada correlação positiva e significativa entre insegurança alimentar e comportamento pró-ambiental.

	motivacao	conhecimento	FIES	comportamento
motivacao	1,000	0,387*	0,326	0,319
conhecimento	0,387*	1,000	0,033	0,107
FIES	0,326	0,033	1,000	0,337*
comportamento	0,319	0,107	0,337*	1,000

*grau de significância p<0,05

Tabela 01: Coeficiente de correlação de *Spearman (ρ).*
Fonte: Autoras (2026)

A modelagem de equações estruturais indicou que a motivação exerce efeito direto sobre o comportamento pró-ambiental e efeito indireto mediado pelo conhecimento ambiental. Em contraste, a insegurança alimentar não apresentou associação significativa com a motivação, sugerindo influência predominantemente direta sobre o comportamento. Os resultados foram corroborados pelo modelo de *Rasch*, que indicou boa adequação psicométrica dos instrumentos e distribuição consistente dos participantes ao longo dos construtos analisados.

A aplicação de questionários em populações em situação de vulnerabilidade socioeconômica envolve desafios metodológicos importantes, incluindo limitações de acesso, representatividade e possíveis vieses nas respostas. Estudos sobre consumo alimentar e insegurança alimentar frequentemente utilizam amostras pequenas e contextos locais específicos, o que restringe a generalização dos resultados. Além disso, comportamentos socialmente sensíveis, como desperdício de alimentos, podem ser subestimados pelos participantes devido ao desejo de apresentar respostas socialmente aceitáveis (Jurgens, 2023). No presente estudo, também foram observadas dificuldades de compreensão do questionário, o que exigiu aplicação assistida e maior tempo de resposta, reforçando a importância de estratégias de mediação na coleta de dados em contextos de baixa escolaridade (Schmitt et al., 2021).

Os resultados indicam que o perfil dos participantes é compatível com situações de vulnerabilidade socioeconômica, evidenciado tanto pelos níveis predominantes de insegurança alimentar leve a moderada quanto por indicadores indiretos de baixa renda e menor acesso a bens duráveis. Esse cenário reflete tendências recentes observadas no Brasil, onde a insegurança alimentar foi intensificada por crises econômicas e pelos efeitos da pandemia de COVID-19 (Schmitt et al., 2021). Ao mesmo tempo, observou-se que, embora os participantes demonstrem preocupação com questões ambientais, seus níveis de conhecimento ambiental e de autoeficácia são relativamente baixos, padrão também identificado em estudos anteriores sobre alfabetização ambiental.

De modo geral, os resultados sugerem que a adoção de comportamentos pró-ambientais no contexto alimentar depende da interação entre fatores cognitivos, sociais e estruturais. Níveis educacionais mais elevados podem contribuir para melhores estratégias de enfrentamento da insegurança alimentar e maior engajamento em práticas sustentáveis. Entretanto, as escolhas alimentares também são fortemente condicionadas por normas sociais e restrições econômicas, que influenciam as estratégias cotidianas de consumo (Owens et al., 2022). Dessa forma, políticas públicas e iniciativas de educação ambiental devem considerar as limitações materiais enfrentadas por populações vulneráveis, evitando abordagens que responsabilizem exclusivamente os indivíduos por comportamentos condicionados por desigualdades estruturais

Considerações Finais

Os resultados deste estudo indicam que a adoção de comportamentos pró-ambientais no contexto alimentar entre populações em situação de vulnerabilidade socioeconômica é influenciada por uma combinação de fatores cognitivos, sociais e estruturais, destacando-se o papel da motivação e do conhecimento ambiental, bem como as condições materiais que moldam as escolhas cotidianas de consumo. Embora os participantes demonstrem preocupação com questões ambientais, níveis mais baixos de conhecimento e limitações econômicas podem restringir a adoção de práticas alimentares mais sustentáveis. Nesse sentido, os achados reforçam a importância de estratégias de educação ambiental associadas a políticas públicas que considerem as

desigualdades socioeconômicas e ampliem o acesso a alimentos saudáveis e sustentáveis. Como limitações, destaca-se o tamanho reduzido da amostra, a natureza exploratória da pesquisa e a concentração geográfica dos participantes na Região Metropolitana de Campinas, fatores que limitam a generalização dos resultados. Além disso, o uso de questionários autodeclarados pode estar sujeito a vieses de resposta. Pesquisas futuras podem ampliar o tamanho e a diversidade da amostra, incorporar métodos longitudinais e aprofundar a investigação sobre como intervenções educativas e políticas públicas podem fortalecer a adoção de comportamentos pró-ambientais em contextos de vulnerabilidade social.

Agradecimentos

As Autoras gostariam de agradecer a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ARTINGER, F.M.; BORTOLETO, A.P.; KATSIKOPOULOS, K.V. Environmental Behavior and Fast and Frugal Heuristics. In: BECKENBACH, Frank; KAHLENBORN, Walter (Orgs.). **New Perspectives for Environmental Policies Through Behavioral Economics**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 195–211.

BATAILLARD, D. et al. **Finanças, natureza e sistemas alimentares - Oportunidades para o sistema agroalimentar brasileiro. NatureFinance**, 28 set. 2022. Disponível em: <https://www.naturefinance.net/br/resources-tools/financas-natureza-e-transicoes-alimentares/>. Acesso em: 10 fev. 2026

FRICK, J.; KAISER, F.; WILSON, M. Environmental knowledge and conservation behavior: Exploring prevalence and structure in a representative sample. **Personality and Individual Differences**, v. 37, p. 1597–1613, 1 dez. 2004.

JÜRGENS, U. Does Food Shopping Behaviour Determine Food Waste Vulnerability in Private Households? Quantitative Analysis on Case Studies from Germany. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 6, 2023.

KOLLMUSS, A.; AGYEMAN, J. Mind the Gap: Why do people act environmentally and what are the barriers to pro-environmental behavior? **Environmental Education Research**, v. 8, n. 3, p. 239–260, ago. 2002.

OWENS, C. et al. Context Matters for Food Security: Multi-Sited Evidence of Shared Cultural Models of Food Consumption. **Ecology of Food and Nutrition**, v. 61, n. 2, p. 162–181, 2022.

PREMANANDH, J. Factors affecting food security and contribution of modern technologies in food sustainability. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 91, n. 15, p. 2707–2714, 2011.

RIBEIRO-RODRIGUES, E.; BORTOLETO, A. P.; COSTA FRACALANZA, B. Exploring the influence of contextual and sociodemographic factors on waste prevention behaviour - the case of Campinas, Brazil. **Waste Management**, v. 135, p. 208–219, 1 nov. 2021.

SCHMITT, V. G. H. et al. Consumption behavior and residential food waste during the COVID-19 pandemic outbreak in Brazil. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 7, 2021.

TAVARES, M. et al. The influence of pricing interventions in food choices on Brazil: An agent-based modelling approach. **SUSTAINABLE PRODUCTION AND CONSUMPTION**, v. 44, p. 250–262, jan. 2024.

DESIGUALDADE AMBIENTAL EM UMA CIDADE DE GRANDE PORTE DO SUL DO BRASIL

1 Aneicy Laís Dias Muller de Souza, 2 Eucilene Alves Santana, 3Maurício Moreira dos Santos, 4 Edson Fontes de Oliveira

1 UTFPR, e-mail: aneicydm@gmail.com; 2 FIOCRUZ, e-mail: eucilene.alvessantana@gmail.com; 3 UEL, e-mail: mmsantos.geo@gmail.com; 4 UTFPR, e-mail: edsonoliveira@utfpr.edu.br

Palavras-chave: Racismo ambiental; saneamento básico; vulnerabilidade socioambiental.

Introdução

Os desafios para o enfrentamento às mudanças climáticas têm evidenciado a distribuição desproporcional dos impactos ambientais, dos recursos naturais e do precário acesso ao saneamento básico direcionado às populações mais pobres e minorias étnico-raciais. Essas questões têm destacado conceitos cada vez mais importantes com viés ambiental, tais como injustiça, desigualdade, vulnerabilidade e racismo ambiental. Tais conceitos apontam que populações pobres, racializadas e periféricas sofrem pela negligência de políticas públicas e infraestruturas precárias.

No Brasil, estas desproporções possuem raízes no desenvolvimento econômico, que se sucedeu por uma colonização escravista e exploratória, solidificando a desigualdade socioeconômica como resultado da estrutura marcada por uma rígida divisão de classes entre uma elite dominante e uma massa de trabalhadores explorados e marginalizados. Essa desigualdade não é apenas econômica, mas também política e cultural no qual se desenvolveu o racismo estrutural e institucional. Estes são definidos por um sistema de práticas, normas e instituições sociais que produz e reproduz desigualdades raciais, ao beneficiar grupos historicamente privilegiados, e prejudicar grupos historicamente marginalizados. Desta condição, surge o racismo ambiental, que tem abafado os direitos de um ambiente digno e seguro para a população negra, indígena, quilombola, ribeirinha, camponesa e periférica. Afeta-se sobretudo a saúde dessas pessoas, por estarem condicionadas economicamente e socialmente a habitarem regiões de vulnerabilidade ambiental, seja devido aos riscos naturais de mudanças climáticas, ou em razão de ações antropogênicas, expressa pela ausência ou precariedade de esgotamento sanitário, coleta de resíduos, água não tratada, entre outros. Tais condições podem servir como indicadores de vulnerabilidade, que de maneira estruturada apontam para regiões e populações afetadas em diferentes níveis. Logo, é importante o uso de ferramentas auxiliares na constatação destas desigualdades, viabilizando a elaboração de políticas públicas e ações de combate.

Neste contexto, pretende-se verificar a ocorrência de desigualdade ambiental e a possível existência de racismo ambiental, no município de Londrina-PR, uma cidade de grande porte localizada no norte do Estado. Inspirando-se em pesquisas anteriores, que relacionam dados de condições de moradias, saneamento básico e raça, extraídos do IBGE, a dados de saúde populacional.

Objetiva-se construir um índice de vulnerabilidade ambiental, a partir de indicadores ambientais, sociodemográficos de saneamento e de saúde; Caracterizar a distribuição espacial da vulnerabilidade ambiental no município, identificando áreas de maior concentração de risco; Analisar a associação entre vulnerabilidade ambiental e indicadores de saúde, selecionados como desfechos sensíveis às exposições ambientais; Examinar a desigualdades socioespacial e étnico -raciais, por meio a relação entre a vulnerabilidade ambiental e a composição populacional; Identificar padrões desigualdade e racismo ambiental, a partir da sobreposição entre vulnerabilidade ambiental e composição populacional; Avaliar o desempenho do índice na identificação de áreas prioritárias, com base na concordância de agravos de saúde.

Material e Métodos

A área selecionada para realização da pesquisa, é a cidade de Londrina, possui grande porte e população estimada de 581.382 habitantes, sendo o segundo município mais populoso do estado do Paraná. Na figura 1 é demonstrado o mapa de localização.

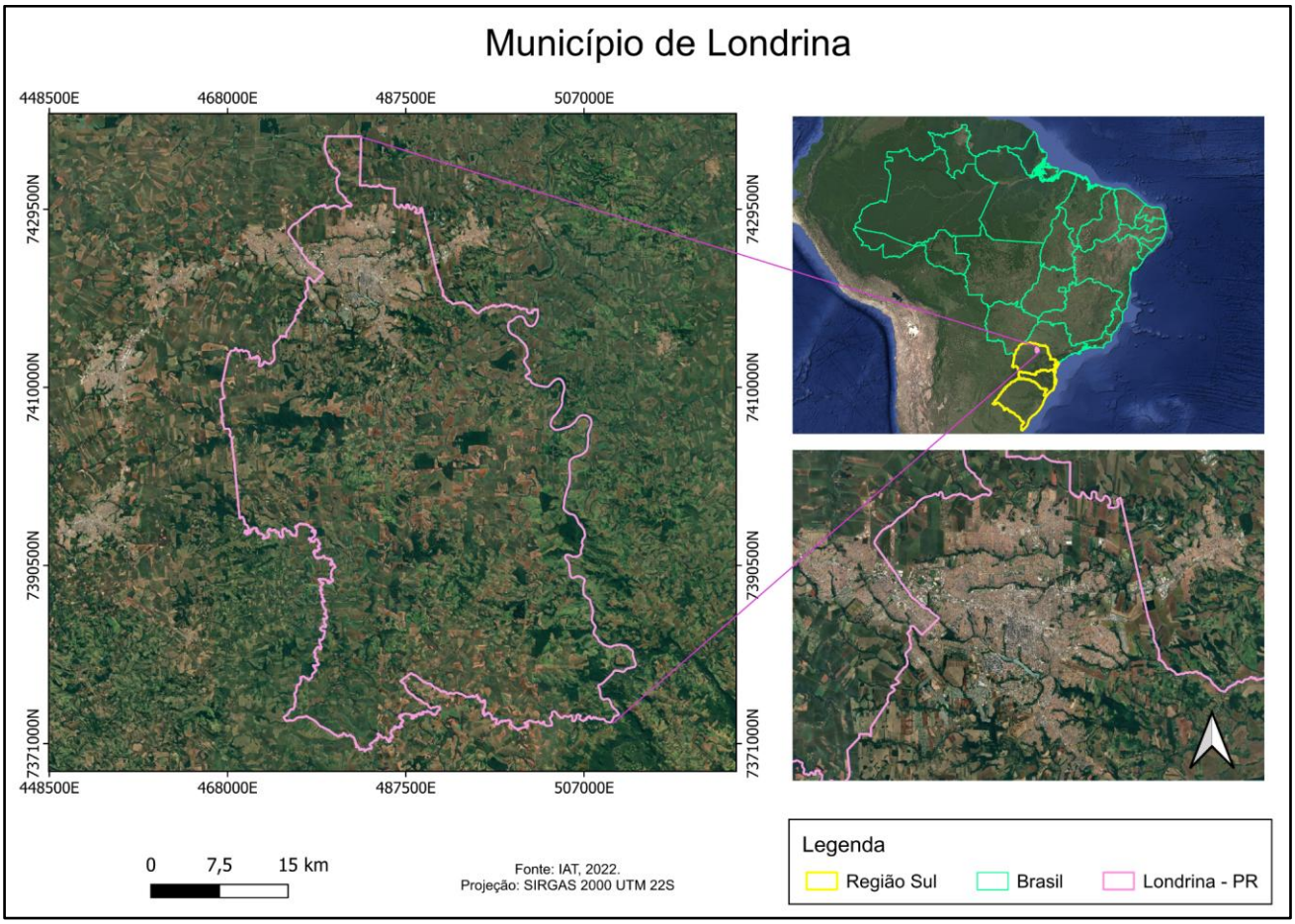


Figura 01: Mapa de localização do Município de Londrina (Paraná, Brasil).
Fonte: Autora (2026)

A pesquisa baseia-se no Índice de Vulnerabilidade Social (IVS), que trata-se de um indicador sintético utilizado para medir e mapear a vulnerabilidade social dos territórios brasileiros. Criado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), tornou-se uma ferramenta fundamental para o desenvolvimento de políticas públicas, programas e projetos sociais, além de colaborar com o desenvolvimento de novas pesquisas na área. Os indicadores representam vulnerabilidades sociais e são variáveis normalizadas e padronizadas entre 0,0 e 1,0. A segregação dos indicadores formam três subíndices com o mesmo peso, a média aritmética desses subíndices resulta no IVS, no qual é expresso conforme a régua exposta na figura 2, sendo valores próximos de 0 com baixa vulnerabilidade e próximos à 1 elevada vulnerabilidade.

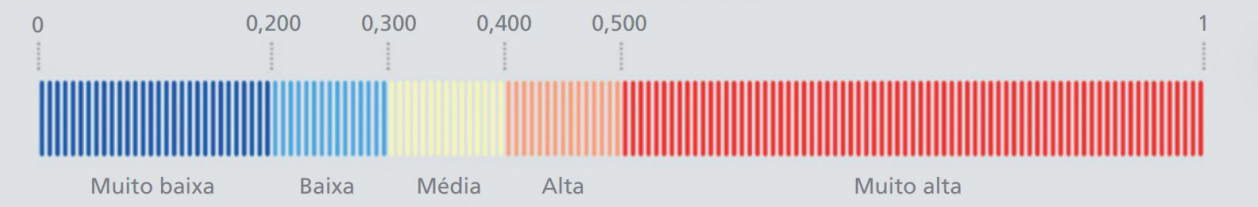


Figura 02: Índice de Vulnerabilidade Social e suas faixas de análise.
Fonte: COSTA (2023)

O objetivo consiste em adaptar o IVS a partir da escolha de variáveis (indicadores) ambientais disponíveis em plataformas públicas como IBGE e PCDaS. O projeto se dividirá em cinco etapas baseadas em: definição e seleção dos indicadores, formando os seguintes subíndices: I) Infraestrutura Urbana (saneamento básico); II) Capital Humano (saúde); e III) Renda e Trabalho (socioeconômico); Seguido de tratamento dos dados, cálculo de índices, análises estatísticas -relacionadas à raça/cor- e a construção de mapas temáticos.

A segregação dos indicadores forma três subíndices com o mesmo peso: I) Infraestrutura Urbana; II) Capital Humano; e III) Renda e Trabalho (Equação 1). A média aritmética desses subíndices resulta no IVS, conforme a equação (2).

$$Subíndice = \frac{I1 + I2 + I3 + \ldots + In}{n} \qquad (01)$$

Onde: *I* representa o indicador e *n* o número de indicadores do subíndice.

$$IVS = \frac{Infraestrutura + Capital\ Humano + Renda\ e\ Trabalho}{3} \qquad (02)$$

A figura 3 representa as variáveis que correspondem aos indicadores que constituem os subíndices.

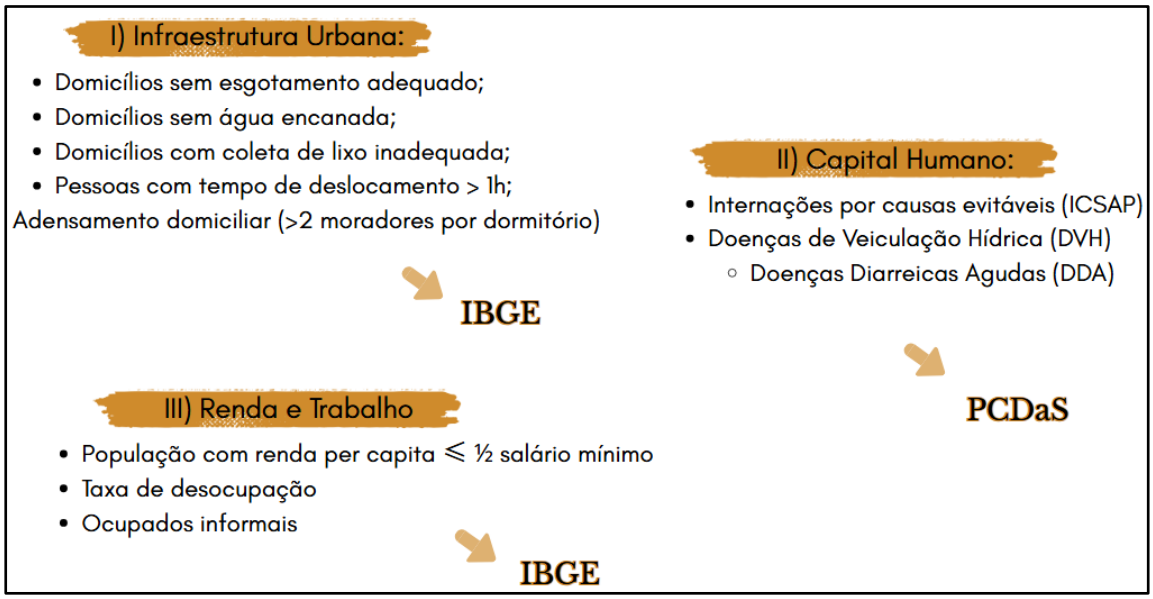


Figura 03: Subíndices e seus indicadores.
Fonte: Autora (2026)

Para as análises dos resultados, pretende-se realizar as seguintes: Análise descritiva, com base em estatísticas resumo dos indicadores, sendo a média, a mediana, o desvio-padrão e quartis. A distribuição espacial dos indicadores, através da elaboração de mapas temáticos, com gradientes de temperatura expressando o IVS. A classificação em quantis ou categorias. A análise bivariada, através da correlação de Pearson e de Spearman. A análise espacial global e local. E então analise dos padrões espaciais da vulnerabilidade e dos desfechos em saúde.

Resultados e Discussão

Tendo em vista que o modelo de IVS proposto é uma junção entre métodos já utilizados, e que necessita de testes e aperfeiçoamento até que seja conclusivo a sua eficácia, espera-se obter sucesso na utilização deste modelo alternativo de índice, que auxilie a compreender as condições de vulnerabilidade do município de Londrina, bem como de cada setor ou bairro. Aspira-se a demonstrar que regiões habitadas majoritariamente por minorias étnico-raciais são as mais afetadas por saneamento básico precário influenciando diretamente na sua saúde, em especial na ocorrência de doenças de veiculação hídrica

Considerações Finais

Ao relacionar os resultados às desigualdades socioambientais, possivelmente servirá como referência para elaboração de novas políticas públicas.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio recebido. Ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística e a Plataforma de Ciência de Dados aplicada à Saúde pelos dados disponibilizados.

Referências Bibliográficas

ACSELRAD, Henri; MELLO, Cecília Campello do A.; BEZERRA, Gustavo das Neves. O que é justiça ambiental. Rio de Janeiro: Garamond, 2009.

ACSELRAD, Henri. Ambientalização das lutas sociais: o caso do movimento por justiça ambiental. Estudos Avançados, São Paulo, v. 24, n. 68, 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/S0103-40142010000100010.

ACSELRAD, Henri. Desigualdade ambiental, economia e política. Astrolabio, n. 11, 2013. DOI: https://doi.org/10.55441/1668.7515.n11.5549.

BULLARD, Robert D. Dumping in Dixie: race, class, and environmental quality. Abingdon: Routledge, 2000.

CIRNE, Mariana Barbosa; SOUSA, Marília Silva Oliveira de. Racismo ambiental no Brasil: um olhar sobre o acesso desigual ao saneamento básico através dos dados do censo de 2022. Revista de Direito Agrário e Agroambiental, Florianópolis, v. 10, n. 1, 2024. DOI: https://doi.org/10.26668/IndexLawJournals/2526-0081/2024.v10i1.10429.

COSTA, Marco Aurélio et al. Vulnerabilidade social no Brasil: conceitos, métodos e primeiros resultados para municípios e regiões metropolitanas brasileiras. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2018. (Texto para Discussão, n. 2364). Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/8257.

FERNANDES, Florestan. A revolução burguesa no Brasil: ensaio de interpretação sociológica. Rio de Janeiro: Zahar, 1975.

HERCULANO, S.; PÁDUA, J. A. (Org.). Justiça ambiental e cidadania. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2004.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo demográfico 2022: características dos domicílios. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Atlas da vulnerabilidade social: metodologia do IVS. Brasília: IPEA, [s.d.]. Disponível em: https://ivs.ipea.gov.br/#/atlas.

JESUS, Victor de. Racializando o olhar sociológico sobre a saúde ambiental em saneamento da população negra: um continuum colonial chamado racismo ambiental. Saúde e Sociedade, v. 29, n. 2, e180519, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/S0104-12902020180519.

LONDRINA (PR). Prefeitura Municipal de Londrina. Perfil de Londrina 2021: ano base 2020. Londrina: Prefeitura Municipal de Londrina, 2021.

MARQUES, Eduardo; TORRES, Haroldo. Reflexões sobre a hiperperiferia: novas e velhas faces da pobreza no entorno metropolitano. Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, n. 4, p. 49–70, 2001.

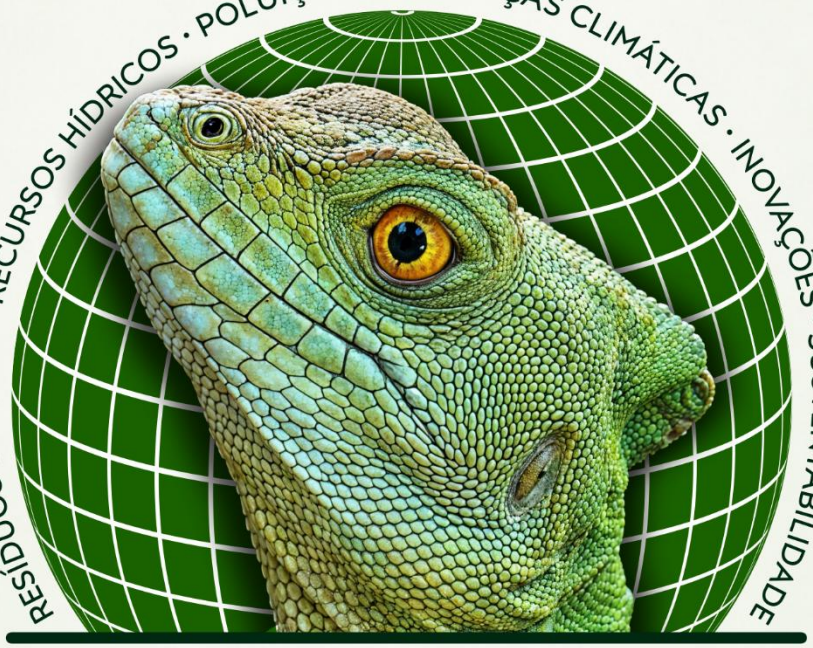
MISSE FILHO, Michel. Desigualdades raciais no acesso a esgotamento sanitário em regiões metropolitanas brasileiras. Cadernos Metrópole, São Paulo, v. 28, n. 65, e6571193, jan./abr. 2026. DOI: https://doi.org/10.1590/2236-9996.2026-6571193-pt.

MONTEIRO, R. R. et al. Racismo ambiental, justiça ambiental e mudanças climáticas no Brasil: uma análise dos relatórios anuais dos objetivos de desenvolvimento sustentável. Revista em Favor de Igualdade Racial, v. 6, n. 3, p. 117–132, 2023. DOI: 10.29327/269579.6.3-9.

RIPSA – REDE INTERAGENCIAL DE INFORMAÇÃO PARA A SAÚDE. Indicadores básicos para a saúde no Brasil: conceitos e aplicações. 2. ed. Brasília: Organização Pan-Americana da Saúde, 2008.

ÁREA TEMÁTICA 24

RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

DESENVOLVIMENTO DE ALECRIM-DO-CAMPO EM TECNOSSOLO: USO DE BIOSSÓLIDO E REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO PARA A RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO

1 Lucas Augusto Pedroso Coelho, 2 Diego Henriques Aguiar de Melo, 3 Lucas de Almeida Chamhum Silva, 4 Marina de Medeiros Machado, 5 Ricardo André Fiorotti Peixoto, 6 Sandra Aparecida Lima de Moura

1 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: lucas.pedroso@aluno.ufop.edu.br; 2 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: diego.henriques@aluno.ufop.edu.br; 3 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: lucas.chamhum@aluno.ufop.edu.br; 4 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: marina.medeiros@ufop.edu.br; 5 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: ricardofiorotti@ufop.edu.br; 6 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: sandramoura@ufop.edu.br

Palavras-chave: Biossólido; Tecnossolo; Recuperação de áreas degradadas.

Introdução

A atividade de extração mineral é vital para o desenvolvimento socioeconômico, porém causa significativos impactos ao meio ambiente, sobretudo as minas a céu aberto, que, a partir do seu desenvolvimento, modificam profundamente a paisagem, causando a degradação do solo, exigindo técnicas avançadas de recuperação desses ambientes. O rejeito de mineração, dentre as suas mais variadas possibilidades de destinação final, pode ser utilizado para o preenchimento de áreas já mineradas (Yunhong *et al*., 2016), porém, para que se estabeleça o processo de revegetação desses locais, se faz necessária a adição de fontes de nutrientes que promovam melhorias quanto aos aspectos físicos, químicos e biológicos desse ambiente.

Nesse contexto, os biossólidos, lodos de esgotos higienizados e que atendam aos limites estabelecidos pela legislação brasileira (CONAMA, 2020), se apresentam como uma alternativa já consolidada de melhoria da qualidade de solos pobres ou degradados. Quando misturados, os biossólidos e o rejeito de mineração, dão origem aos tecnossolos, caracterizados por proporcionar melhorias nutricionais a solos degradados, promovendo o crescimento da vegetação e o aumento da quantidade de microrganismos do solo, favorecendo processos de recuperação ambiental (Ouédraogo *et al*., 2024; Soria *et al*., 2024). Além disso, Ruíz *et al*. (2023), destacam que os tecnossolos podem compensar aproximadamente 60% das emissões de CO_2 atreladas às mudanças no uso do solo para atividades de extração mineral no Brasil.

Deste modo, o presente trabalho teve por objetivo investigar o potencial de um tecnossolo formado a partir de biossólido e rejeito de mineração de ferro sobre o desenvolvimento de mudas de Alecrim-do-campo.

Material e Métodos

O biossólido utilizado foi obtido a partir de um processo de higienização de lodo de esgoto chamado estabilização alcalina, o qual consiste na adição de cerca de 20% a 50% de cal na massa seca de lodo, de modo a aumentar o seu pH para 12, resultando em significativa redução da população de microrganismos patogênicos (Andreoli *et al*., 2021), garantindo segurança sanitária para o seu manuseio e segurança ambiental para a sua destinação. Com relação ao rejeito de mineração de ferro, este foi fornecido pelo Laboratório Reciclos – Grupo de Pesquisas em Resíduos Sólidos CNPq, da Universidade Federal de Ouro Preto, *campus* Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, Minas Gerais.

Para a formação do tecnossolo proposto, foram seguidos os critérios presentes no livro técnico "Recomendações para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação (Ribeiro; Guimarães; Alvarez, 1999), no documento normativo "Manual de Métodos Analíticos Oficiais de Fertilizantes, Corretivos, Substratos, Condicionadores e Remineralizadores de Solo" do Ministério da Agricultura e Pecuária (Brasil, 2023) e na Resolução CONAMA Nº 498/2020 (CONAMA, 2020). Seguidas as diretrizes presentes nos referidos textos, chegou-se a uma dose ideal de aplicação de biossólido para o Tratamento T1 igual a 48,63 g/m² (100,35 t/ha). O Tratamento T0 atuou como tratamento controle, sendo caracterizado por possuir somente o rejeito de mineração de ferro.

O plantio do Alecrim-do-campo foi realizado em pequenos vasos de 10 cm de diâmetro e 15 cm de altura. Em ambos os tratamentos foram realizadas 04 repetições. Para avaliação do desenvolvimento das plantas, a cada 15 dias, contados a partir da montagem do experimento, foram realizadas medições de altura e diâmetro do caule, de modo a estimar as características de crescimento do Alecrim-do-campo ao longo de 90 dias, relacionadas à altura e diâmetro totais, além das taxas de crescimento absoluto caulinar (TCAC), taxa de crescimento relativo caulinar (TCRC) e taxa de crescimento absoluto em espessura caulinar (TCAD). A verificação das diferenças entre os tratamentos propostos foi realizada por meio de análises estatísticas como a Análise de Variância (ANOVA) com teste de Tukey ($p < 0,05$) no software GraphPad Prism.

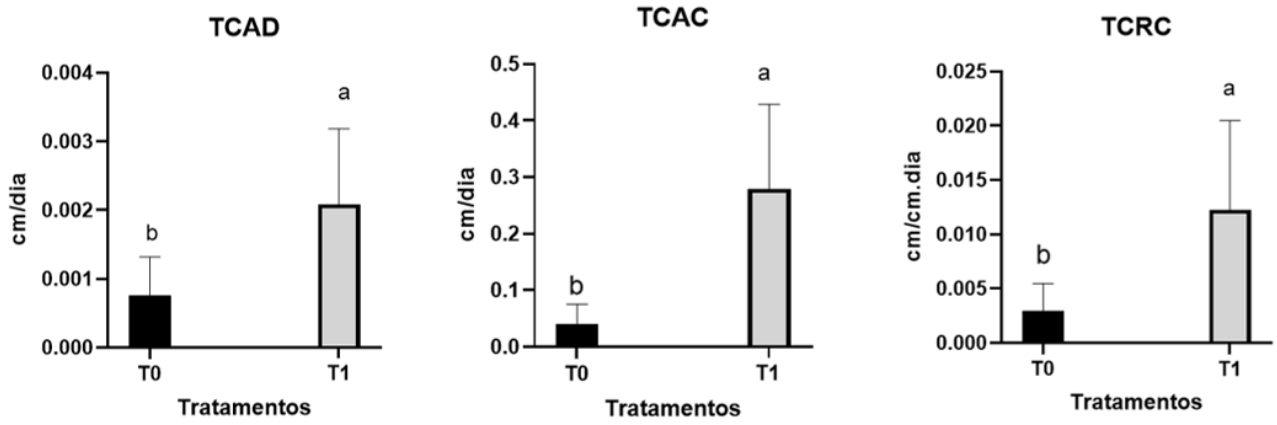
Resultados e Discussão

A seguir, na forma de gráficos, estão relacionadas as médias de crescimento das mudas através dos indicadores de Taxa de Crescimento Absoluto em Espessura Caulinar (TCAD), Taxa de Crescimento Absoluto Caulinar (TCAC) e Taxa de

Crescimento Relativo Caulinar (TCRC). De acordo com a Figura 01, é possível observar que a maior média de TCAD das mudas de Alecrim-do-campo, ao longo dos 90 dias do experimento, foi do tratamento T1, com valor igual a 0,002 cm/dia (DP = 0,001), enquanto a menor média foi do tratamento T0, igual a 0,0007 cm/dia (DP = 0,0006).

Com relação a TCAC e TCRC, as maiores médias se encontram no tratamento T1, com valores iguais a 0,279 cm/dia (DP = 0,150) e 0,012 cm/cm.dia (DP = 0,008), respectivamente (T1). Em contrapartida, as menores médias são do tratamento T0, com valores iguais a 0,040 cm/dia (DP = 0,035) para TCAC e 0,003 cm/cm.dia (DP = 0,002) para TCRC).

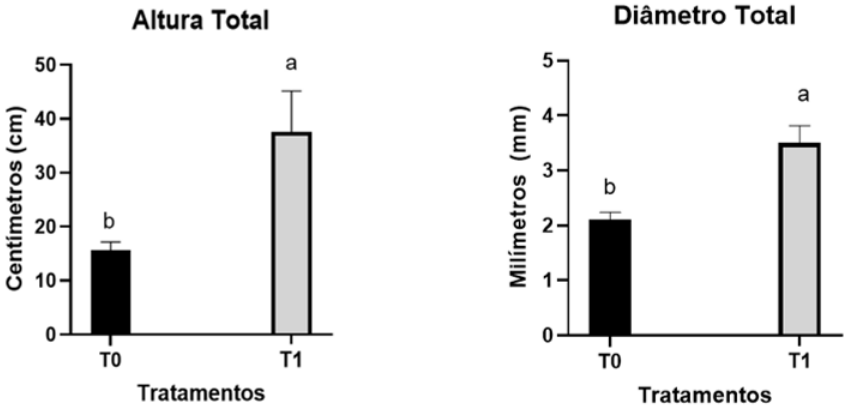
Ainda, é possível analisar que para TCAD, o tratamento T1 se mostrou significativamente diferente (ao nível de 5% de significância) do tratamento T0 pelo Teste de Tukey, indicando que ele proporcionou melhores resultados no que diz respeito ao crescimento do Alecrim-do-campo, quando analisada a taxa de crescimento que envolve o diâmetro do caule como um indicador. Com relação às taxas TCAC e TCRC, o tratamento T1 também apresentou diferença significativa (ao nível de 5% de significância) ao tratamento T0, sugerindo melhor desenvolvimento do Alecrim-do-campo quando analisadas essas duas taxas de crescimento que envolvem a altura do caule como um indicador.



T0: Tratamento T0 (controle) – Apenas 1,40 kg de rejeito de mineração de ferro.
T1: Tratamento T1 – 48,63g de biossólido e 1,40 kg de rejeito de mineração de ferro.
Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey (p > 0,05)

Figura 01: Comparativo entre as médias (n = 4) de TCAD, TCAC e TCRC dos tratamentos após 90 dias.

A partir da Figura 02, é possível observar que a maior média de altura das mudas é do tratamento T1, com valor igual a 37,5 cm (DP = 7,6), enquanto a menor média de altura é do tratamento T0, com valor igual a 15,6 cm (DP = 1,5). Já com relação à média do diâmetro do caule, novamente o tratamento T1 se mostrou como sendo o de maior valor, igual a 3,5 mm (DP = 0,3) e o tratamento T0 sendo o de menor valor, igual a 2,1 mm (DP = 0,1). Segundo o Teste de Tukey, tanto para altura, quanto para diâmetro total das plantas, o tratamento T1, onde houve adição de biossólido ao rejeito de mineração de ferro, se mostrou diferente significativamente (ao nível de 5% de significância) quando comparado ao tratamento T0, onde não houve adição de biossólido.



T0: Tratamento T0 (controle) – Apenas 1,40 kg de rejeito de mineração de ferro.
T1: Tratamento T1 – 48,63g de biossólido e 1,40 kg de rejeito de mineração de ferro.
Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey (p > 0,05)

Figura 02: Comparativo entre as médias (n = 4) de altura total e diâmetro total do caule dos tratamentos após 90 dias.

Altura e diâmetro do caule são considerados os principais parâmetros morfológicos utilizados para se avaliar a qualidade das mudas, pois além de serem análises não destrutivas de crescimento, podem ser avaliados durante o seu ciclo de vida e possuem baixo custo financeiro. Segundo Gallegos-Cedillo *et al*. (2021), a altura das plantas possui papel importante para a sua sobrevivência e desenvolvimento após serem transplantadas para outros locais, assim com o diâmetro do caule, bastante utilizado para se avaliar a sobrevivência das mudas no campo. Mudas mais altas e com maior diâmetro do caule, como as do tratamento T1, possuem maiores chances de sobrevivência no campo quando comparadas às mudas menores, por, por exemplo, possuírem maior eficiência em dissipar o calor pelos seus caules, conferindo maior resistência ao frio.

Moreira *et al*. (2023) observaram que nas mudas de *Eucalyptus grandis*, com a idade ideal de plantio (aproximadamente 100 dias após o cultivo), o diâmetro do caule foi um fator determinante para a sobrevivência em campo. Alonso *et al*. (2022) produziram mudas de *Schinus terebinthifolia* (Aroeira-vermelha) com médias de altura e diâmetro do caule iguais a 30 cm e 3 mm respectivamente, as quais, após 110 dias de cultivo, estavam aptas para o plantio em campo.

Os maiores valores de altura e diâmetro encontrados nas mudas do tratamento T1 podem refletir a ação do nitrogênio sobre o rejeito de mineração de ferro, promovendo ganhos significativos no crescimento em altura das mudas. Essa mesma situação foi observada por Silva (2019), onde, sob diferentes dosagens de nitrogênio em um experimento de cultivo de mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* (Cedro indiano), as mudas se mostraram mais robustas em termos de altura e diâmetro do caule nos tratamentos sob maiores dosagens de nitrogênio. Solos com menores disponibilidades de nitrogênio influenciam na redução da altura e diâmetro do caule das mudas (Esteves *et al*., 2020).

O maior crescimento observado nas mudas do tratamento T1 também pode estar atrelado à maior capacidade de troca catiônica e disponibilidade de macronutrientes, ocasionado pela adição do biossólido ao rejeito de mineração de ferro, o mesmo encontrado por Demir (2019). Além disso, tem-se o aumento da quantidade de matéria orgânica no solo. Segundo Weiler, Firpo e Schneider (2020), o crescimento maior das plantas se dá pela adição de nutrientes através da matéria orgânica, fazendo com que elas se desenvolvam de forma mais satisfatória como um todo. Na ocasião, os autores encontraram quantidades de Ca, Mg e S nos tecidos vegetais dentro dos níveis de suficiência sugeridos. Em contrapartida, altura e diâmetro menores de caule encontradas nas mudas do tratamento T0 podem sugerir deficiência de outros fatores nesses ambientes, visto que as diferenças de crescimento e de qualidade das plantas refletem as condições do solo como um todo e não de um ou mais parâmetros do solo apenas.

Considerações Finais

A investigação permitiu concluir que as melhores respostas da planta, levando em consideração os parâmetros morfológicos apresentados, ocorreram no tratamento T1, onde houve adição de biossólido ao rejeito (T1 – 48,63g/m² - 100,35 t/ha), ao produzir mudas mais altas e com maior robustez. O presente estudo demonstrou, através das análises morfológicas do Alecrim-do-campo, o seu potencial como um indicador de qualidade ambiental do tecnossolo produzido a partir de biossólido e rejeito de mineração de ferro, podendo então colaborar com processos de recuperação e revegetação de áreas degradadas, tanto na escolha de mudas de melhor qualidade, quanto na melhoria da qualidade nutricional de solos impactados pela atividade minerária. Além disso, a produção de tecnossolos vai de encontro a estratégias sustentáveis de economia circular.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa Regulatório de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da Agência Reguladora de Serviços de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário do Estado de Minas Gerais – ARSAE-MG e à Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA, ao Laboratório APICRIM, ao Grupo de Pesquisas Reciclos CNPq, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto, à Universidade Federal de Ouro Preto, ao CNPq, à CAPES e FAPEMIG, pelo suporte financeiro, estrutural e fornecimento de dados essenciais para esta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ALONSO, J. M. et al. Sewage sludge as substrate in *Schinus terebinthifolia* Raddi seedlings commercial production. *Scientific Reports*, v. 12, p. 1-13, 2022. ISSN 2045-2322. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41598-022-21314-0. Acesso em: 21 nov. 2024.

ANDREOLI, C. V. et al. Nota técnica 4 – Higienização de lodo via estabilização alcalina. In: COLETÂNIA DE NOTAS TÉCNICAS. *Valoração e gerenciamento dos subprodutos sólidos do tratamento de esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo de esgoto no solo*. Rio de Janeiro: [s.n.], v. 2, p. 45-58, 2021. ISBN 2764-5576.

BRASIL. Manual de métodos analíticos oficiais de fertilizantes, corretivos, substratos, condicionadores e remineralizadores de solo. Ministério da Agricultura e Pecuária, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/acesso-ainformacao/participacao-social/consultas-publicas/2023/arquivos-das-consultaspublicas/copy2_of_MANUALDEMTODOS_minuta.pdf. Acesso em: 21 nov. 2024.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. Diário Oficial da União, Brasília, 2020. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=797. Acesso em: 11 dez. 2023.

DEMIR, Z. Effects of vermicompost on soil physicochemical properties and lettuce (*Lactuca sativa* var. *Crispa*) yield in greenhouse under different soil water regimes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 50, n. 17, p. 2151-2168, 2019. ISSN 1532-2416. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1654508. Acesso em: 21 nov. 2024.

ESTEVES, G. D. F. et al. Vermicompost improves maize, millet and sorghum growth in iron mine tailings. *Journal of Environmental Management*, v. 264, 2020. ISSN 0301-4797. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110468. Acesso em: 21 nov. 2024.

GALLEGOS-CEDILLO, V. M. et al. Plant agronomic features can predict quality and field performance: a bibliometric analysis. *Agronomy*, v. 11, n. 11, p. 1-32, 2021. ISSN 2073-4395. Disponível em: https://doi.org/10.3390/agronomy11112305. Acesso em: 21 nov. 2024.

MOREIRA, G. G. et al. Seedling morphological characteristics on survival, uniformity, and growth during a full short rotation in *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* plantation. *Forests*, v. 14, n. 9, p. 1-13, 2023. ISSN 1999-4907. Disponível em: https://doi.org/10.3390/f14091756. Acesso em: 21 nov. 2024.

OUÉDRAOGO, D. et al. Existing evidence on the potential of soils constructed from mineral wastes to support biodiversity: a systematic map. *Environmental Evidence*, v. 13, n. 9, p. 1-15, 2024. ISSN 2047-2382. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s13750-024-00332-7. Acesso em: 21 nov. 2024.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. V. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação. Viçosa: SBCS, 1999.

RUIZ, F. et al. Constructing soils for climate-smart mining. *Communications Earth & Environment*, v. 4, n. 219, p. 1-6, 2023. ISSN 2662-4435. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s43247-023-00862-x. Acesso em: 21 nov. 2024.

SILVA, I. O. F. Qualidade e crescimento inicial de mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* Mart. produzidas em diferentes doses de nitrogênio, fósforo e potássio. Rio Verde, 2019. 82 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde.

SORIA, R. et al. Monitoring of indicators and bacterial succession in organic-amended technosols for the restoration of semiarid ecosystems. *Science of The Total Environment*, v. 954, p. 1-15, 2024. ISSN 0048-9697. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176302. Acesso em: 21 nov. 2024.

WEILER, J.; FIRPO, B. A.; SCHNEIDER, I. A. H. Technosol as an integrated management tool for turning urban and coal mining waste into a resource. *Minerals Engineering*, v. 147, p. 1-8, 2020. ISSN 0892-6875. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106179. Acesso em: 21 nov. 2024.

YUNHONG, C. et al. Test research on the effects of mechanochemically activated iron tailings on the compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 118, p. 164-170, 2016. ISSN 1879-0526. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.020. Acesso em: 21 nov. 2024.

DESEMPENHO DE *BACCHARIS DRACUNCULIFOLIA EM* RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE FERRO: CRESCIMENTO, FISIOLOGIA E DESENVOLVIMENTO RADICULAR

1 Natalia Cardoso de Resende, 2 Mariana Brito dos Anjos, 3 Diego Henrique Aguiar de Melo, 4 Alessandra Rodrigues Kozovits, 5 Sandra Aparecida Lima de Moura

1,2,3,4,5 Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), e-mail: natalia.resende@aluno.ufop.edu.br; mariana.anjos@aluno.ufop.edu.br; diego.henrique@aluno.ufop.edu.br; kozovits@ufop.edu.br; sandramoura@ufop.edu.br

Palavras-chave: mineração de ferro; *Baccharis dracunculifolia*; recuperação de áreas degradadas.

Introdução

A mineração de ferro ocupa posição estratégica na economia brasileira, mas também gera passivos ambientais expressivos, especialmente em áreas de campos rupestres ferruginosos, ecossistemas marcados por elevada biodiversidade, alto endemismo e forte sensibilidade a distúrbios (Jacobi & Carmo, 2008). Entre os principais resíduos da atividade destacam-se o rejeito, gerado no beneficiamento, e o estéril, removido durante a lavra. Ambos podem apresentar baixa fertilidade, reduzida atividade biológica, limitações físicas e desequilíbrios químicos que dificultam a revegetação e o restabelecimento de processos ecológicos em áreas mineradas (Silva et al., 2021).

Nesse contexto, a recuperação de áreas degradadas depende não apenas do cumprimento das exigências legais, mas do conhecimento detalhado das características dos materiais remanescentes e de sua interação com espécies vegetais nativas (Gastauer et al., 2018). A limitação ao estabelecimento das plantas não decorre de um único fator, mas da ação conjunta de atributos como densidade, porosidade, pH, disponibilidade de nutrientes, presença de elementos potencialmente tóxicos e resistência à penetração das raízes (Asensio et al., 2013; da Silva et al., 2022). Essa combinação pode comprometer a germinação, o crescimento, a fisiologia e a sobrevivência das mudas.

O uso de espécies nativas com potencial de colonização é uma estratégia promissora para a recuperação ambiental. *Baccharis dracunculifolia* DC., conhecida como alecrim-do-campo, é uma espécie pioneira, rústica, amplamente distribuída e de interesse ecológico e econômico, com potencial para uso em programas de restauração (Gomes; Fernandes, 2002), além de relevância ecológica e funcional em diferentes interações bióticas (Fagundes; Fernandes, 2011; Guimarães et al., 2012). Ainda assim, sua adaptação a ambientes naturalmente pobres não implica tolerância irrestrita às condições impostas pelos resíduos da mineração. Assim, este trabalho avaliou o desempenho de *B. dracunculifolia* em rejeito e estéril de mineração de ferro, com ênfase nas limitações físico-químicas dos substratos e nos efeitos da compactação e da fertilização sobre o crescimento, a fisiologia e o desenvolvimento radicular.

Material e Métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Federal de Ouro Preto, em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 8 tratamentos e 6 repetições, totalizando 48 unidades experimentais. Foram utilizados vasos de PVC em formato de Y, em sistema *split-root*, com rejeito e estéril sob condições com e sem fertilização e com e sem compactação. Antes da inserção das mudas, os resíduos foram submetidos à compactação, a fim de estabelecer diferenças físicas entre os tratamentos. Nos tratamentos fertilizados, foram adicionados 8 g de NPK 04-14-08 à camada inferior do substrato. Foram realizadas análises físicas e químicas dos resíduos e determinada a biomassa seca radicular. As análises estatísticas foram realizadas no software R, adotando-se nível de significância de 5%. A resistência à penetração dos resíduos foi analisada separadamente para rejeito e estéril, em delineamento pareado por vaso, considerando os efeitos de compactação (compactação e sem compactação), lado do vaso (direito esquerdo) e a interação entre esses fatores. A biomassa seca radicular também foi analisada separadamente para rejeito e estéril, por meio de modelos lineares mistos (LMM), considerando tratamento (sem fertilização e com fertilização), compactação, posição no vaso e suas interações como efeitos fixos, e o vaso como efeito aleatório.

Resultados e Discussão

As análises físicas e químicas dos resíduos de rejeito e estéril mostraram que ambos constituem substratos restritivos ao crescimento vegetal, porém com limitações de naturezas distintas. O rejeito apresentou granulometria mais fina, com 41,3% de silte e 48,3% de areia fina, maior densidade aparente (1,49 g/cm^3) e menor porosidade total (47%), configurando um material mais adensado. O estéril apresentou fração mais grosseira, com 20,1% de areia grossa, menor densidade aparente (1,20 g/cm^3) e maior porosidade total (54%). Quimicamente, ambos exibiram baixos teores de matéria orgânica (MO), nitrogênio (N-total) e fosforo (P) e baixa capacidade de troca catiônica efetiva. O estéril apresentou pH 6,30 e elevado teor de manganês (Mn) enquanto o rejeito apresentou pH 8,72, alta saturação por sódio (ISNa) (Figura 01).

Amostras	pH	N-total	P	K	Na	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H + Al	SB	t	T
	(H2O)	dag/kg	(mg/dm³)			(cmol$_c$/dm³)						
Rejeito Arenoso	8,72	0,004	7,70	11,00	23,58	0,62	0,00	0,00	0,00	0,75	0,75	0,75
Estéril	6,30	0,008	2,30	12,00	3,35	0,25	0,09	0,00	0,70	0,39	0,39	1,09

cont.

Amostras	V	m	ISNa	MO	P-Rem	Cu	Mn	Fe	Zn
	%				dag/kg	mg/L	mg/dm³		
Rejeito Arenoso	100,00	0,00	13,67	0,04	54,70	0,13	8,00	31,80	0,06
Estéril	35,80	0,00	1,34	0,00	39,80	0,59	142,90	31,10	0,29

Figura 01. Caracterização química das amostras de rejeito arenoso e estéril. T= Capacidade de Troca Catiônica Efetiva. V= Índice de Saturacão por Bases. ISNa= Índice de Saturação por Sódio. P-rem= Fósforo Remanescente. SB= Soma de Bases Trocáveis. T= Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0. m= Índice de Saturação por Aluminio. MO= Mat. Orgânica.

Antes da introdução das mudas de *B. dracunculifolia*, os resíduos foram submetidos à compactação, com o objetivo de estabelecer diferenças de compactação entre os tratamentos e simular condições frequentemente observadas em áreas degradadas pela mineração. Os resultados mostram que a resistência à penetração diferiu entre os tratamentos com e sem compactação, tanto no rejeito quanto no estéril. No rejeito, a média dos tratamentos sem compactação foi de 54,0 kPa, enquanto a média dos tratamentos compactados foi de 187,7 kPa. Houve efeito significativo da compactação ($p < 0,0001$), sem efeito de lado ($p = 0,1653$) e sem interação entre compactação e lado ($p = 0,3490$). As comparações entre Rejeito sem compactação lado esquerdo (RSCE)e Rejeito compactado lado direito (RCD) e entre Rejeito sem compactação lado direito (RSCD) e Rejeito compactado lado esquerdo (RCE) foram significativas ($p < 0,0001$) e não houve diferença entre os lados dentro da mesma condição de compactação. No estéril, o mesmo padrão foi observado, porém com valores mais elevados. A média dos tratamentos sem compactação foi de 116,0 kPa, enquanto a média dos tratamentos compactados foi de 2181,5 kPa. Houve efeito significativo da compactação ($p < 0,0001$), sem interação significativa entre compactação e lado ($p = 0,1361$). O efeito de lado foi marginalmente não significativo ($p = 0,0527$). As comparações entre Estéril sem compactação lado esquerdo ESCE e Estéril compactado lado direito (ECD) e entre Estéril sem compactação lado direito (ESCD) e Estéril compactado lado esquerdo (ECE) foram significativas ($p < 0,0001$), sem diferença entre os lados dentro da mesma condição de compactação.

Após o estabelecimento dessas condições de compactação dos resíduos, as mudas foram submetidas aos tratamentos de compactação e fertilização, permitindo avaliar os efeitos desses fatores sobre a biomassa seca radicular. No rejeito e no estéril, a biomassa seca radicular foi influenciada principalmente pela fertilização, com efeito significativo em ambos os materiais (rejeito: $p = 0,0116$; estéril: $p = 0,0309$), enquanto a compactação não apresentou efeito significativo (rejeito: $p = 0,3379$; estéril: $p = 0,5942$). A posição (esquerdo e direito) no vaso também não foi significativa, embora tenha apresentado efeito marginal no rejeito ($p = 0,0968$) e no estéril ($p = 0,0587$). Além disso, não foram observadas interações significativas entre os fatores em nenhum dos materiais ($p > 0,05$). O maior valor médio de biomassa seca radicular no rejeito foi observado no tratamento com fertilização e sem compactação (2,62 ± 1,26 g), enquanto o menor ocorreu no tratamento sem fertilização e sem compactação (1,44 ± 1,07 g). No estéril, o maior valor médio foi registrado no tratamento com fertilização e compactado (2,06 ± 1,15 g), e o menor no tratamento sem fertilização e sem compactação (1,22 ± 0,72 g) (Figura 02). As comparações múltiplas mostraram que, no rejeito, a biomassa seca radicular foi maior em condição sem compactação do que em substrato compactado na presença de fertilização ($p = 0,0013$). No estéril, por sua vez, houve diferença significativa apenas em uma combinação, com maior biomassa seca radicular no tratamento fertilizado em relação ao não fertilizado na condição compactada do lado esquerdo ($p = 0,0265$), sem diferenças significativas entre as condições de compactação dentro de cada tratamento ($p > 0,05$).

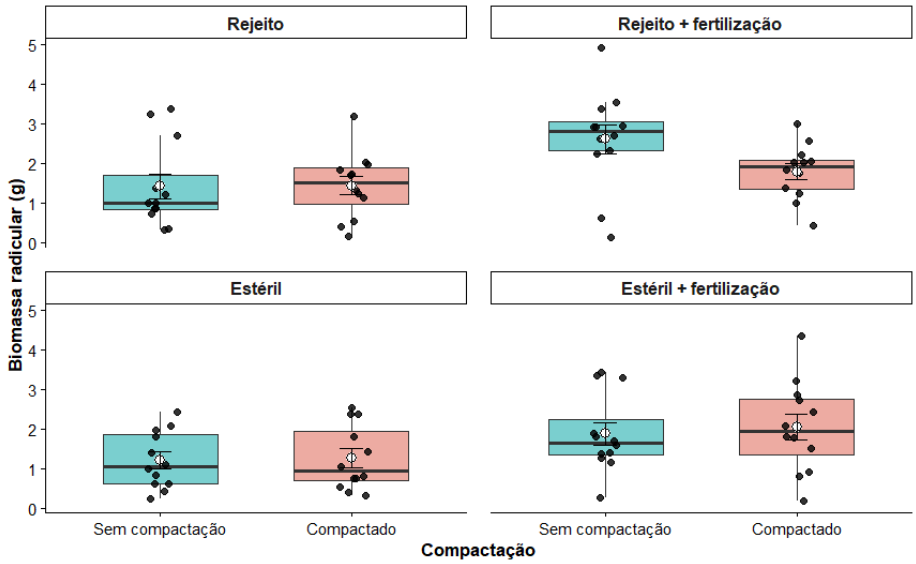


Figura 02. Biomassa seca radicular de *B. dracunculifolia* nos tratamentos com estéril (E), estéril fertilizado (EF), rejeito (R) e rejeito fertilizado (RF), em condições de compactado e sem compactação. Os pontos representam as repetições e as barras indicam a dispersão dos valores observados.

Os resultados demonstram que o experimento foi eficiente em gerar diferenças de compactação entre os tratamentos, confirmando que a compactação induzida alterou a condição física dos resíduos. No entanto, essa diferença não foi, necessariamente, suficiente para impedir o desenvolvimento radicular. Isso indica que reduções no alongamento das raízes tendem a ocorrer quando a resistência à penetração se aproxima ou ultrapassa faixas de 0,8 a 2 MPa, sendo valores acima de 2 MPa frequentemente considerados mais restritivos ao crescimento radicular (Bengough et al., 2011; Valentine et al., 2012). Como os valores obtidos neste experimento variaram de aproximadamente 54,0 a 2181,5 kPa, equivalentes a 0,054 a 2,182 MPa, infere-se que, embora tenha havido aumento da compactação, os níveis alcançados no rejeito permaneceram abaixo dos limiares normalmente descritos como limitantes ao desenvolvimento das raízes, ao passo que, no estéril compactado, os valores atingiram faixa potencialmente restritiva ao crescimento radicular.

Apesar disso, os resultados de biomassa seca radicular indicam que o desenvolvimento de *B. dracunculifolia* foi mais influenciado pela fertilização do que pela compactação. A ausência de efeito isolado da compactação sugere que seus efeitos podem ter se manifestado mais na arquitetura e no funcionamento do sistema radicular do que na biomassa seca acumulada (Caminha-Paiva et al., 2021; Correa et al., 2019; Pandey et al., 2024). Essa interpretação é coerente com as observações visuais das raízes aparentemente mais espessas no rejeito, indicando possível ajuste morfológico ao ambiente físico, como já descrito para espécies adaptadas a ambientes restritivos (Correa et al., 2019). Estudos mostra que *B. dracunculifolia* possui plasticidade ecológica e potencial para colonizar áreas degradadas sob diferentes condições de fertilidade, o que ajuda a explicar seu desempenho mesmo em substratos minerários limitantes (Negreiros et al., 2014). Além disso, em resíduos pobres em nutrientes, o fornecimento de nutrientes pode favorecer o metabolismo vegetal e resultar em maior biomassa radicular, o que provavelmente explica o melhor desempenho do tratamento RF (Sarathchandra et al., 2023). Ainda assim, esse efeito deve ser entendido como apoio ao estabelecimento inicial em substratos severamente limitantes, e não como recomendação de fertilização generalizada para áreas de campo rupestre, cujas espécies são adaptadas a solos oligotróficos (Oliveira et al., 2015; Arruda et al., 2023). Além disso, a correção e a fertilização podem criar condições nutricionais atípicas e alterar a microbiota da rizosfera, com reflexos sobre a alocação de biomassa e o desempenho vegetal (Cruz et al., 2020; Tibbett; O'Connor; Daws, 2019; Nuccio et al., 2016).

Considerações Finais

Os resultados indicam que *Baccharis dracunculifolia* apresenta potencial para estabelecimento inicial em resíduos da mineração de ferro, mesmo sob limitações físicas e químicas. A compactação diferenciou os tratamentos, mas não influenciou significativamente a biomassa seca radicular, enquanto a fertilização exerceu efeito mais evidente sobre o desempenho da espécie, especialmente no rejeito fertilizado. Assim, a espécie mostra-se promissora para uso na recuperação de áreas degradadas pela mineração. Para estudos futuros, recomenda-se aprofundar a avaliação da arquitetura radicular com uso de scanner e realizar análises anatômicas do caule, a fim de compreender com maior precisão as respostas da espécie aos resíduos e aos efeitos da fertilização.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto, aos laboratórios envolvidos na execução do experimento, Laboratório de Ecofisiologia Vegetal e Laboratório de Tecnologias Sociais e Ambientais, às instituições que apoiaram a coleta dos resíduos, Reciclos, e sua caracterização, Universidade Federal de Viçosa (UFV), bem como à CAPES, pela concessão da bolsa de fomento.

Referências Bibliográficas

ARRUDA, A. J. et al. Ten principles for restoring campo rupestre, a threatened tropical, megadiverse, nutrient-impoverished montane grassland. ***Restoration Ecology***, [S. l.], 2023. DOI: 10.1111/rec.13924.

ASENSIO, V.; VEGA, F. A.; ANDRADE, M. L.; COVELO, E. F. Tree vegetation and waste amendments to improve the physical condition of copper mine soils. ***Chemosphere***, [S. l.], v. 90, n. 2, p. 603-610, 2013. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.08.050.

BENGOUGH, A. G. et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. ***Journal of Experimental Botany***, [S. l.], v. 62, n. 1, p. 59-68, 2011.

CAMINHA-PAIVA, D.; NEGREIROS, D.; BARBOSA, M.; FERNANDES, G. W. Functional trait coordination in the ancient and nutrient-impoverished campo rupestre: soil properties drive stem, leaf and architectural traits. ***Biological Journal of the Linnean Society***, [S. l.], v. 133, n. 2, p. 531-545, 2021. DOI: 10.1093/biolinnean/blaa153.

CORREA, J.; POSTMA, J. A.; WATT, M.; WOJCIECHOWSKI, T. Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. ***Journal of Experimental Botany***, [S. l.], v. 70, n. 21, p. 6019-6034, 2019.

CRUZ, F. V. da S.; GOMES, M. P.; BICALHO, E. M.; DELLA TORRE, F.; GARCIA, Q. S. Does Samarco's spilled mud impair the growth of native trees of the Atlantic Rainforest? ***Ecotoxicology and Environmental Safety***, [S. l.], v. 189, art. 110021, 2020. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.110021.

DA SILVA, A. P. V. et al. Potentially toxic elements in iron mine tailings: effects of reducing soil pH on available concentrations of toxic elements. ***Environmental Research***, [S. l.], v. 215, art. 114321, 2022. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114321.

FAGUNDES, M.; FERNANDES, G. W. Insect herbivores associated with *Baccharis dracunculifolia* (Asteraceae): responses of gall-forming and free-feeding insects to latitudinal variation. ***Revista de Biología Tropical***, [S. l.], v. 59, n. 3, p. 1419-1432, 2011.

GASTAUER, M. et al. Mine land rehabilitation in Brazil: goals and techniques in the context of legal requirements. ***Ambio***, [S. l.], 2018. DOI: 10.1007/s13280-018-1053-8.

GOMES, V.; FERNANDES, G. W. Germinação de aquênios de *Baccharis dracunculifolia* D.C. (Asteraceae). ***Acta Botanica Brasilica***, [S. l.], v. 16, n. 4, p. 421-427, 2002.

GUIMARÃES, N. S. S. et al. *Baccharis dracunculifolia*, the main botanical source of Brazilian green propolis, exhibits potent antioxidant activity and prevents oxidative mitochondrial damage. ***Food and Chemical Toxicology***, [S. l.], v. 50, n. 3-4, p. 1091-1097, 2012. DOI: 10.1016/j.fct.2011.11.014.

JACOBI, C. M.; CARMO, F. F. do. Diversidade dos campos rupestres ferruginosos no Quadrilátero Ferrífero, MG. ***Megadiversidade***, [S. l.], v. 4, n. 1-2, p. 24-32, dez. 2008.

NEGREIROS, D. et al. Growth-survival tradeoff in the widespread tropical shrub *Baccharis dracunculifolia* (Asteraceae) in response to a nutrient gradient. ***Tropical Ecology***, [S. l.], v. 55, n. 2, p. 167-176, 2014.

NUCCIO, E. E. et al. Climate and edaphic controllers influence rhizosphere community assembly for a wild annual grass. ***Ecology***, [S. l.], v. 97, n. 5, p. 1307-1318, 2016. DOI: 10.1890/15-0882.1.

OLIVEIRA, R. S.; GALVÃO, H. C.; CAMPOS, M. C. R. de; ELLER, C. B.; PEARSE, S. J.; LAMBERS, H. Mineral nutrition of campos rupestres plant species on contrasting nutrient-impoverished soil types. ***New Phytologist***, [S. l.], v. 205, n. 3, p. 1183-1194, 2015. DOI: 10.1111/nph.13175.

PANDEY, B. K. et al. Uncovering root compaction response mechanisms: new insights and opportunities. ***Journal of Experimental Botany***, [S. l.], v. 75, n. 2, p. 578-592, 2024.

SARATHCHANDRA, S. S.; RENGEL, Z.; SOLAIMAN, Z. M. A review on remediation of iron ore mine tailings via organic amendments coupled with phytoremediation. ***Plants***, [S. l.], v. 12, n. 9, art. 1871, 2023. DOI: 10.3390/plants12091871.

SILVA, A. O. et al. Chemical, physical, and biological attributes in soils affected by deposition of iron ore tailings from the Fundão Dam failure. ***Environmental Monitoring and Assessment***, [S. l.], v. 193, art. 462, 2021. DOI: 10.1007/s10661-021-09234-4.

TIBBETT, M.; O'CONNOR, R.; DAWS, M. I. Too much of a good thing: phosphorus over-fertilisation in rehabilitated landscapes of high biodiversity value. In: ***MINE CLOSURE 2019: PROCEEDINGS OF THE 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MINE CLOSURE***. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2019. p. 651-666. DOI: 10.36487/ACG_rep/1915_52_Tibbett.

VALENTINE, T. A. et al. Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. ***Annals of Botany***, [S. l.], v. 110, n. 2, p. 259-270, 2012.

ECOLOGICAL RESTORATION AND ENVIRONMENTAL MONITORING OF A DEGRADED URBAN RIPARIAN AREA: THE CABRINHA LAKE SPRING, LONDRINA, BRAZIL

Autores: Mariana Grotti Pereira; Edson Fontes de Oliveira; Rodrigo A. Torres.
Email institiçao

Palavras-chave: restauração ecológica; queimadas; monitoramento ambiental; sistemas agroflorestais; geotecnologias.
Keywords: ecological restoration; wildfires; environmental monitoring; agroforestry systems; geotechnologies.

Resumo

As queimadas representam um dos principais problemas ambientais contemporâneos, especialmente no Brasil, onde estão associadas à expansão agropecuária, ao manejo inadequado do solo e às mudanças climáticas. Esses eventos provocam impactos significativos sobre a biodiversidade, a qualidade do solo, os recursos hídricos e a saúde humana, além de contribuir para o aumento das emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, a recuperação de áreas degradadas torna-se uma estratégia fundamental para restaurar a funcionalidade dos ecossistemas e promover a sustentabilidade ambiental. O presente projeto tem como objetivo desenvolver um plano de restauração ambiental para a nascente do Lago Cabrinha, localizada no município de Londrina, Paraná, área classificada como Área de Preservação Permanente (APP) e que apresenta histórico de degradação ambiental, incluindo queimadas, presença de espécies invasoras e perda de cobertura vegetal. A pesquisa está inserida na linha de monitoramento ambiental e propõe uma abordagem multidisciplinar baseada em técnicas de restauração ecológica, reflorestamento com espécies nativas da Mata Atlântica, implantação de sistemas agroflorestais e aplicação de práticas de educação ambiental voltadas à comunidade local. A metodologia envolve o diagnóstico ambiental da área de estudo, coleta e análise de amostras de solo e água, uso de geotecnologias e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para mapeamento e monitoramento da área, além da aplicação de ferramentas de genômica ambiental (dano genômico) para avaliação da biodiversidade. Também serão realizadas ações práticas de restauração, incluindo o plantio de mudas nativas e a recuperação da nascente por meio de técnicas de bioengenharia e estabilização do solo. O projeto prevê ainda o envolvimento de estudantes e da comunidade em atividades de educação ambiental, promovendo conscientização e participação social na conservação dos recursos naturais. Como resultados esperados, busca-se contribuir para a recuperação ecológica da área, melhorar a qualidade ambiental do sistema hídrico local e gerar dados científicos que possam subsidiar estratégias de monitoramento e gestão de áreas degradadas em ambientes urbanos.

Abstract

Wildfires represent one of the main contemporary environmental challenges, particularly in Brazil, where they are commonly associated with agricultural expansion, inadequate soil management, and climate change. These events cause significant impacts on biodiversity, soil quality, water resources, and human health, in addition to contributing to increased greenhouse gas emissions. In this context, the restoration of degraded areas becomes a fundamental strategy for recovering ecosystem functionality and promoting environmental sustainability. This project aims to develop an environmental restoration plan for the spring area of Cabrinha Lake, located in the municipality of Londrina, Paraná, Brazil. The site is classified as a Permanent Preservation Area (PPA) and presents a history of environmental degradation, including wildfire occurrence, invasive species presence, and loss of native vegetation cover. The research is conducted within the environmental monitoring field and proposes a multidisciplinary approach based on ecological restoration techniques, reforestation with native Atlantic Forest species, implementation of agroforestry systems, and environmental education initiatives directed toward the local community. The methodology includes environmental diagnosis of the study area, soil and water sampling and analysis, the use of geotechnologies and Geographic Information Systems (GIS) for spatial mapping and monitoring, as well as the application of environmental genomics tools (eDNA) to assess biodiversity. Practical restoration actions will also be carried out, including the planting of native tree seedlings and the recovery of the spring using bioengineering and soil stabilization techniques. The project also promotes the involvement of students and the local community through environmental education activities, encouraging awareness and social participation in natural resource conservation. Expected outcomes include ecological recovery of the area, improvement of environmental quality of the local hydrological system, and generation of scientific data that may support monitoring strategies and environmental management of degraded areas in urban environments.

TECNOLOGIAS SOCIAIS E O TRIPLE BOTTOM LINE NA MITIGAÇÃO DE CONFLITOS TERRITORIAIS EM ÁREAS DE COMPENSAÇÃO MINERÁRIA

1 Lidianne Ribeiro Oliveira, 2 Sandra Aparecida Lima de Moura, 3 Elza Cunha Cabral, 4 Diego Henriques Aguiar de Melo

1 UFOP, e-mail:lidianne.oliveira@aluno.ufop.edu.br; 2 UFOP, e-mail: sandramoura@ufop.edu.br; 3 UFOP, e-mail: diego.henriques@aluno.ufop.edu.br

Palavras-chave: Conflito de Território; Tecnologia social; Mineração.

Introdução

A atividade extrativa mineral representa um dos vetores mais significativos de alteração da paisagem no Brasil, e mais especificamente, em Minas Gerais, na região do quadrilátero ferrífero. Ao mesmo tempo em que a mineração atua como um setor estratégico para a economia nacional, é historicamente associada a passivos ambientais e a episódios críticos que intensificam o debate sobre sustentabilidade e governança territorial (Brasil, 1988).

Áreas atingidas ou degradadas pela mineração exigem recuperação e compensação socioambiental. Na prática, a compensação ambiental operacionalizada por meio dos Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) costuma gerar conflitos territoriais, pois impõe restrições de uso em áreas previamente utilizadas por comunidades para extrativismo, agricultura de subsistência e criação de animais (Brasil, 1986; Brasil, 1997).

Tradicionalmente, a técnica utilizada pelas mineradoras e órgãos de fiscalização para solucionar a degradação baseia-se no isolamento absoluto da área de compensação por meio de cercamentos, visando a proteção estrita da fauna e da flora. No entanto, essa técnica apresenta falhas estruturais graves, o isolamento proíbe práticas tradicionais vitais para as populações locais, como a agricultura familiar e o pastoreio, gerando processos agudos de desterritorialização. O choque entre a comunidade e a cerca culmina no problema central desta pesquisa: a aplicação de um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) que visa apenas a recomposição física e biológica, sem levar em consideração a dinâmica socioeconômica da comunidade, não é eficiente. Sem diálogo e sem inclusão, as cercas são rompidas e atividades que podem ser danosas ao espaço são reintroduzidas clandestinamente, sabotando o próprio objetivo ecológico do PRAD.

Logo, este trabalho tem como objetivo propor arranjos produtivos em locais onde são exigidos um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas, alinhando-se ao conceito de Triple Bottom Line (TBL), para que isto ocorra faz-se necessária a realização de um diagnóstico peculiar aplicando primeiramente uma cartografia social onde os moradores possam indicar como utilizam o espaço, após a identificação do espaço propõem-se o planejamento participativo do arranjo produtivo por meio da utilização de ferramentas como o método PIP (Produção-Inserção-Pertencimento), garantindo desta forma a licença social para intervenções desta magnitude no local.

Um exemplo notável do papel desses arranjos produtivos é o trabalho desenvolvido por Cabral (2022) no Projeto APICRIM, da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). O projeto utilizou a apicultura como uma Tecnologia Social inovadora. A intervenção focou na capacitação de pessoas atingidas por barragens no distrito de Antônio Pereira, MG, promovendo especialmente o empoderamento de mulheres na cadeia produtiva, utilizando o plantio de *Baccharis dracunculifolia* (alecrim-do-campo) em áreas degradadas para a produção de própolis verde de alto valor agregado. Analisando os resultados obtidos por meio deste projeto e como ele desencadeou, é possível notar que apesar de ter sido aplicado como tecnologia social, não foi realizado um diagnóstico participativo e nem aplicado um planejamento participativo de arranjo produtivo, houveram percalços negativos no final do processo como a mudança de local, vandalismo no apiário entre outros, portanto este trabalho sugere a inclusão destas etapas em projetos desta natureza.

Material e Métodos

A metodologia caracteriza-se como um estudo de caso descritivo-analítico. Primeiramente, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre conflitos territoriais na mineração (ZHOURI; LASCHEFSKI, 2010). Em seguida, utilizou-se a análise documental da dissertação de Cabral (2022) e uma análise in loco pós sabotagem, que buscou identificar as causas da mesma ao projeto apícola. Os dados foram analisados sob o prisma do Triple Bottom Line (ELKINGTON, 1997) para fundamentar a elaboração do Modelo PIP (Produção-Inserção-Pertencimento). uma adaptação metodológica inspirada na abordagem de planejamento integrado de Kessler, Van Reemst e Nsabimana (2018).

Na primeira etapa, avaliou-se a implementação da apicultura como Tecnologia Social em Antônio Pereira. O arranjo baseou-se no plantio estratégico da espécie *Baccharis dracunculifolia* (alecrim-do-campo) para a síntese biológica de própolis verde pelas abelhas *Apis mellifera*. O vetor social foi estruturado através de um curso de 30 horas, que resultou em um trabalho de empoderamento feminino.

Na segunda etapa, analisou-se qualitativamente a crise, após a realocação climática das colmeias para a área de conservação pertencente à mineradora, que mais tarde resultou em conflito com a comunidade, uma vez que houve invasão e destruição do apiário. Por fim, realizou-se uma proposição de aplicação de modelos produtivos, utilizando uma cartografia social, ou seja, a busca por compreender o território pela ótica dos seus habitantes, e por fim o planejamento participativo, utilizando ferramentas como o Modelo PIP, buscando atender efetivamente diretrizes da Instrução Normativa nº 14/2024 do IBAMA, que legitima o uso produtivo em áreas de PRAD.

Resultados e Discussão

A fase inicial do projeto APICRIM obteve êxito expressivo na inclusão socioprodutiva. O uso da apicultura como Tecnologia Social subverteu a dinâmica histórica do setor, colocando mulheres na liderança do manejo do apiário, em um curso de 30 horas, realizado na associação Arte, Mãos e Flores, que culminou na capacitação de 11 participantes, sendo 8 mulheres e 3 homens. atendendo plenamente aos pilares Social e Econômico do TBL.

Houve a necessidade de relocação de colmeias, uma vez que a chuva trouxe consequências graves ao local inicial, acabando com o pasto apícola, esta realocação das colmeias para a fazenda de compensação expôs a fragilidade da governança territorial. A colocação das colmeias em um território consuetudinário, sem a utilização de ferramentas como a cartografia social para diagnóstico participativo, gerou um sentimento de expropriação das populações locais. A comunidade não enxergou o projeto como uma Tecnologia Social benéfica, mas como uma extensão das cercas da mineradora. O resultado foi a sabotagem do apiário (furtos e incêndios), o que destruiu simultaneamente o capital investido, as abelhas e a flora e a relação comunitária.

O estudo demonstra que a solução para tais conflitos reside primeiramente em um bom diagnóstico de território a ser desenvolvido juntamente à comunidade. A inserção de projetos ou arranjos produtivos deve incluir a comunidade em sua fase inicial, com planejamento participativo, utilizando ferramentas como o Modelo PIP. Esta proposta, se baseia na recente IN IBAMA nº 14/2024 que corrobora essa visão, fornecendo a base jurídica para que a mineração utilize os para cumprir obrigações de PRAD através da agricultura familiar, neste caso específico a apicultura como elemento principal.

Considerações Finais

A análise das rupturas observadas no Projeto APICRIM sugere que Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) executados sob premissas estritamente tecnocráticas tendem à insustentabilidade. A supressão dos usos tradicionais e o isolamento físico do território deflagram o que a literatura classifica como expropriação simbólica e desregulação ambiental (ZHOURI; LASCHEFSKI, 2010). O "resultado" que sustenta a necessidade de uma nova abordagem é, portanto, o diagnóstico empírico de que a injustiça ambiental percebida pela comunidade se manifesta em atos de resistência que inviabilizam a própria recuperação ecológica almejada.

Diante deste cenário, o Modelo PIP (Produção-Inserção-Pertencimento) é proposto não como um dado consolidado, mas como um arcabouço metodológico desenhado para internalizar as dimensões do *Triple Bottom Line* (ELKINGTON, 1997) na governança minerária. Através da integração de Sistemas Agroflorestais (SAFs), o modelo visa converter passivos ambientais em zonas de inclusão socioprodutiva.

Amparada pelas diretrizes da Instrução Normativa nº 14/2024 do IBAMA, a proposta fundamenta-se na hipótese de que a reconstrução da "propriedade psicológica" do território possa mitigar conflitos. Ao projetar a inserção da comunidade como agente produtivo, o Modelo PIP apresenta potencial para transmutar a dinâmica de sabotagem em uma estrutura de vigilância colaborativa, oferecendo um caminho metodológico para a obtenção da Licença Social para Operar e para a perenidade dos indicadores de recuperação ambiental.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a UFOP, a CNPQ, a FAPEMIG e a Samarco pelo apoio recebido na condução desta pesquisa e fomento às tecnologias sociais.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Centro Gráfico, 1988.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 009, de 06 de dezembro de 1990. Brasília, DF: CONAMA, 1990.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Instrução Normativa nº 14, de 1º de julho de 2024. Estabelece procedimentos para elaboração, apresentação, execução e monitoramento de Projeto de Recuperação de Área Degradada ou Área Alterada (PRAD). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2024.

CABRAL, Elza Cunha. Desenvolvimento de um Curso Teórico-Prático em Apicultura para Capacitação em Arranjos Produtivos Locais em Áreas Degradadas da Mineração. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade Socioeconômica Ambiental) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

ELKINGTON, J. Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business. Gabriola Island: New Society Publishers, 1997.

KESSLER, Aad; VAN REEMST, Laurie; NSABIMANA, Frénarie. PIP Manual: A step-by-step explanation of the PIP approach. Wageningen: Wageningen Environmental Research, 2018.

ZHOURI, A.; LASCHEFSKI, K. (orgs.). Desenvolvimento e conflitos ambientais. Belo Horizonte: UFMG, 2010.

EMPREGO DE ZEÓLITAS NA ADSORÇÃO DE METAIS E METALOIDES ORIUNDOS DE ATIVIDADES DE MINERAÇÃO: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1 Pietra Setti Galante, 2 Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues

[1]Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (USP), e-mail: pietra.setti@usp.br; [2]Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, e-mail: valguima@usp.br

Palavras-chave: *Clinoptilolita*, sorção, contaminação

Introdução

A contaminação ambiental por metais potencialmente tóxicos (MPT) e metaloides oriundos de atividades de mineração configura um dos maiores desafios ambientais da atualidade. Os rejeitos de beneficiamento mineral, ao serem dispostos de forma inadequada, liberam elementos como chumbo (Pb), cádmio (Cd), zinco (Zn) e arsênio (As) para o solo e para os recursos hídricos, comprometendo ecossistemas e a saúde pública (Salomons, 1995; Velarde et al., 2023). No Brasil, essa problemática é evidenciada pelo elevado número de barragens de mineração com risco de ruptura: segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM), em maio de 2024 existiam 942 estruturas cadastradas no Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM), das quais 67 foram classificadas como sendo de alto risco. Os desastres de Mariana (2015) e Brumadinho (2019) ilustram tragicamente as consequências da má gestão desses resíduos, com perdas humanas e devastação ambiental irreversíveis.

No contexto da região do Vale do Ribeira, que abriga uma das maiores jazidas de minério do Estado do Paraná e importante patrimônio de Mata Atlântica, décadas de mineração de Pb, Zn e Prata (Ag) geraram extensas áreas contaminadas. A disposição inadequada de rejeitos do beneficiamento e escórias de fundição resultou na disseminação de contaminantes, principalmente Pb, Zn, Cd, Cu e As, que ainda hoje se encontram expostos aos agentes intempéricos, afetando o solo, o rio Ribeira de Iguape e as comunidades quilombolas da região (Guimarães, 2007; Kasemodel, 2017; Crescêncio, 2021). A contaminação por esses metais e metaloides está associada a graves efeitos à saúde humana, incluindo danos neurológicos, doenças renais, alterações cardiovasculares e riscos cancerígenos, além de toxicidade à biota aquática e terrestre (Velarde et al., 2023; Pourret; Hursthouse, 2019).

Diante desse cenário, a busca por materiais adsorventes de baixo custo, alta eficiência e disponibilidade acessível torna-se imperativa. Dentre as alternativas estudadas, destacam-se as zeólitas, aluminossilicatos cristalinos com estrutura porosa tridimensional, que possuem propriedades únicas de troca iônica, adsorção, desidratação e reidratação, sendo ecologicamente corretas, regeneráveis e amplamente disponíveis na natureza (Luz, 1994; Pérez-Botella et al., 2022). A *clinoptilolita*, zeólita natural mais abundante, tem sido amplamente investigada como adsorvente de MPT em soluções aquosas, devido, principalmente, à sua elevada razão Si/Al, que confere estabilidade térmica e química superiores, e à sua capacidade de troca catiônica (CTC) que pode atingir até 2,3 meq g^{-1} (Shaobin; Yuelian, 2009; Kraljević Pavelić et al., 2018; Rodríguez-Iznaga et al., 2022).

Revisões recentes da literatura científica confirmam o crescente interesse no uso de zeólitas naturais e modificadas para a remoção de MPT em diferentes contextos de contaminação, incluindo Drenagem Ácida de Mina (DAM) e efluentes de mineração (Velarde et al., 2023; Rathi et al., 2024; Ugwu; Othmani; Nnaji, 2022; Irannajad; Haghighi, 2020). Pavlović et al. (2024) destacaram os avanços recentes nas aplicações de tufos ricos em *clinoptilolita*, enfatizando sua versatilidade como adsorvente catalítico e antibacteriano em múltiplos contextos ambientais. Estudos como o de Restiawaty et al. (2024) demonstraram a eficiência de *clinoptilolita* modificada na adsorção de MPT em DAM, reforçando o potencial dessa zeólita. Da mesma forma, Silva et al. (2024) avaliaram a estabilização de MPT em rejeitos de mineração por zeólitas naturais, obtendo resultados promissores para contenção da mobilidade dos metais no ambiente.

A modificação química da *clinoptilolita*, por tratamento ácido, básico, salino ou com surfactantes, tem se mostrado uma estratégia eficaz para ampliar sua seletividade e capacidade de remoção de espécies aniônicas, como o As (Velarde et al., 2023; Rathi et al., 2024). Nesse sentido, a comparação entre zeólitas naturais e tratadas é fundamental para identificar as condições mais adequadas de aplicação em cada contexto de contaminação.

Desta forma, o presente estudo consiste em uma revisão bibliográfica sobre o emprego de zeólitas, com ênfase na *clinoptilolita*, como adsorventes de metais e metaloides potencialmente tóxicos, especialmente Pb, Zn, Cd e As, em contextos de contaminação associados à mineração.

Material e Métodos

O presente estudo consiste em uma revisão bibliográfica de caráter qualitativo sobre o uso de zeólitas na adsorção de metais e metaloides potencialmente tóxicos em contextos de mineração. A busca por referências foi conduzida nas bases de dados científicas Scopus, Web of Science e Google Scholar, contemplando publicações de 1996 a 2026, com ênfase em artigos publicados a partir de 2018.

Os descritores utilizados na busca foram: "zeólita", "clinoptilolita", "adsorção", "metais potencialmente tóxicos", "rejeito de mineração", "chumbo", "cádmio", "zinco", "arsênio", "remediação ambiental", e seus equivalentes em inglês: "zeolite", "clinoptilolite", "adsorption", "potentially toxic metals", "mining tailings", "lead", "cadmium", "zinc", "arsenic" e

"environmental remediation". Foram incluídos artigos originais, artigos de revisão, dissertações, teses e relatórios técnicos redigidos em português, inglês ou espanhol.

A seleção do material bibliográfico ocorreu em duas etapas: inicialmente, por meio da leitura de títulos e resumos; e, na sequência, pela análise completa dos textos que atenderam aos critérios de inclusão, os quais abrangeram estudos relacionados às propriedades das zeólitas, aos mecanismos de adsorção e troca iônica, à modificação química de zeólitas naturais e à sua aplicação na remoção de metais e metaloides em efluentes e rejeitos de mineração. Foram excluídos estudos não disponíveis na íntegra ou sem relação direta com os objetivos da revisão. A análise foi realizada de forma qualitativa, destacando os principais avanços, resultados e lacunas identificados na literatura científica sobre o tema.

Resultados e Discussão

A contaminação por metais e metaloides potencialmente tóxicos em áreas de mineração representa um problema ambiental de grande complexidade, uma vez que esses elementos, ao serem liberados dos rejeitos de beneficiamento, podem se mobilizar pelo solo e pelos recursos hídricos por longos períodos. Nesse contexto, a adsorção por zeólitas tem se destacado como uma das estratégias mais promissoras para a retenção desses contaminantes, em razão das propriedades estruturais e químicas únicas desses aluminossilicatos cristalinos (Velarde et al., 2023; Ugwu; Othmani; Nnaji, 2022).

A *clinoptilolita* é a zeólita natural mais estudada para fins de adsorção de metais em solução aquosa. Sua estrutura microporosa, formada por tetraedros de SiO_4 e AlO_4 interligados por átomos de oxigênio, gera uma rede de canais e cavidades onde se acomodam cátions compensadores, predominantemente Na^+, K^+, Ca^{2+} e Mg^{2+}, passíveis de serem trocados por MPT presentes na solução (Luz, 1994; Rodríguez-Iznaga; Shelyapina; Petranovskii, 2022). A capacidade de troca catiônica (CTC) da *clinoptilolita* está diretamente relacionada à sua razão Si/Al: quanto menor essa razão, maior a carga negativa estrutural e, consequentemente, maior a CTC, os valores típicos estão entre 1,5 e 2,3 meq g^{-1}, dependendo da origem geológica do material (Shaobin; Yuelian, 2009; Kraljević Pavelić et al., 2018).

A adsorção de cátions metálicos pela *clinoptilolita* ocorre por um mecanismo de troca iônica de natureza predominantemente química, descrito em três etapas sucessivas: adsorção inicial na superfície dos microcristais, uma fase de inversão e, por fim, adsorção mais lenta no interior dos poros (Sprynskyy et al., 2006). A seletividade da zeólita pelos diferentes metais é governada por características físico-químicas dos íons em solução, incluindo energia de hidratação, raio iônico, eletronegatividade e coeficiente de difusão. De modo geral, íons com menor energia de hidratação possuem maior afinidade pelos sítios de troca disponíveis na estrutura das zeolítas, o que explica a sequência de seletividade reportada: $Pb^{2+} > Cd^{2+} > Cu^{2+} > Zn^{2+} > Cr^{3+} > Co^{2+} > Ni^{2+}$ (Zamzow et al., 1990 apud Shinzato; Hypolito, 2007; Ouki; Kavanagh, 1997 apud Shinzato; Hypolito, 2007). Essa preferência pelo Pb está relacionada à sua maior eletronegatividade e menor energia de desidratação em relação aos demais cátions, o que favorece sua interação com os sítios negativamente carregados da zeólita (Rodríguez-Iznaga; Shelyapina; Petranovskii, 2022; Pavlović et al., 2024).

O pH da solução é uma das variáveis externas que mais impactam a eficiência de adsorção, em pH baixo (< 3), a competição entre H^+ e os cátions metálicos pelos sítios de troca reduz a capacidade de remoção. Em contrapartida, em pH entre 5 e 6, a maioria dos metais catiônicos apresenta adsorção ótima, sem que ocorra precipitação como hidróxidos, o que tornaria difícil distinguir a contribuição da adsorção propriamente dita (Shinzato; Hypolito, 2007; Velarde et al., 2023). Mihaly-Cozmuta et al. (2014) reportaram que a *clinoptilolita* ativada com NaCl apresentou sequência de seletividade e capacidade de adsorção influenciadas diretamente pelo pH inicial da solução, com valores ótimos situados entre 5 e 6 para Cd^{2+}, Pb^{2+} e Zn^{2+}. Resultados semelhantes foram descritos por Restiawaty et al. (2024), que avaliaram *clinoptilolita* modificada na remoção de Cu^{2+} e Zn^{2+} em DAM, demonstrando que o ajuste de pH é determinante para a eficiência do processo em ambientes de mineração.

No que se refere aos modelos de equilíbrio, a adsorção de Pb^{2+} e Cd^{2+} pela *clinoptilolita* é frequentemente descrita pela isoterma de Langmuir, indicando adsorção em monocamada com sítios homogêneos e de energia equivalente, enquanto o Zn^{2+} tende a apresentar comportamento mais adequado ao modelo de Freundlich, sugerindo superfície heterogênea e adsorção em multicamada (Shinzato; Hypolito, 2007; Velarde et al., 2023). A cinética do processo segue majoritariamente o modelo de pseudo-segunda ordem, corroborando o caráter predominantemente químico da interação entre os íons metálicos e os sítios ativos da zeólita (Restiawaty et al., 2024; Rathi et al., 2024).

Um aspecto relevante é a presença de arsênio nos rejeitos de mineração, diferentemente dos metais catiônicos, o arsênio ocorre predominantemente como espécie aniônica em águas, arsenato [AsO_4^{3-}] em condições oxidantes e arsenito [$H_2AsO_3^-$] em condições redutoras, de modo que a *clinoptilolita* natural possui baixíssima afinidade por essas espécies, uma vez que sua superfície é carregada negativamente (Velarde et al., 2023; Meurer et al., 2021). Para superar essa limitação, a modificação química da zeólita com surfactantes catiônicos, como o brometo de hexadeciltrimetilamônio (HDTMA-Br), tem se mostrado a estratégia mais eficaz. A adsorção do HDTMA na superfície da *clinoptilolita* gera uma bicamada que reverte a carga superficial do material, criando sítios de troca aniônica capazes de reter o arsenato com eficiência superior à da zeólita natural (Li; Bowman, 2010; Velarde et al., 2023). Estudos demonstram que a zeólita modificada com HDTMA pode apresentar capacidade de adsorção de As(V) até 12,5 vezes superior à da não modificada (Li; Bowman, 1997 apud Velarde et al., 2023).

Além da modificação com surfactantes, tratamentos ácidos têm sido amplamente investigados para ampliar a capacidade adsortiva, o tratamento ácido promove a dealuminização parcial da estrutura zeolítica, aumentando a razão Si/Al, a área superficial e a porosidade, além de criar novos sítios ativos de troca (Rathi et al., 2024; Pavlović et al., 2024). Análises por DRX e FTIR confirmam que o tratamento ácido resulta em maior eficiência de adsorção de Pb^{2+} e Cd^{2+}, com o processo obedecendo a um mecanismo de pseudo-segunda ordem e termodinâmica de natureza espontânea e endotérmica (Dzhaksybekov et al., 2025).

Contudo, é importante ressaltar que a dealuminização excessiva pode comprometer a integridade estrutural do cristal, reduzindo a CTC e, consequentemente, a capacidade global de troca iônica (Rodríguez-Iznaga; Shelyapina; Petranovskii, 2022).

Em soluções multicomponentes, condição que melhor representa os efluentes e lixiviados de rejeitos de mineração, onde múltiplos metais coexistem simultaneamente, a competição iônica pelos sítios de troca altera o comportamento de adsorção individual de cada metal. Estudos com sistemas binários e ternários reportam que a presença de Pb^{2+} suprime a adsorção de Cd^{2+} e Zn^{2+} por conta de sua maior afinidade pelos sítios zeolíticos, ao passo que metais como Ni^{2+} e Co^{2+} são os mais prejudicados pela competição (Sprynskyy et al., 2006; Pavlović et al., 2024).

A regeneração e a reutilização da zeólita após a adsorção constituem aspectos determinantes para a viabilidade econômica e ambiental do processo. A dessorção dos metais adsorvidos pode ser realizada com soluções de NaCl, HCl ou $NaNO_3$, permitindo a recuperação do adsorvente e o potencial aproveitamento dos metais eluídos (Velarde et al., 2023; Ugwu; Othmani; Nnaji, 2022). Pavlović et al. (2024) destacam que *clinoptilolita* proveniente de tufos naturais mantém eficiência de adsorção satisfatória após múltiplos ciclos de regeneração, o que amplia seu potencial de aplicação em sistemas de tratamento contínuo, como leitos fixos e barreiras reativas permeáveis, estratégias já avaliadas para contenção de plumas de contaminação em áreas de mineração (Irannajad; Haghighi, 2020).

Considerações Finais

A zeólita é usada na adsorção de metais e metaloides comumente encontrados em resíduos de mineração. Estudos comprovam que a modificação química das zeólitas aumenta a capacidade de adsorção, tanto de espécies catiônicas como aniônicas. As zeólitas do tipo clinoptilolita são comumente empregadas na adsorção de metais e metaloides. A regeneração e reutilização dessas zeólitas após a adsorção de contaminantes constituem aspectos determinantes para a sua viabilidade econômica e ambiental.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de Iniciação Científica (Processo Nº 2024/17200-7) e a Universidade de São Paulo pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

CRESCÊNCIO, Stéfanie. Bioacessibilidade, Geoacumulação e Risco Ecológico de Elementos Potencialmente Tóxicos em Resíduos de Mineração – Adrianópolis (PR). 2021.

DZHAKSYBEKOV, M. et al. Modification and Application of Natural Clinoptilolite and Mordenite from Almaty Region for Drinking Water Purification. International Journal of Molecular Sciences, v. 26, n. 9, p. 4283, 2025.

GUIMARÃES, V. S. Caracterização dos resíduos provenientes da mineração de chumbo no Vale do Ribeira. Dissertação (Mestrado). USP, 2007.

IRANNAJAD, M.; HAGHIGHI, H. K. Removal of heavy metals from polluted solutions by zeolitic adsorbents: a review. Mine Water and the Environment, v. 39, 2020.

IRANNAJAD, M.; HAGHIGHI, H. K. Removal of heavy metals from polluted solutions by zeolitic adsorbents: a review. Mine Water and the Environment, v. 39, p. 703–722, 2020.

KASEMODEL, M. C. Avaliação integrada da contaminação por metais potencialmente tóxicos em área de disposição de resíduo de mineração de chumbo – Adrianópolis (PR). 2017.

KRALJEVIĆ PAVELIĆ, Sandra et al. Critical review on zeolite clinoptilolite safety and medical applications in vivo. Frontiers in Pharmacology, v. 9, 2018.

KRALJEVIĆ PAVELIĆ, Sandra et al. Critical review on zeolite clinoptilolite safety and medical applications in vivo. Frontiers in Pharmacology, v. 9, p. 1–23, 2018.

LUZ, Adão Benvindo da. Zeólitas: propriedades e usos industriais. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1994.

MEURER, E. J. et al. Imobilização de arsênio em solos contaminados por zeólita. 2021.

MIHALY-COZMUTA, L. et al. Adsorption of heavy metal cations by Na-clinoptilolite: equilibrium and selectivity studies. Journal of Environmental Management, v. 137, p. 69–80, 2014.

PAVLOVIĆ, Jelena et al. Advances in the Applications of Clinoptilolite-Rich Tuffs. Materials, v. 17, n. 6, p. 1306, 2024.

PÉREZ-BOTELLA, Eduardo; VALENCIA, Susana; REY, Fernando. Zeolites in adsorption processes: State of the art and future prospects. Chemical Reviews, v. 122, n. 24, p. 17647–17695, 2022.

POURRET, Olivier; HURSTHOUSE, Andrew. It's time to replace the term "heavy metals" with "potentially toxic elements" when reporting environmental research. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 16, n. 22, 2019.

RATHI, Bhavya et al. Recent research progress on the removal of heavy metals from wastewater using modified zeolites: a critical review. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 12, n. 8, p. 110889, 2024.

RESTIAWATY, Elvi et al. Utilizing modified clinoptilolite for the adsorption of heavy metal ions in acid mine drainage. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, v. 9, p. 100706, 2024.

RODRÍGUEZ-IZNAGA, Inocente; SHELYAPINA, Marina G.; PETRANOVSKII, Vitalii. Ion exchange in natural clinoptilolite: aspects related to its structure and applications. Minerals, v. 12, n. 12, 2022.

SALOMONS, W. Environmental impacts of metals derived from mining activities: process, predictions, prevention. Journal of Geochemical Exploration, n. 52, p. 5–23, 1995.

SHAOBIN, W.; YUELIAN, P. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. Chemical Engineering Journal, v. 156, p. 11–24, 2009.

SHINZATO, M. C.; HYPOLITO, R. Remoção de metais pesados em solução por zeólitas naturais: revisão crítica. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, v. 27-28, n. 1/2, p. 65–78, 2007.

SILVA, R. F. et al. Evaluation of natural zeolite efficiency for stabilization of potentially toxic elements in mining waste. Applied Sciences, v. 14, n. 10, p. 10864, 2024.

SPRYNSKYY, M. et al. Study of the selection mechanism of heavy metal (Pb^{2+}, Cu^{2+}, Ni^{2+}, Cd^{2+}) adsorption on clinoptilolite. Journal of Colloid and Interface Science, v. 304, p. 21–28, 2006.

UGWU, E. I.; OTHMANI, A.; NNAJI, C. C. A review on zeolites as cost-effective adsorbents for removal of heavy metals from aqueous environment. International Journal of Environmental Science and Technology, v. 19, n. 8, p. 8061–8084, 2022.

VELARDE, Lisbania et al. Adsorption of heavy metals on natural zeolites: A review. Chemosphere, 2023.

ANÁLISE E DESAFIOS DE IMPLEMENTAÇÃO DE PROJETO DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS (PRAD) NO SETOR DE SANEAMENTO: ESTUDO DE CASO (2020-2025)

1 Alisson Carlos Melo Oliveira; 2 Andreza Dnarla Oliveira Santos; 3 Aline Brito de Moraes; 4 Danielly Anastácio dos Santos; 5 Maria Jamile Pereira Ramalho

1 Mestrando em Tecnologia e Gestão Ambiental (IFCE), e-mail: alisson.melo@cagece.com.br; 2 Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária (IFCE), email: andreza.dnarla@cagece.com.br; 3 Graduanda em Geografia (UECE), email: aline.morais@cagece.com.br; 4 Graduanda em Agronomia (UFC), email: danielly.anastacio@cagece.com.br; 5 Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária (UFC), email: maria.ramalho@cagece.com.br

Palavras-chave: Saneamento ambiental; Supressão vegetal; Recuperação de área degradada.

Introdução

O saneamento básico abrange os serviços públicos, infraestruturas e instalações relacionados ao abastecimento de água potável, ao esgotamento sanitário, à drenagem e manejo de águas pluviais, bem como à limpeza urbana e ao manejo de resíduos sólidos. A Lei nº 14.026/2020, que institui o novo marco legal do saneamento, estabelece metas de universalização até 2033, prevendo atendimento de 99% da população com acesso à água potável e 90% com coleta e tratamento de esgoto.

Segundo o Sistema Nacional de Informação do Saneamento (SINISA, 2023), o Brasil apresenta cobertura de abastecimento de cerca de 84%, enquanto a coleta e tratamento de efluentes atingem aproximadamente 56%, configurando um entrave à universalização. No Estado do Ceará, a cobertura de abastecimento varia entre 75% e 85%, ao passo que o atendimento de esgotamento sanitário situa-se entre 30% e 40%. Em virtude desses indicadores, projeta-se uma intensificação dos aportes financeiros no setor com o intuito de viabilizar a universalização dos serviços. Estima-se que os investimentos alcancem o montante de 38,6 bilhões de reais para o exercício de 2026 (SILVA, 2025; ABCON SINDCON, 2026).

A implantação e ampliação de sistemas de abastecimento e esgotamento sanitário são essenciais para a promoção da saúde pública, conservação ambiental e melhoria da qualidade de vida; contudo, assim como outras atividades de infraestrutura, o setor do saneamento também está associado à geração de impactos ambientais, especialmente durante a fase de implantação dos sistemas. Tais impactos exigem identificação, avaliação e proposição de medidas de mitigação ou compensação no planejamento e gestão ambiental. Nesses casos, torna-se necessária a elaboração de diferentes projetos e programas ambientais, dentre eles, o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), requerido quando a atividade antrópica provoca impactos ao meio ambiente que impedem a regeneração natural do ecossistema.

A conformidade com as diretrizes do licenciamento ambiental é um componente estratégico para a viabilidade dos cronogramas de universalização do saneamento. A eficácia dos PRADs não se limita apenas ao cumprimento de condicionantes legais, mas representa um compromisso com a resiliência dos ecossistemas locais frente à crescente pressão antropogênica decorrente das metas de expansão dos serviços. Contudo, a transição entre o planejamento técnico e a execução prática desses planos encontra barreiras institucionais e financeiras que podem comprometer a qualidade da restauração pretendida. Compreender essas lacunas é fundamental para assegurar que o desenvolvimento da infraestrutura de saneamento ocorra de forma integrada à preservação do capital natural, garantindo a sustentabilidade das intervenções no longo prazo.

Diante desse cenário, evidencia-se a necessidade de aprofundar a análise sobre a aplicação dos PRADs no setor de saneamento, especialmente no que se refere à relação entre sua estruturação técnica e as condições efetivas de execução. Embora esses planos sejam elaborados como parte do processo de licenciamento ambiental, ainda são pouco explorados, sob uma perspectiva analítica, os fatores que interferem na sua implementação e continuidade ao longo do tempo.

Isso posto, este trabalho tem como objetivo caracterizar o processo de elaboração do PRAD em uma companhia de saneamento, identificando procedimentos, métodos e principais dificuldades de implementação, além de propor medidas para o aperfeiçoamento e a gestão contínua do programa. A análise foi desenvolvida a partir de levantamento e exame documental dos últimos cinco anos de atuação da companhia.

Material e Métodos

A presente pesquisa caracteriza-se, quanto aos seus procedimentos, como documental; quanto à sua natureza, como qualitativa; e quanto aos seus objetivos, como descritiva.

A pesquisa delineou-se por meio da seleção e análise técnica de Inventários Florestais e Projetos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), desenvolvidos por uma companhia estadual de saneamento. O critério de amostragem estabeleceu um recorte temporal de cinco anos, compreendendo documentos elaborados entre 2020 e 2025.

A pesquisa documental, conforme apontado por Gil (2008), distingue-se da bibliográfica pela natureza das fontes, valendo-se de materiais que não receberam ainda um tratamento analítico aprofundado, o que confere maior proximidade com os dados em sua forma original. Nesse sentido, os documentos técnicos selecionados constituíram a principal fonte de evidências para a investigação proposta.

O tratamento dos dados foi conduzido em duas etapas sequenciais e complementares. Na primeira etapa, procedeu-se à triagem das informações pertinentes aos métodos e técnicas aplicados nos documentos analisados, as quais subsidiaram a caracterização do processo de elaboração e desenvolvimento dos PRADs. Em seguida, realizou-se uma análise qualitativa orientada à identificação e avaliação dos principais obstáculos e dificuldades enfrentados durante a execução das ações de recuperação descritas nos planos.

Resultados e Discussão

Contextualização e regulamentação do PRAD

Até a década de 80, a execução do PRAD era restrita às atividades de mineração, regulamentadas pelo Decreto 97.632/1989. Contudo, a partir dos anos 90, essa obrigatoriedade estendeu-se às demais atividades degradadoras vinculadas ao processo de licenciamento ambiental. Nesse contexto, o plano passou a ser requerido quando a atividade licenciada provocasse impactos como a supressão vegetal ou alteração do solo, impossibilitando o retorno da qualidade e da função ambiental próxima da original. Atualmente, os procedimentos para elaboração do PRAD são normatizados através da Instrução Normativa Ibama nº 14 de 01 de julho de 2024.

Definido como um instrumento de planejamento, o PRAD sistematiza as ações de recuperação por meio da caracterização ambiental detalhada, definição de métodos aplicáveis e cronogramas (físico e financeiro) de execução. Mais do que uma ação pontual de recuperação, o plano exige o acompanhamento contínuo da área recuperada para garantir a eficácia dos resultados. A execução do PRAD visa o restabelecimento do equilíbrio ecossistêmico em áreas impactadas, fundamentando-se em um diagnóstico ambiental prévio. Seus objetivos principais compreendem a recuperação edáfica (solo), a recomposição da cobertura arbórea e a restauração da fauna e flora nativas, promovendo a melhoria sistêmica da qualidade dos recursos naturais na zona de intervenção.

No contexto das companhias de saneamento, de modo geral, os impactos ambientais derivam de intervenções no solo, tais como escavações para o assentamento de tubulações, terraplenagem e supressão de vegetação, intrínsecas à implantação de redes coletoras, adutoras, elevatórias e unidades de tratamento. Assim, durante a fase de instalação, a estratégia de recuperação de áreas degradadas concentra-se na recomposição da cobertura vegetal. Para tanto, são empregadas metodologias de restauração ativa e passiva, destacando-se a nucleação, a semeadura direta e a condução da regeneração natural como técnicas fundamentais para o restabelecimento da sucessão ecológica.

Caracterização dos PRADs analisados

Entre os anos de 2020 e 2025 foram elaborados 12 Prads, os quais foram elaborados de acordo com o Termo de referência da órgão licenciador, apresentando uma estrutura padrão: Caracterização do empreendimento, Diagnóstico ambiental, avaliação de impactos, plano de controle ambiental, plano de desmobilização, plano de recuperação de área degradada, legislação ambiental pertinente e conclusão e recomendações.

O levantamento indicou que a técnica de recuperação predominante nos PRADs analisados foi o plantio total. Este método inicia-se pela seleção criteriosa do elenco florístico e das mudas, seguida pelo preparo do sítio, que compreende o controle de espécies competidoras, a abertura de berços e a adubação de fundação. Em seguida, instala-se o sistema de irrigação, dimensionado conforme a demanda hídrica das espécies, para então proceder ao transplantio.

A configuração espacial do plantio, seja ela sistemática ou aleatória, é condicionada pela declividade do terreno, pela fitofisionomia de referência e pela taxa de recobrimento pretendida. Conforme preconizado nos projetos, a execução em etapa única é estratégica para assegurar a homogeneidade do desenvolvimento ontogenético e otimizar o monitoramento técnico-científico das populações introduzidas.

Após a implantação, a fase de manutenção é contínua e indispensável, envolvendo o controle periódico de plantas espontâneas e o coroamento das mudas. O monitoramento quantitativo, essencial para avaliar a eficácia do plano, inicia-se no terceiro mês após o plantio, com periodicidade mensal até o final do primeiro ano. Este processo contempla o levantamento de atributos edáficos, a porcentagem de cobertura do solo e indicadores dendrométricos, como altura e diâmetro de copa.

As medidas preventivas de cunho socioambiental complementam a recuperação biótica. Atividades de educação ambiental junto à comunidade local, mediante sinalização informativa e ações de sensibilização, são cruciais para a proteção da área. Em suma, o plantio total com espécies nativas de sucessão acelerada consolida-se como um dos métodos mais eficazes para o restabelecimento da estrutura florestal e das funções ecossistêmicas.

Como forma de aprimoramento metodológico, foi observado a proposta de aplicação de novas técnicas previstas para utilização de PRADs futuros, executados fora do recorte de escala temporal deste artigo, estratégias para serem adotadas no ano de 2026. Para além do plantio total de mudas, serão implantadas técnicas de nucleação ecológica, com destaque para implantação de poleiros artificiais e galheiros. A técnica dos poleiros artificiais consistem em instalações dispersas estrategicamente cuja função principal é atrair aves para favorecer a dispersão de sementes, ou seja, aves que os utilizam para forragear suas presas e para descanso, trazem consigo sementes de fragmentos próximos (Grani, 2017).

É debatido que técnicas de nucleação aceleram o processo de restauração florestal, dessa forma outra técnica de nucleação que será utilizada é a transposição de galharia que consiste em formar núcleos com resíduos de matéria orgânica como galhos e folhas encontrados no local que podem servir de abrigo para animações depositarem semente criando microambientes, ademais os galheiros podem atuar como barreiras físicas que facilitam a deposição e o acúmulo de sementes (Lemos; Ferreira, 2014).

Dificuldades de execução

Apesar da segurança processual e metodológica que norteia a elaboração do PRAD, a análise revelou que apenas uma das doze unidades amostrais foi efetivamente implementada, evidenciando lacunas críticas na transição do planejamento para a execução. Entre as principais dificuldades, destacam-se os entraves de natureza fundiária e institucional, a ausência de domínio territorial por parte do empreendedor impõe uma dependência de anuências de terceiros ou de órgãos governamentais para a disponibilização de áreas, o que fragmenta a continuidade das ações de restauração.

No contexto das companhias de saneamento, as limitações orçamentárias configuram-se como um entrave estrutural à plena execução ambiental. A ausência de mecanismos financeiros dedicados, como fundos ambientais específicos, impede a consolidação de reservas perenes para o planejamento de longo prazo das intervenções ecológicas. Por conseguinte, a viabilidade da recuperação ambiental torna-se contingencial, atrelada a superávits orçamentários, convênios ou aportes externos, fator que compromete a regularidade técnica e a eficácia biótica dos projetos.

As dificuldades enfrentadas na execução dos PRADs têm resultado, em muitos casos, na implementação apenas parcial das ações previstas, o que compromete diretamente a efetividade da recuperação ambiental. Na prática, observa-se que as intervenções acabam se restringindo a medidas imediatas, como hidrossemeadura, uso de gramíneas e ações pontuais de estabilização, que, embora importantes em um primeiro momento, não são suficientes para promover a recomposição ecológica ao longo do tempo.

Esse cenário contribui para uma baixa efetividade ecológica, caracterizada pela reduzida diversidade florística e por uma cobertura vegetal limitada, mantendo o solo exposto e suscetível a processos erosivos. Além disso, a escolha de espécies frequentemente prioriza a diversidade em detrimento da rápida cobertura do solo, o que intensifica essa vulnerabilidade. Soma-se a isso o desalinhamento entre as exigências do licenciamento ambiental e as condições operacionais das obras, gerando entraves que dificultam a execução integral das ações propostas.

Ademais, a descontinuidade entre a obra e a fase operacional do PRAD também é observado como dificuldade na manutenção no plano, isto é, porque o PRAD é exigido como condicionante do licenciamento ambiental durante a execução de algumas obras, no entanto, a recuperação ambiental não encerra ao término das atividades da obra. Dessa forma, torna-se necessário um acompanhamento da manutenção, resultando na obrigatoriedade de manter contratos ativos ou de estruturar novos contratos específicos para a fase de monitoramento e manutenção, o que pode atrasar ou até inviabilizar o acompanhamento adequado.

Diante deste cenário evidencia a necessidade de integração do planejamento, execução e operação prevendo mecanismos financeiros e institucionais, com a participação de órgãos ambientais que garanta o preenchimento da lacuna das dificuldades da execução do PRAD.

Proposições para o aprimoramento e efetividade

Nesse contexto, torna-se fundamental adotar estratégias que aumentem a efetividade dos PRADs. Um dos principais pontos é a incorporação do planejamento ambiental de forma mais integrada, considerando as áreas de recuperação ainda na fase de concepção dos projetos. Essa abordagem permite definir com maior com maior precisão as técnicas a serem utilizadas, incluindo a seleção de espécies adequadas, com destaque para plantas pioneiras e leguminosas, que desempenham papel essencial na estabilização do solo e na melhoria de suas condições físicas e químicas.

Outra medida relevante é a criação de bancos de áreas previamente destinadas à compensação ambiental, especialmente em áreas públicas. A utilização de espaços como Unidades de Conservação (UC), Áreas de Preservação Permanente (APP), Reservas Legais (RL), Áreas de Proteção Ambiental (APA) e Áreas de Relevante Interesse Ecológico (ARIE) possibilita maior organização e eficiência na execução das ações de restauração, reduzindo a dependência exclusiva das áreas diretamente impactadas pelas intervenções.

Além disso, a estruturação de mecanismos financeiros específicos voltados à restauração ambiental representa um avanço importante. Iniciativas vinculadas a instituições financeiras podem viabilizar tanto linhas de crédito quanto fundos dedicados à recuperação de áreas degradadas, manejo sustentável e recomposição da vegetação nativa. Esses instrumentos permitem apoiar empresas, produtores rurais e organizações que atuam diretamente na restauração, seja por meio de financiamentos reembolsáveis destinados a projetos de interesse ambiental. Em geral, esses programas priorizam ações que promovam o aumento da cobertura vegetal com espécies nativas, o fortalecimento da cadeia produtiva da restauração e o desenvolvimento de tecnologias associadas.

Por fim, destaca-se a importância do fortalecimento de parcerias institucionais, promovendo a articulação entre empresas de saneamento, prefeituras e órgãos ambientais. Nesse contexto, existem associações que atuam com iniciativas e projetos de restauração ecológica voltados a biomas específicos, desenvolvendo ações que envolvem desde a recuperação da vegetação nativa até a proteção da fauna e a promoção da educação ambiental, contribuindo para resultados mais consistentes e duradouros nos processos de recuperação ambiental.

Considerações Finais

As análises realizadas evidenciaram que os PRADs desenvolvidos pela companhia apresentam consistência técnica e aderência às diretrizes normativas, com estrutura bem definida, diagnóstico ambiental detalhado com adoção predominante do plantio total de espécies nativas como estratégia de recuperação. Entretanto, os resultados demonstram que essa robustez metodológica não se traduz em efetividade prática, uma vez que a implementação dos planos é significativamente limitada, revelando um descompasso entre o planejamento e a execução. A baixa aplicabilidade observada, com execução integral em

apenas uma das áreas analisadas, reforça que os principais entraves não estão associados à concepção técnica dos projetos, mas às condições operacionais e institucionais que viabilizam sua execução.

Os desafios identificados, especialmente a indisponibilidade de áreas, a dependência de terceiros, a ausência de mecanismos financeiros contínuos e a desarticulação entre as fases de obra e pós-obra, comprometem diretamente a continuidade das ações de recuperação e a manutenção das áreas restauradas. Como consequência, observa-se a substituição de estratégias estruturantes por intervenções pontuais, como hidrossemeadura e uso de gramíneas, que não asseguram a recomposição ecológica ao longo do tempo, mantendo baixos níveis de cobertura vegetal e reduzida diversidade florística. Além disso, a descontinuidade do monitoramento após a conclusão das obras fragiliza a consolidação dos resultados, evidenciando a necessidade de planejamento específico para a fase de manutenção.

Portanto, evidencia-se que a efetividade dos PRADs no setor de saneamento depende da integração entre planejamento, execução e operação, incorporando a recuperação ambiental como parte contínua do empreendimento e não apenas como condicionante de licenciamento.

A adoção de estratégias como a definição prévia de áreas para compensação, a estruturação de instrumentos financeiros específicos e a ampliação do uso de técnicas complementares, como a nucleação ecológica, configura-se como caminho para superar as limitações identificadas. Assim, o estudo demonstra que a consolidação de práticas de restauração mais eficazes está diretamente associada à capacidade institucional de garantir a execução e o acompanhamento contínuo dos PRADs, promovendo não apenas a mitigação de impactos, mas o efetivo restabelecimento das funções ambientais nas áreas afetadas.

Referências Bibliográficas

AZEVEDO, Carolina; PEREIRA, Michender; PINTO, Lilian. Utilização de ilhas de diversidade na recuperação ecológica/ambiental de áreas degradadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 2., 2011, Londrina. Anais [...]. Londrina: IBEAS, 2011. Disponível em: https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2011/XI-007.pdf. Acesso em: 01 maio 2026.

EMBRAPA. Plantio por mudas. Brasília: Embrapa, [s.d.]. Disponível em: https://www.embrapa.br/codigo-florestal/plantio-por-mudas. Acesso em: 01 maio 2026.

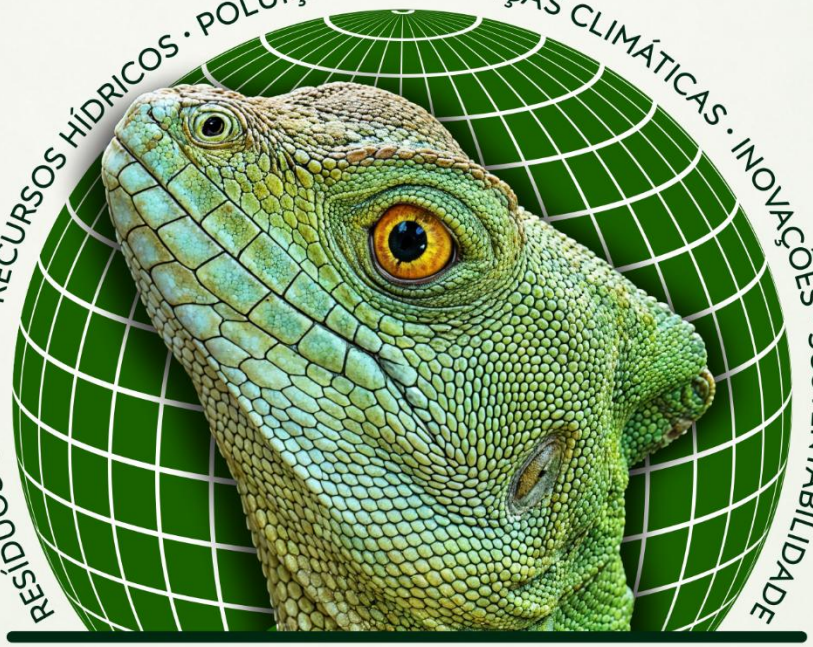
GRANI, Rafael. A restauração ecológica e as ações nucleadoras nos projetos de recuperação de áreas degradadas - PRAD. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS, 19., 2017, Foz do Iguaçu. Anais [...]. Foz do Iguaçu: IBAPE, 2017. Disponível em: https://biblioteca.ibape-nacional.com.br/wp-content/uploads/2017/08/101.pdf. Acesso em: 02 maio 2026.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

LEMOS, C. M. G.; FERREIRA, G. C. Utilização de técnicas de nucleação para recuperação de áreas degradadas pela extração de argila vermelha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 58., 2014, Bento Gonçalves. Anais [...]. Bento Gonçalves: ABC, 2014. Disponível em: https://abceram.org.br/wp-content/uploads/area_associado/58/PDF/03-024.pdf. Acesso em:01 maio 2026.

ÁREA TEMÁTICA 25

RECURSOS HÍDRICOS: APROVEITAMENTO E ESTUDOS AVALIATIVOS



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

CONSUMO HÍDRICO DA SOJA E JANELA DE SEMEADURA NA SAFRA 2025/2026 EM NOVA MUTUM/MT

1 Rigoberto Moreira de Matos, 2 Tadeu Miranda de Queiroz, 3 Daniela Moreira Costa Araújo, 4 Franciso Lledo dos Santos, 5 Cristiano Poleto, 6 Eduarda Gabrielle Graebin Galdino, 7 Rodrigo Bruno Zanin

1 Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), rigobertomoreira@gmail.com; 2 Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), tdmqueiroz@unemat.br; 3 Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), daniela.araujo@gmail.com; 4 Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), franciscolledo@unemat.br; 5 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, cristiano.poleto@ufrgs.br; 6 Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), eduarda.gabrielle@unemat.br; 7 Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), rodrigo.zanin@unemat.br.

Palavras-chave: coeficiente de cultura; evapotranspiração; saldo hídrico atmosférico.

Resumo

A soja é sensível à variabilidade intrassazonal das chuvas no início da safra em Mato Grosso, influenciando o consumo hídrico e o risco climático. Este estudo estimou a evapotranspiração de referência (ETo) e simulou a evapotranspiração da cultura (ETc) da soja em Nova Mutum/MT, comparando cinco cenários de semeadura com indicadores decendiais de precipitação, consumo hídrico e saldo atmosférico (P-ETc). Utilizaram-se dados diários de Tmáx, Tmín e Tméd (01/09 a 31/12/2025) de estação meteorológica instalada na área experimental da UNEMAT e precipitação de pluviômetro manual. A radiação extraterrestre (Ra) foi calculada conforme FAO-56 e a ETo estimada pelo método de Hargreaves-Samani. Adotou-se o Kc decendial do ZARC (ciclo de 115 dias), gerando Kc diário por cenário e ETc = Kc·ETo, com agregação decendial de P, ETo, Kc, ETc e P-ETc. Os resultados indicaram predominância de déficits em outubro e, sobretudo, novembro, onde o decêndio 11/11 - 20/11 foi o mais crítico em todos os cenários. Semeaduras em outubro reduziram a frequência de decêndios com saldo negativo e aumentaram o saldo acumulado no período observado, ao deslocar o pico de demanda para decêndios mais chuvosos. A integração entre ETo e Kc do ZARC identifica janelas críticas de maior risco de déficit. Recomenda-se incorporar a capacidade de armazenamento de água no solo (CAD) para aprimorar o diagnóstico e apoiar o planejamento soja-safrinha.

Introdução

A soja (*Glycine max* L. Merrill) constitui um dos principais pilares do agronegócio brasileiro, com elevada expressão territorial e econômica no Centro-Oeste. Em Mato Grosso, a produção ocorre sob forte controle climático, especialmente pela sazonalidade das chuvas em clima tropical do tipo savana (Aw), no qual a estação chuvosa se concentra, em geral, entre outubro e abril, e a estação seca predomina entre maio e setembro (ALVARES et al., 2013; BRANQUINHO et al., 2020). Nessa transição seco-úmida, a irregularidade intrassazonal das precipitações pode gerar "janelas" de recarga hídrica alternadas com períodos de limitação hídrica, influenciando o estabelecimento da cultura e a dinâmica de demanda evaporativa ao longo do ciclo, com repercussões para o manejo e para o risco produtivo.

A avaliação do consumo hídrico e do risco climático pode ser fundamentada na evapotranspiração: a evapotranspiração de referência (ETo) expressa a demanda atmosférica, e a evapotranspiração da cultura (ETc) é estimada a partir de ETc = Kc x ETo, conforme o arcabouço do FAO-56 (ALLEN et al., 1998). O método padrão FAO Penman-Monteith exige variáveis meteorológicas nem sempre disponíveis (por exemplo, radiação, vento e umidade), o que torna relevantes abordagens alternativas quando se dispõe apenas de temperatura. Nessa condição, o método de Hargreaves-Samani, que utiliza temperatura do ar e radiação extraterrestre (Ra) calculada astronômica e rotineiramente segundo FAO-56, é amplamente empregado como alternativa operacional para estimar ETo (HARGREAVES; SAMANI, 1985; ALLEN et al., 1998). Em aplicações de risco e planejamento, indicadores baseados na relação entre precipitação e demanda (P - ETc) podem contribuir para interpretar períodos com maior probabilidade de déficit, ainda que não substituam um balanço hídrico completo do solo (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

No Brasil, o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) fornece diretrizes para reduzir a exposição da cultura a condições meteorológicas adversas, incorporando calendários de semeadura, critérios de risco e parametrizações fenológicas/hídricas compatíveis com a lógica de manejo (BRASIL, 2025b). No caso da soja, além do ZARC, normas fitossanitárias estabelecem vazio sanitário e calendário de semeadura, com implicações diretas para o posicionamento do ciclo no regime de chuvas e para o planejamento do sistema soja-milho 2ª safra (BRASIL, 2025a). Apesar disso, ainda é útil produzir análises locais, com dados observados, que traduzam a informação do zoneamento em métricas hidrometeorológicas por decêndio, formato amplamente utilizado no ZARC, e que permitam comparar cenários realistas de semeadura em uma área específica, sobretudo quando a disponibilidade de variáveis meteorológicas é limitada.

Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo estimar a ETo diária para Nova Mutum/MT a partir de dados de temperatura, aplicar Kc decendial do ZARC para ciclo médio de 115 dias visando obter a ETc da soja e, então, comparar cinco cenários de semeadura por meio de agregações decendiais de P, ETo, Kc, ETc e do saldo P-ETc, discutindo as implicações para a janela de plantio e o risco climático no início da safra.

Material e Métodos

Este estudo foi desenvolvido no município de Nova Mutum, região médio-norte do estado de Mato Grosso, Brasil, utilizando dados observacionais coletados no Campus Experimental do Curso de Bacharelado em Agronomia da Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT). A estação meteorológica da área experimental está localizada nas coordenada Latitude -13,80 e Longitude -56,08. A região insere-se predominantemente no domínio climático tropical sazonal do tipo savana (Aw), com marcada sazonalidade de chuvas, caracterizada por período chuvoso concentrado entre aproximadamente outubro e abril e estação seca entre maio e setembro (ALVARES et al., 2013; BRANQUINHO et al., 2020).

Foram utilizados dados diários de temperatura do ar máxima, mínima e média no período de 01/09/2025 a 31/12/2025, obtidos na estação meteorológica instalada e operando na área experimental da UNEMAT. A precipitação pluvial diária foi obtida por leitura em pluviômetro manual instalado na mesma área, seguindo rotina diária de observação. O recorte temporal foi definido para compatibilizar a integração entre temperatura e precipitação observadas no período inicial da safra de soja 2025/2026.

Aplicou-se verificação de plausibilidade e coerência interna (Tmin<=Tmed<=Tmax). Falhas pontuais em temperatura foram preenchidas por interpolação linear entre dias adjacentes (WMO, 2018) e a coerência foi reavaliada. Para precipitação (pluviômetro manual), 0 mm foi atribuído apenas quando havia registro explícito de ausência de chuva; dias sem leitura foram mantidos como NA e excluídos de somatórios quando aplicável.

Foram simulados cinco cenários de semeadura da soja para a safra 2025/2026, respeitando o término do vazio sanitário e o calendário de semeadura vigentes para Mato Grosso. Segundo a Portaria SDA/MAPA nº 1.271/2025, o vazio sanitário em MT ocorreu até 06/09/2025 e o calendário de semeadura de 07/09/2025 a 07/01/2026 (BRASIL, 2025a). Assim, definiram-se: S1 = 1º decêndio de setembro/2025 (01-10/09); S2 = 2º decêndio de setembro/2025 (11-20/09); S3 = 3º decêndio de setembro/2025 (21-30/09); S4 = 1º decêndio de outubro/2025 (01-10/10) e S5 = 2º decêndio de outubro/2025 (11-20/10).

A Ra diária (MJ m^{-2} dia^{-1}) foi calculada a partir da latitude da estação (-13,804352 graus) e do dia juliano, conforme FAO-56 (ALLEN et al., 1998), incorporando declinação solar, distância relativa Terra-Sol e ângulo horário ao pôr do sol. A ETo diária (mm dia^{-1}) foi estimada pelo método de Hargreaves-Samani, por não requerer medições de radiação solar, utilizando apenas temperatura e Ra (HARGREAVES; SAMANI, 1985; ALLEN et al., 1998). Aplicou-se: $ETo = 0{,}0023 \times (Tmed + 17{,}8) \times (Tmax - Tmin)^{0{,}5} \times Ra \times 0{,}408$, em que 0,408 é o fator de conversão de MJ m^{-2} dia^{-1} para mm dia^{-1} de equivalente de evaporação.

Adotou-se ciclo médio de 115 dias, conforme parametrização do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) para soja. Os valores de Kc decendiais foram extraídos das tabelas oficiais disponibilizadas no ZARC, Plantio Certo e/ou nos anexos das portarias do ZARC (BRASIL, 2025b; BRASIL, 2023). Para cada cenário, a série Kc (dia) foi gerada deslocando-se no tempo a sequência decendial de Kc ao longo do ciclo (115 dias), atribuindo a cada dia do ciclo o Kc correspondente ao seu decêndio fenológico. Quando o ciclo excedeu o período com dados meteorológicos disponíveis (após 31/12/2025), os cálculos foram apresentados apenas para a janela com observações, mantendo-se explícita a limitação temporal.

A ETc diária (mm dia^{-1}) foi estimada para cada cenário pela relação $ETc = Kc \times ETo$ (ALLEN et al., 1998). Para dialogar diretamente com o formato do MAPA/ZARC, as variáveis P, ETo, Kc e ETc foram agregadas por decêndio do calendário (1º = dias 1-10; 2º = 11-20; 3º = 21 até o último dia do mês). Também foram calculados acumulados ao longo do período analisado e por cenário (ΣP, ΣETo e ΣETc).

Foram calculados, por decêndio e por cenário, os indicadores: precipitação acumulada (P_{acum}), evapotranspiração da cultura acumulada (ETc_{acum}) e o saldo atmosférico simplificado (P - ETc). O saldo foi interpretado como aproximação do balanço hídrico climático no decêndio, sem considerar armazenamento de água no solo, escoamento superficial e percolação profunda; portanto, valores negativos indicam maior demanda atmosférica relativa à chuva no período, enquanto valores positivos sugerem potencial de recarga/umidificação do solo (DOORENBOS; KASSAM, 1979; ALLEN et al., 1998). Os cálculos foram realizados em planilha auditáveis (colunas intermediarias) e agregação por decêndio; foram geradas tabelas-síntese, gráficos de series/acumulados e heatmap do saldo (P-ETc).

Resultados e Discussão

A distribuição da precipitação (P) ao longo dos decêndios mostra que as chuvas no começo da estação chuvosa são concentradas e intermitentes, o que é característico do Centro-Oeste. Nesse padrão, a variabilidade intrassazonal pode causar "janelas" de recarga hídrica intercaladas com períodos de diminuição das entradas de água no sistema (Figura 01). Do ponto de vista do manejo, essa variação afeta diretamente a fase de estabelecimento da soja, uma vez que a germinação e a emergência demandam umidade adequada e, ao mesmo tempo, são sensíveis tanto à falta quanto ao excesso de água (BRASIL, 2025).

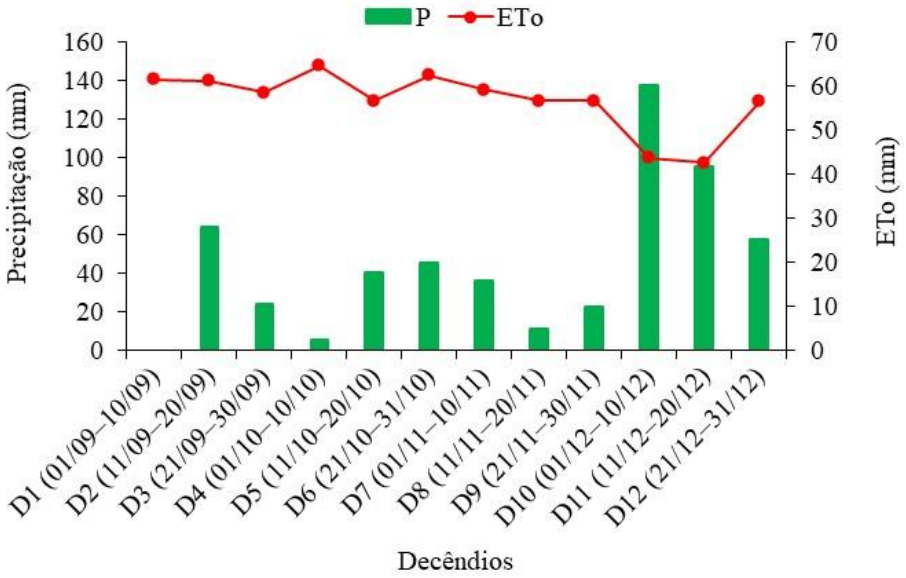


Figura 01. Precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ETo) acumuladas por decêndio de 01/09 a 31/12/2025 (safra de soja 2025/26) em Nova Mutum-MT.

Simultaneamente, a evapotranspiração de referência (ETo), calculada pelo método simplificado baseado em temperatura (Hargreaves-Samani), indica a demanda atmosférica potencial que a cultura deve atender (Figura 1). Apesar de a ETo por Hargreaves-Samani ser frequentemente empregada na ausência de dados completos (como radiação, vento e umidade), a literatura indica que sua precisão pode oscilar de acordo com as condições locais, especialmente em contextos com intenso controle aerodinâmico e variações na nebulosidade. Mesmo assim, o método é sugerido como uma alternativa operacional, pois requer apenas informações de temperatura e radiação extraterrestre (calculada de forma astronômica) (HARGREAVES; SAMANI, 1985; ALLEN et al., 1998). Nesse contexto, analisar P e ETo por decêndio em conjunto ajuda a situar o "clima" que a soja enfrenta em cada janela de semeadura.

A evapotranspiração da cultura (ETc) é o resultado da combinação da demanda atmosférica (ETo) com a resposta do dossel e do sistema solo-planta-atmosfera, que é representada pelo coeficiente de cultura (Kc). Essa relação é expressa pela fórmula clássica ETc = Kc x ETo (ALLEN et al., 1998). Neste estudo, a utilização do Kc decendial do ZARC (Figura 02A) como curva principal garante a coerência com a lógica do zoneamento, possibilitando que a progressão temporal do Kc siga as etapas fenológicas estabelecidas no ciclo médio de 115 dias empregado nas simulações (BRASIL, 2025).

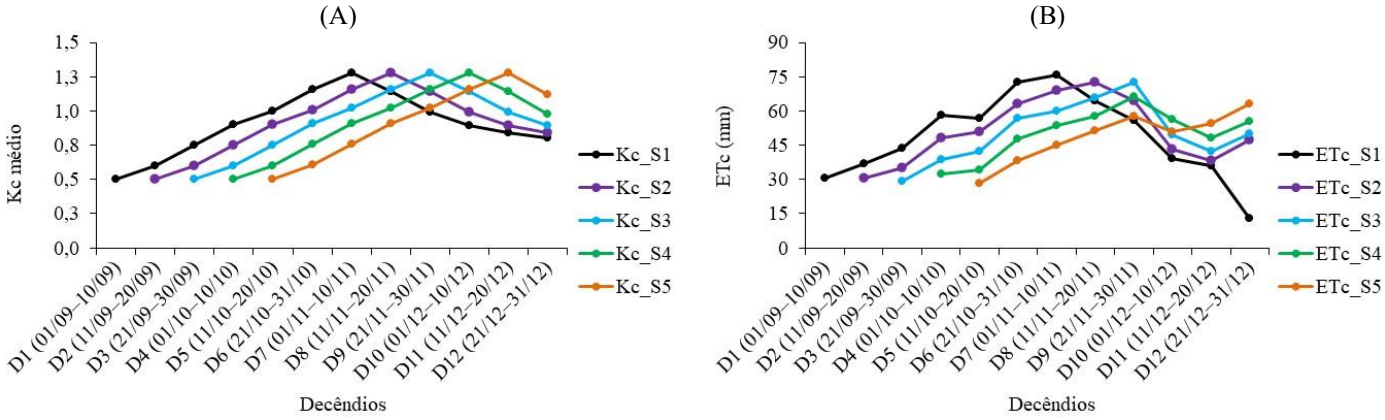


Figura 02. A - Kc médio da soja por decêndio em diferentes cenários de plantio (Fonte: ZARC/MAPA); e B - Evapotranspiração da cultura da soja, acumulada por decêndio em diferentes cenários de semeadura para a safra 2025/26 em Nova Mutum-MT.

A Figura 02B permite observar que as variações entre os cenários (S1 a S5) não resultam de mudanças na forma da curva de Kc, mas do deslocamento temporal dessa curva de acordo com a data de semeadura. Dessa forma, as variações de ETc entre os cenários são justificadas por dois fatores: I - a coincidência dos períodos de Kc mais elevado com os decêndios de maior (ou menor) ETo; e II - a sobreposição desses períodos de maior demanda da cultura com os decêndios mais chuvosos (ou mais secos), o que determina o saldo P-ETc (Figura 3; Tabela 1). Em termos ecofisiológicos, esse aspecto é crucial, mesmo que o total acumulado ao longo do ciclo não varie significativamente entre os cenários, a distribuição temporal do consumo pode modificar o risco de estresse em etapas críticas.

A Tabela 1 resume o comportamento do saldo P-ETc por decêndio em cada cenário, possibilitando a identificação de períodos críticos com saldo negativo (quando a demanda potencial é maior que a entrada de água pela chuva) e períodos com saldo positivo (quando as chuvas superam a demanda atmosférica da cultura). Apesar de esse indicador não constituir um balanço hídrico completo (uma vez que não leva em conta o armazenamento no solo, escoamento superficial e percolação), ele fornece informações valiosas para a comparação de cenários em um formato compatível com a comunicação decendial do ZARC.

Tabela 01. Heatmap do saldo hídrico atmosférico simplificado (P-ETc) por decêndio e por cenário de semeadura da soja (ciclo 115 dias), Nova Mutum-MT.

Decêndios	Cenários				
	S1 = 01-10/09	S2 = 11-20/09	S3 = 21-30/09	S4 = 01-10/10	S5 = 11-20/10
D1 (01/09–10/09)	-30,72				
D2 (11/09–20/09)	27,28	33,4			
D3 (21/09–30/09)	-19,86	-11,09	-5,24		
D4 (01/10–10/10)	-53,07	-43,39	-33,71	-27,26	
D5 (11/10–20/10)	-16,62	-10,96	-2,47	6,03	11,69
D6 (21/10–31/10)	-27,5	-18,15	-11,65	-2,56	6,8
D7 (01/11–10/11)	-39,98	-32,77	-23,9	-17,72	-9,13
D8 (11/11–20/11)	-53,45	-61,94	-55,2	-46,71	-40,75
D9 (21/11–30/11)	-33,59	-41,8	-50,3	-43,58	-35,08
D10 (01/12–10/12)	98,41	94,25	87,91	81,36	86,68
D11 (11/12–20/12)	59,33	57,2	53,15	46,98	40,6
D12 (21/12–31/12)	44,34	10,13	7,31	2,22	-5,68

Do ponto de vista agronômico, a interpretação sugerida é identificar em quais fases do ciclo os saldos negativos estão concentrados. Para simulação e critérios de risco, o ZARC organiza o ciclo da soja em quatro etapas fenológicas: Estabelecimento, Crescimento vegetativo, Floração e enchimento de grãos, e Maturação (BRASIL, 2025). Dentre todas as fases, a fase reprodutiva (floração e enchimento de grãos) é considerada especialmente vulnerável a estresses, uma vez que a falta de água nesse período tende a influenciar os componentes do rendimento (quantidade de grãos e/ou massa de grãos), causando um impacto maior na produtividade final (ECK et al., 1987). Evidências recentes indicam que o período crítico para determinar o rendimento pode se estender de R4 a R7, com pico de sensibilidade durante o enchimento (CERRUDO; NAEVE, 2025). Nesse contexto fisiológico, situações em que os decêndios mais altos de Kc coincidem com saldos consistentemente negativos indicam um maior risco de perda potencial.

Ademais, pesquisas experimentais indicam que a ocorrência de seca seguida de reidratação pode levar à recuperação parcial de variáveis fisiológicas, mas nem sempre compensa as perdas acumuladas, especialmente quando o estresse acontece em estágios relacionados ao enchimento de grãos (WANG et al., 2025). Portanto, ao comparar os cenários S1-S5, deve-se destacar a duração e a frequência dos déficits por decêndio, bem como sua posição no ciclo, em vez de se concentrar apenas no total acumulado durante o período.

A Tabela 2 sintetiza, para cada cenário de semeadura (S1-S5), a relação integrada entre a oferta hídrica (precipitação acumulada, P), a demanda atmosférica (ETo acumulada) e a demanda da cultura (ETc acumulada). Também são apresentados o saldo atmosférico simplificado (P-ETc) e a frequência de decêndios com saldo negativo.

Tabela 02. Síntese dos indicadores hídricos por cenário de semeadura da soja: precipitação total (P), ETo total, ETc total e saldo acumulado (P-ETc), Nova Mutum-MT (01/09 a 31/12/2025).

Cenário	Plantio	Dias Com dados	P Total mm	ETo Total mm	ETc Total mm	Saldo mm	Decêndios Com Saldo negativo	Pior decêndio	Pior Saldo mm
S1	01-09	115	529,1	639,7	583	-53,9	8	D8	-53,4
S2	11/09	112	537,6	618,2	562,7	-25,1	7	D8	-61,9
S3	21/09	102	473,6	557	507,7	-34,1	7	D8	-55,2
S4	01/10	92	449,6	498,5	450,8	-1,2	5	D8	-46,7
S5	11/10	82	444,6	434	389,5	55,1	4	D8	-40,8

A interpretação principal da Tabela 02 não se resume a qual cenário teve maior P, mas sim em quão adequada foi a chuva disponível para atender à ETc estimada e por quanto tempo os decêndios mantiveram uma condição potencialmente deficitária. Em relação ao risco climático, cenários com um maior número de decêndios negativos e saldo acumulado mais deficitário indicam uma

maior chance de estresse hídrico, caso o solo não tenha capacidade de armazenamento adequada para compensar déficits sequenciais. Isso deve ser destacado como uma limitação do indicador P-ETc (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

Semeaduras mais tardias geralmente deslocam o período de maior demanda da soja para meses com chuvas mais constantes, diminuindo a frequência de saldos negativos. No entanto, o atraso no plantio também pode atrasar a colheita e reduzir o tempo disponível para a implantação da safrinha. Essa conexão é amplamente reconhecida por instituições e monitoramentos regionais, os atrasos na soja geralmente afetam diretamente o milho 2ª safra, aumentando a quantidade de área plantada fora da "janela ideal" e elevando o risco agronômico do cereal (APROSOJA-MT, 2023; CANAL RURAL, 2020).

A Tabela 3 aprimora a análise ao redistribuir P, ETc e saldo (P-ETc) de acordo com as fases fenológicas do ZARC, possibilitando a avaliação não só da quantidade de déficit/excedente, mas também da etapa do desenvolvimento em que ele se concentrou. Esse recorte é importante do ponto de vista agronômico, pois a soja apresenta diferentes níveis de sensibilidade ao estresse hídrico ao longo de seu ciclo, déficits nas fases iniciais podem afetar o estande, enquanto déficits durante a floração e o enchimento de grãos tendem a ter um impacto maior na redução do rendimento, pois afetam a fixação de vagens e o processo de enchimento dos grãos (ECK; MATHERS; MUSICK, 1987). Desse modo, os cenários em que a fase de maior Kc (e maior ETc) coincide com decêndios de baixo aporte de chuva, tendem a apresentar maior risco fisiológico, mesmo que o saldo total do período não seja o mais desfavorável.

A Tabela 03 serve como base para justificar tecnicamente o melhor alinhamento entre o calendário fenológico e o regime de chuvas, do ponto de vista da janela de semeadura. Deslocar a semeadura pode permitir que a fase reprodutiva (com maior demanda) ocorra em períodos historicamente mais chuvosos, diminuindo a duração dos saldos negativos nessa fase. No entanto, a mesma lógica reforça o compromisso com a safrinha, cenários que melhoram o saldo na fase reprodutiva podem, ao mesmo tempo, atrasar a maturação/colheita, aumentando o risco de atraso no milho da 2ª safra. Assim, a Tabela 3 embasa uma discussão prática, o cenário tecnicamente mais seguro para a soja (por fase) pode não ser o mais apropriado para o sistema soja-milho. É aconselhável considerar o resultado como um equilíbrio entre a redução de déficits na fase crítica da soja e a preservação do tempo necessário para a semeadura da safrinha.

Tabela 03. Indicadores hídricos por fase fenológica do ZARC (ciclo 115 dias) e por cenário de semeadura: duração, Kc médio, precipitação (P), ETc e saldo (P-ETc), Nova Mutum-MT.

Cenário	Plantio	Fase (ZARC)	Período	Duração (dias)	Kc médio	P (mm)	ETc (mm)	Saldo (mm)
S1	01/09/2025	Fase I	01/09–10/09	10	0,50	0,0	30,7	-30,7
S1	01/09/2025	Fase II	11/09–10/10	30	0,75	93,0	138,6	-45,6
S1	01/09/2025	Fase III	11/10–29/11	50	1,12	154,3	320,1	-165,8
S1	01/09/2025	Fase IV	30/11–24/12	25	0,86	281,8	93,6	188,2
S2	11/09/2025	Fase I	11/09–20/09	10	0,50	64,0	30,6	33,4
S2	11/09/2025	Fase II	21/09–20/10	30	0,75	69,0	134,4	-65,4
S2	11/09/2025	Fase III	21/10–09/12	50	1,12	251,8	308,5	-56,7
S2	11/09/2025	Fase IV	10/12–31/12	22	0,87	152,8	89,2	63,6
S3	21/09/2025	Fase I	21/09–30/09	10	0,50	24,0	29,2	-5,2
S3	21/09/2025	Fase II	01/10–30/10	30	0,75	90,0	132,6	-42,6
S3	21/09/2025	Fase III	31/10–19/12	50	1,12	283,8	291,8	-8
S3	21/09/2025	Fase IV	20/12-31/12	12	0,89	75,8	54,1	21,7
S4	01/10/2025	Fase I	01/10–10/10	10	0,50	5,0	32,3	-27,3
S4	01/10/2025	Fase II	11/10–09/11	30	0,75	120,0	129,8	-9,8
S4	01/10/2025	Fase III	10/11–29/12	50	1,12	322,6	278,8	43,8
S4	01/10/2025	Fase IV	30/12-31/12	2	0,90	2,0	10,0	-8
S5	11/10/2025	Fase I	11/10–20/10	10	0,50	40,0	28,3	11,7
S5	11/10/2025	Fase II	21/10–19/11	30	0,75	91,8	129	-37,2
S5	11/10/2025	Fase III	20/11-31/12	42	1,14	312,8	232,1	80,7

Nota: Fases ZARC (ciclo 115 dias) operacionalizadas por DAP: I=1-10; II=11-40; III=41-90; IV=91-115. Kc decendial do ZARC/MAPA (aplicado diariamente). ETc = Kc x ETo; ETo por Hargreaves-Samani; Ra por FAO-56. P do pluviômetro manual da UNEMAT. Saldo = P - ETc (indicador atmosférico, sem CAD). Fases em amarelo: parciais até 31/12/2025.

Conclusão

A demanda atmosférica e o Kc do ZARC permitiram quantificar a ETc e identificar períodos críticos de maior consumo hídrico ao longo do ciclo.

Os decêndios mais críticos concentraram-se em outubro e, principalmente, novembro, quando a frequência de saldo P-ETc negativo foi maior entre os cenários.

Semeaduras em outubro tenderam a reduzir déficits durante a fase de maior demanda, ao deslocar o pico de ETc para decêndios mais chuvosos.

A escolha da janela de semeadura deve equilibrar menor risco de déficit na soja e antecipação da colheita para viabilizar a implantação oportuna da safrinha.

O saldo P-ETc é indicador atmosférico; incorporar armazenamento de água no solo (CAD) e balanço hídrico completo aumentará a robustez do diagnóstico local.

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

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56). 1998.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

APROSOJA-MT. Atraso no plantio de soja da safra 23/24 pode impactar safra de milho em MT. Cuiabá: Aprosoja Mato Grosso, 2023.

BRANQUINHO, R. G.; SANTOS, D. P.; ANJOS, J. C. R.; SILVA, G. C.; BRITO, G. H. M.; CARMINATTI, A. G. B. Rainfall distribution in a region of Amazon rainforest in the north of Mato Grosso. **Acta Agronómica**, v. 69, n. 3, p. 212–218, 2020.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Aplicativo Plantio Certo (ZARC – Plantio Certo). Brasília, DF: MAPA, 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Secretaria de Defesa Agropecuária. Portaria SDA/MAPA nº 1.271, de 30 de abril de 2025. Estabelece os períodos de vazio sanitário e de calendário de semeadura de soja em nível nacional, referentes à safra 2025/2026. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 5 maio 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Secretaria de Política Agrícola. Portaria SPA/MAPA nº 372, de 24 de junho de 2025. Aprova o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) para a cultura da soja no estado de Mato Grosso, ano-safra 2025/2026. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 26 jun. 2025.

CANAL RURAL. Mato Grosso: 14% do milho 2ª safra deve ser plantado fora da janela ideal. Canal Rural, 24 dez. 2020.

CERRUDO, A.; NAEVE, S. L. Redefining soybean critical period for yield determination. **Field Crops Research**, v. 321, art. 109662, 2025.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. Rome: FAO, 1979. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 33).
ECK, H. V.; MATHERS, A. C.; MUSICK, J. T. Plant water stress at various growth stages and growth and yield of soybeans. **Field Crops Research**, v. 17, n. 1, p. 1-16, 1987.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985. DOI: 10.13031/2013.26773.

WANG, C.; SUM, A.; ZHU, L. J.; LIO, M.; ZHANG, Q.; WANG, L.; GAO, X. Drought and rewatering effects on soybean photosynthesis, physiology and yield. **PeerJ**, v. 13, e19658, 2025.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Guide to climatological practices. Geneva: WMO, 2018. (WMO-No. 100).

POTENCIAL DE PRODUÇÃO SAZONAL DE ÁGUA NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITAJAÍ-MIRIM (BHRIM) ATRAVÉS DO MODELO INVEST

1Rodrigo Fortunato de Oliveira, 2Ana Luísa Silva Donazzolo, 2Jullia Comicholi Vargas, 1,2Vivian de Mello Cionek

1 Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI), e-mail:rodrigofortunato144@gmail.com; 2 Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI), e-mail: analuisadonazzolo@gmail.com; julliajargas@gmail.com; vivian.cionek@univali.br

Palavras-chave: Uso e Ocupação da Terra; Provisão Hídrica; Serviços ecossistêmicos.

Introdução

Os serviços ecossistêmicos desempenham um papel fundamental na manutenção do equilíbrio ecológico e no bem-estar humano, sendo classificados em quatro categorias: provisão, regulação, suporte e culturais. Em bacias hidrográficas, esses serviços garantem a disponibilidade de água, a regulação do clima e o suporte à biodiversidade. No entanto, apesar de sua importância, o capital natural ainda é subvalorizado nos processos de tomada de decisão, especialmente diante da crescente degradação ambiental resultante de atividades antrópicas (Agostinho et al, 2005; Almeida et al., 2023; MEA, 2005).

Diante desse contexto, diversos modelos hidrológicos e biofísicos têm sido desenvolvidos para avaliar a provisão de serviços ecossistêmicos, com o objetivo de compreender sua dinâmica e mensurar seu valor para a sociedade. Entre os modelos biofísicos utilizados, destacam-se o SWAT – Soil and Water Assesment Tool, o VIC – Variable Infiltration Capacity, o RHESS – Regional Hydro-Ecological Simulation System e o InVEST - Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs. O modelo InVEST tem sido amplamente empregado na modelagem da provisão e demanda de serviços ecossistêmicos relacionados à água em diferentes cenários, inclusive de mudanças climáticas, permitindo subsidiar a formulação de políticas públicas e estratégias de manejo sustentável (Anjinho et al., 2022).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023) alerta que as alterações climáticas induzidas pelo homem estão resultando em danos irreversíveis aos ecossistemas, ao ciclo hidrológico e à sociedade, e por isso, a gestão dos recursos hídricos exige a identificação de áreas-chave para a provisão de água. Na bacia do Rio Itajaí-Mirim, é essencial determinar quais áreas mantêm esse serviço, embora a compreensão da provisão hídrica ainda seja insuficiente, dificultando estratégias eficazes de conservação. Assim, é necessário mapear a distribuição desse serviço a fim de estabelecer ações mais efetivas de gerenciamento e a oferta hídrica. Diante disso, o objetivo deste resumo é caracterizar a dinâmica espacial da provisão hídrica atual na BHRIM, com base na análise dos componentes do balanço hídrico para o ano de 2024.

Material e métodos

A sub-bacia hidrográfica do rio Itajaí-Mirim, integrante da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí-Açu, está situada na região do Vale do Itajaí, em Santa Catarina, abrangendo uma área de 1.677,2 km² ao longo de aproximadamente 170 km de extensão (Brandt et al., 2010). Essa bacia engloba nove municípios: Vidal Ramos, Presidente Nereu, Botuverá, Guabiruba, Gaspar, Ilhota, Brusque, Itajaí e Camboriú. A região apresenta relevo marcado pelas Serras do Itajaí, Tijucas e Faxinais, com predominância de rochas intrusivas, metamórficas e sedimentares (Santos, 1991). A bacia possui formação florestal de Floresta Ombrófila Densa no Bioma Mata Atlântica, influenciadas pela umidade oceânica (Klein, 1978; Veloso et al., 1991). O clima é mesotérmico úmido sem estação seca (Cf), com temperaturas entre 14°C e 20°C e precipitação anual de 1.550 mm (Pandolfo et al., 2002;SDS, 2017). Observa-se intensa ocupação ao longo do rio, com mineração de areia, agricultura e urbanização, especialmente próximo à foz (Minatti-Ferreira & Beaumord, 2006).

O software utilizado para a execução deste trabalho foi o InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs), idealizado pelo The Natural Capital Project (gratuito e de código aberto). Foi utilizado o módulo de Produção Sazonal de Água (PSA), livremente traduzido do termo Seasonal Water Yield (SWY). Este módulo estima a quantidade de água produzida por uma bacia hidrográfica que chega aos cursos d'água ao longo do ano na forma de escoamento superficial e de recarga aquífera local. Este módulo considera que o escoamento superficial rápido corresponde à quantidade de precipitação que escoa diretamente sobre o terreno durante ou logo após um evento de chuva. A recarga local refere-se à parte da precipitação que infiltra no solo, descontando o volume evaporado ou absorvido pela vegetação, e estando disponível para recarga aquífera (Quadro 1).

Dado secundário	Fonte do dado	**Resolução**
Modelo Digital de Elevação (MDE)	Levantamento aerofotogramétrico do Estado de Santa Catarina (LAESC)	1m
Uso e ocupação da Terra (UOT)	MapBiomas Coleção 9	30m
Precipitação (P)	Interpolação via vizinhos naturais de dados de 36 pluviômetros.	300m

Evapotranspiração (ETP)	Equação modificada de Hargreaves com dados de precipitação (interpolada) e temperatura de satélite do WorldClim e radiação da NASA	300m
Hidrologia (H):		
Bacia hidrográfica (H1)	H1 e H2. LAESC	H1 e H2. 1m
Threshold Flow Accumulation (H2)	H3. EMBRAPA e Sartori et al (2005)	H3. 30m
Grupo Hidrológico de Solo (H3)	H4. Agência Nacional de Águas	H4. 30m
Curve Number (H4)		

Quadro 01: Dados necessários e fontes de dados utilizadas.

Resultados e discussão

A sub-bacia do rio Itajaí-Mirim é majoritariamente coberta por vegetação florestal (60,76%), estando tal uso concentrado na porção central da bacia hidrográfica. A região à montante da bacia hidrográfica já apresenta intervenções, com ocorrências pontuais de mineração, silvicultura e cultivos temporários, que fragmentam a cobertura natural, geram grandes áreas de solo exposto e alteram a dinâmica hidrológica, especialmente por meio da redução da infiltração e aumento do escoamento superficial. No trecho médio da bacia hidrográfica, há o predomínio de vegetação nativa e áreas antropizadas. Já no trecho jusante da bacia hidrográfica, intensifica-se a ocupação antrópica, com maior presença de áreas urbanizadas e lavouras temporárias, especialmente arroz e soja. De forma geral, observa-se o aumento da urbanização da bacia hidrográfica no sentido montante–jusante, impactando na dinâmica hidrológica da bacia.

A produção de escoamento superficial (quickflow) apresenta elevada heterogeneidade espacial (Figura 01). Os maiores valores concentram-se ao longo dos canais de drenagem e cursos hídricos e em áreas com maior grau de antropização, especialmente à jusante e em trechos da cabeceira sob influência de mineração e cultivos temporários, indicando menor capacidade de infiltração e predominância de fluxos superficiais, característica de áreas antropizadas (Ghezali & Boukhemacha, 2026). Por outro lado, regiões com menores valores de escoamento superficial estão associadas principalmente às áreas com maior cobertura florestal na porção central da bacia, refletindo maior retenção hídrica e menor resposta imediata aos eventos de precipitação.

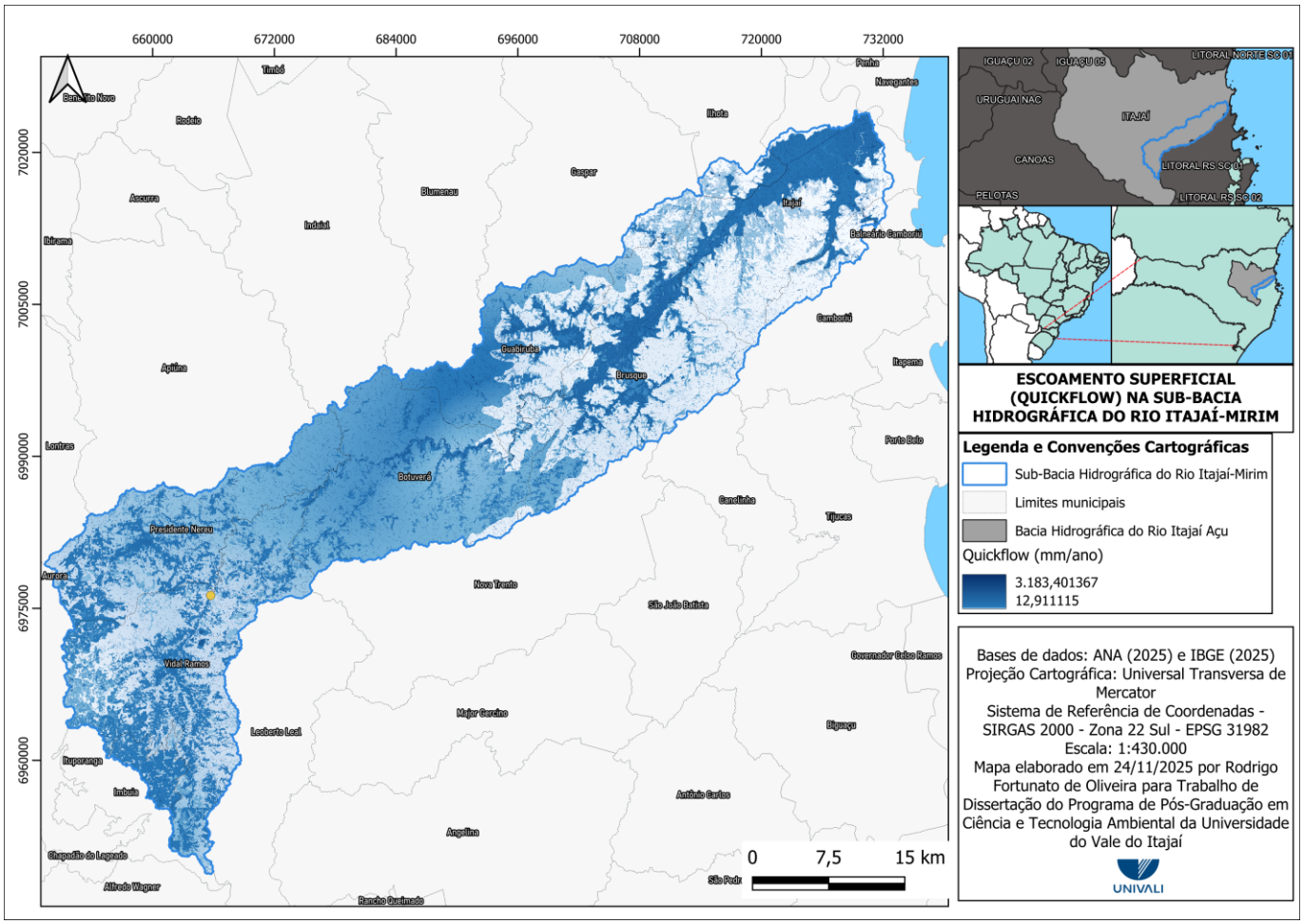


Figura 01: Escoamento superficial na sub-bacia hidrográfica para o ano de 2024.

Quanto à recarga local (Figura 02), observa-se que a região central da bacia hidrográfica apresenta os maiores valores, coincidindo com as áreas de maior cobertura vegetal, o que indica maior capacidade de infiltração e armazenamento hídrico no solo. Essas regiões desempenham papel fundamental na manutenção do escoamento de base e na regulação do fluxo hídrico ao longo do tempo. Os valores negativos de recarga local representados na Figura 02 representam a alimentação de cursos hídricos através do lençol freático, sendo interpretados como a retirada de água disponível no solo após o processo de recarga local.

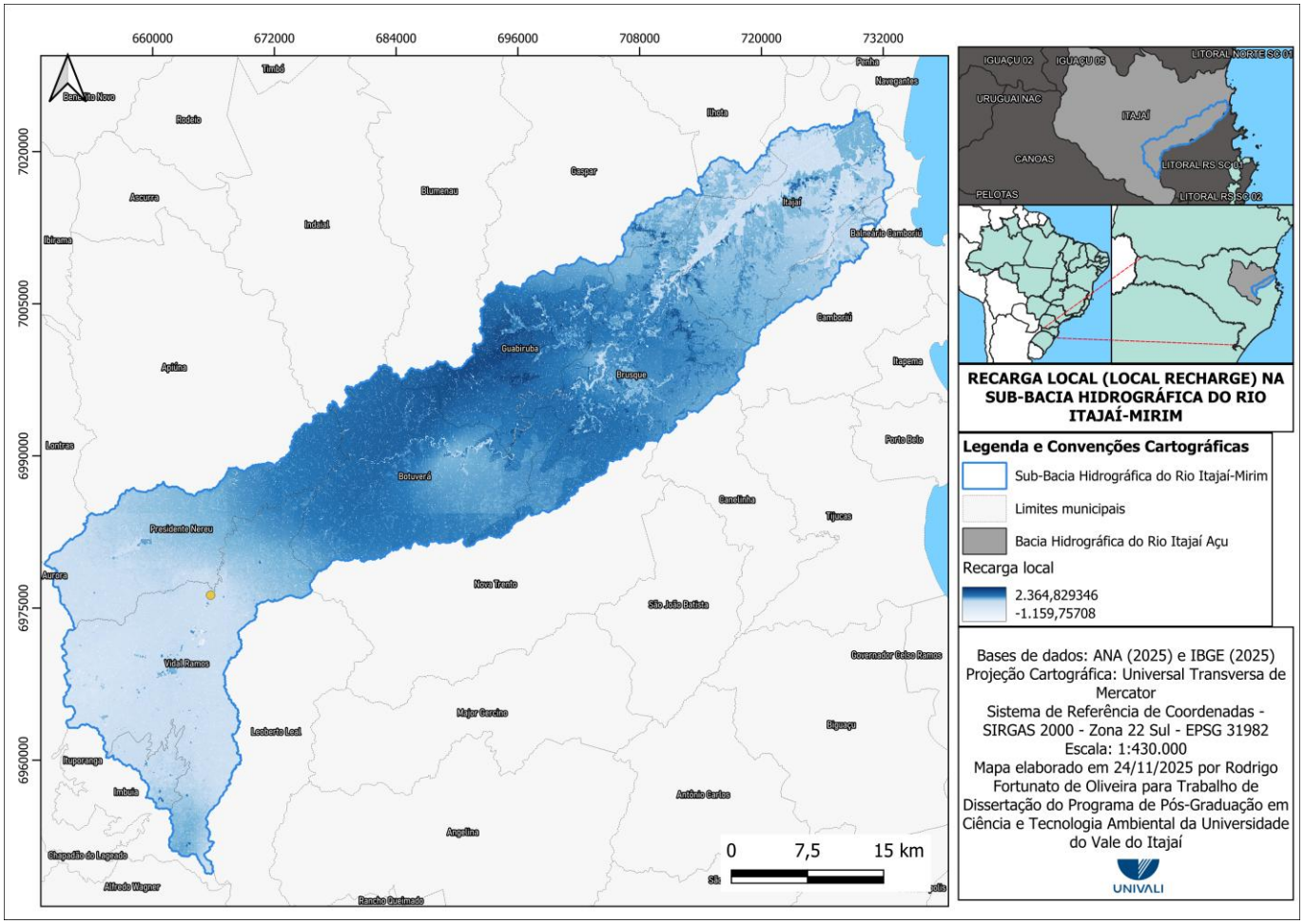


Figura 02: Recarga local na sub-bacia hidrográfica (unidade: mm/ano).

A análise integrada dos resultados evidencia o particionamento da água no sistema hidrológico da bacia, com uma relação inversa entre o escoamento superficial e a recarga local, fortemente condicionada pelo uso e ocupação da terra. Áreas com maior cobertura florestal favorecem a infiltração e apresentam menor geração de escoamento superficial, enquanto regiões antropizadas tendem a intensificar o escoamento superficial e reduzir a recarga. Esse padrão demonstra que a dinâmica do balanço hídrico na BHRIM é controlada pela interação entre características físicas e antrópicas da paisagem, evidenciando a heterogeneidade espacial dos processos hidrológicos (Refsgaard, Stisen & Koch, 2021).

Considerações Finais

Os resultados demonstram que o balanço hídrico da Sub-bacia Hidrográfica do Rio Itajaí-Mirim apresenta forte variabilidade espacial, sendo condicionado pela interação entre precipitação, infiltração, escoamento superficial e uso e ocupação da terra. A identificação desses padrões permite compreender o funcionamento hidrológico da bacia, evidenciando áreas com maior contribuição para recarga hídrica, associadas à cobertura florestal, e regiões com predominância de escoamento superficial, relacionadas a usos antrópicos. Essa caracterização fornece subsídios relevantes para a gestão dos recursos hídricos, destacando a importância de integrar o uso e ocupação da terra na análise do particionamento da água e da provisão hídrica.

Agradecimentos

VMC agradece o financiamento FAPESC TO 2024TR001778.

Referências Bibliográficas

AGOSTINHO, A. A.; THOMAZ, S. M.; GOMES, L. C. Conservation of the biodiversity of Brazil's inland waters. Conservation Biology, v. 19, n. 3, p. 646–652, 2005.

ALMEIDA, P. R.; MATEUS, C. S.; ALEXANDRE, C. M.; PEDRO, S.; BOAVIDA-PORTUGAL, J.; BELO, A. F. et al. The decline of the ecosystem services generated by anadromous fish in the Iberian Peninsula. Hydrobiologia, v. 850, n. 12, p. 2927–2961, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s10750-023-05179-6.

ANJINHO, P. da S.; BARBOSA, M. A. G. A.; MAUAD, F. F. Evaluation of InVEST's water ecosystem service models in a Brazilian subtropical basin. Water, v. 14, n. 10, p. 1559, 2022.

BRANDT, A. C. C.; STEINBACH, A. M.; FRANK, B.; KANGERSKI, K.; SEDLACEK, L. M. P.; RUDOLPHO, L. da S. Plano de recursos hídricos da bacia do Rio Itajaí: para que a água continue a trazer benefícios para todos. Blumenau: FURB, [s.d.]. 80 p.

IPCC. Climate change 2023: synthesis report – summary for policymakers. Geneva: IPCC, 2023. 42 p.

GHEZALI, S.; BOUKHEMACHA, M. A. Impacts of changes in climatic conditions and urbanization on runoff at city scale. ENP Engineering Science Journal, v. 5, n. 2, p. 12–17, 2026. DOI: http://dx.doi.org/10.53907/enpesj.v5i2.341.

KLEIN, R. M. Mapa fitogeográfico do estado de Santa Catarina. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues, 1978. 24 p.

MEA (Millennium Ecosystem Assessment). Ecosystems and human well-being: synthesis. Washington: Island Press, 2005. 137 p.

MINATTI-FERREIRA, D. D.; BEAUMORD, A. C. Adequação de um protocolo de avaliação rápida de integridade ambiental para ecossistemas de rios e riachos: aspectos físicos. Revista Saúde e Ambiente, v. 7, n. 1, p. 39–47, 2006.

NATURAL CAPITAL PROJECT. Seasonal water yield model. 2025. Disponível em: https://naturalcapitalproject.stanford.edu/invest/seasonal-water-yield. Acesso em: 28 mar. 2026.

PANDOLFO, C.; BRAGA, H. J.; SILVA JUNIOR, V. P. da; MASSIGNAM, A. M.; PEREIRA, E. S.; THOMÉ, V. M. R.; VALCI, F. V. Atlas climatológico digital do Estado de Santa Catarina. Florianópolis: EPAGRI, 2002. 13 p.

REFSGAARD, J. C.; STISEN, S.; KOCH, J. Hydrological process knowledge in catchment modelling: lessons and perspectives from 60 years development. Hydrological Processes, v. 36, n. 1, p. 1–20, 2022. DOI: http://dx.doi.org/10.1002/hyp.14463.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDS). Caracterização geral das regiões hidrográficas de Santa Catarina: RH7 – Vale do Itajaí. Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina – PERH/SC. Florianópolis: SDS, 2017. 40 p.

SANTOS, G. F. Evolução quaternária do Alto Vale do Rio Itajaí-Mirim nas proximidades de Botuverá, SC. 1991. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1991. 49 p.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal. Rio de Janeiro: IBGE, 1991. 123 p.

ATUALIZAÇÃO DA EQUAÇÃO INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA (IDF) PARA O MUNICÍPIO DE BAURU/SP COM DADOS DE ALTA RESOLUÇÃO TEMPORAL

1 Ana Laura Pascucci de Oliveira, 2 João Eduardo Feitosa Ribeiro, 3 Simone Andrea Furegatti, 4 Graziele Ruas

1 Universidade Estadual Paulista (UNESP), e-mail: ana.pascucci@unesp.br; 2 João Universidade Estadual Paulista (UNESP), e-mail:jef.ribeiro@unesp.br; 3 Universidade Estadual Paulista (UNESP), e-mail: simone.furegatti@unesp.br; 4 Universidade Estadual Paulista (UNESP), e-mail: graziele.ruas@unesp.br

Palavras-chave: Equação IDF; Alta resolução temporal; Eventos hidrológicos extremos.

Introdução

À medida que as temperaturas globais e os padrões de precipitação se alteram devido às mudanças climáticas, as cidades se tornam cada vez mais vulneráveis a eventos hidrológicos extremos (EINI *et al*., 2026). No município de Bauru, localizado no interior do estado de São Paulo, a realidade urbana tem sido fortemente marcada por essa instabilidade climática, que oscila entre períodos prolongados de escassez hídrica e episódios de precipitação intensa. Frequentemente, os eventos de chuva no município causam grandes transtornos e prejuízos para a população, com maior impacto em áreas de risco (MACHADO; MACHADO; SCHIEWALDT, 2019). Essa vulnerabilidade ressalta a necessidade de estudos para estimar as precipitações e promover uma gestão hídrica resiliente no município. A falta de representatividade das equações Intensidade-Duração-Frequência (IDF) com dados antigos e de desagregados pode gerar falhas na elaboração de projetos e redimensionamento do sistema de microdrenagem existente, resultando na continuidade dos problemas urbanos referentes a esse tema (KEMPKA *et al*., 2024). Nesse sentido, o objetivo do presente estudo foi obter a equação IDF atualizada para a cidade de Bauru com base na análise de séries históricas de precipitação registradas por pluviômetros automáticos, traçando comparativos com equações existentes na literatura para verificar se a nova IDF altera significativamente os padrões de projeto que eram adotados anteriormente e contribuir com o planejamento de sistemas de drenagem e a mitigação de impactos causados por chuvas intensas.

Material e Métodos

Para o desenvolvimento da equação IDF, foram utilizados dados pluviométricos de alta resolução (intervalos de 5 minutos) com série histórica de 22 anos (2004–2025) fornecidos pelo Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMET), referentes à estação situada em Bauru-SP (Lat: -22,35768°; Long: -49,02799°). Os eventos chuvosos foram individualizados por meio de um período seco de 6 horas como etapa inicial da definição da equação IDF. Com a precipitação acumulada dos eventos, as intensidades foram calculadas e as Séries Máximas Anuais (SMA) foram construídas para cada duração (5, 10, 15, 20, 25, 30, 60, 120, 360, 720 e 1440 minutos). Para a estimativa dos quantis de precipitação associados aos tempos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 e 1000 anos, as intensidades da SMA foram ajustadas à função de distribuição de probabilidades Generalizada de Valores Extremos (GEV) (JENKINSON, 1955; NAGHETTINI; PINTO, 2007), definida por:

$$FDP = f(x) = \frac{1}{\sigma} \cdot [1 - \xi \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)]^{\left(\frac{1+\xi}{\xi}\right)} \cdot exp\left\{-[1 - \xi \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)]^{\frac{1}{\xi}}\right\} \quad (01)$$

Onde: parâmetro de forma (ξ) , parâmetro de escala (σ) e parâmetro de posição (μ).

Para avaliar a adequação da distribuição GEV aos dados de precipitação máxima para cada duração analisada, foram utilizados procedimentos gráficos e um teste estatístico de adequação. A análise gráfica foi realizada por meio de gráficos de probabilidade-probabilidade (PP) e gráficos de quantil-quantil (QQ). Além disso, aplicou-se o teste de Anderson–Darling (AD) com um nível de significância de 5%, utilizando como referência os valores críticos da distribuição de Gumbel (BESKOW et al., 2015). Por fim, os parâmetros da equação IDF foram estimados por meio do ajuste de um modelo de regressão linear logarítmica.

Para análise comparativa da equação proposta, utilizaram-se como referência as equações do Serviço Geológico Brasileiro - SGB de 2014 (Equação 2) e a equação IDF do Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE de 1999 (Equação 3), elaborada por Martinez e Magni, ambas para o município de Bauru. A comparação considerou os tempos de retorno (TR) de 2, 10 e 100 anos e durações (t_d) de 10, 60 e 1440 minutos, avaliando o comportamento das intensidades estimadas pela equação IDF proposta com as presentes na literatura.

$$I_{SGB} = \frac{1057{,}97 \cdot TR^{0{,}1830}}{(t_d + 10{,}76)^{0{,}7881}} \quad (02)$$

Onde: *TR* é tempo de retorno e t_d o tempo de duração. Equação válida para tempo de retorno de 5 até 100 anos e durações de 5 minutos a 24 horas.

$$I_{DAEE} = \{35{,}4487 \cdot (t_d + 20)^{-0{,}8894} + 8{,}9664 \cdot (t_d + 20)^{-0{,}7749} \cdot [-0{,}4772 - 0{,}9010 \cdot Ln \cdot Ln(\frac{TR}{TR-1})]\} \cdot 60 \quad (03)$$

Onde: *TR* é tempo de retorno e t_d o tempo de duração. Equação válida somente para durações de chuvas entre 10 e 1440 minutos.

Resultados e Discussão

A análise dos ajustes indicou conformidade satisfatória entre as probabilidades empíricas e teóricas, com a distribuição GEV representando adequadamente os extremos para a maioria das durações, conforme o teste Anderson-Darling (aceito em 9 das 11 séries). Desvios observados nos gráficos QQ e nas durações de 120 e 360 minutos concentraram-se na cauda superior, refletindo incertezas inerentes a eventos raros e amostras limitadas. A equação IDF ajustada apresentou elevada robustez (R^2 = 0,97), com erro relativo médio (9,9%) e RMSE (18,5 mm/h) condizentes com magnitudes relatadas em estudos de precipitação subdiária no Brasil (GARRIDO, 2024; SABINO et al., 2020). Conforme sugerido por Willmott e Matsuura (2005), a análise dos resíduos não revelou viés sistemático, mostrando maior estabilidade para durações acima de 60 minutos e tempos de retorno de até 100 anos. Maiores discrepâncias em durações curtas e tempos de retorno elevados alinham-se à variabilidade de chuvas convectivas e incertezas de extrapolação (CHOW et al., 1988). Tais resultados validam a consistência hidrológica do modelo, recomendando sua aplicação prioritária em projetos de microdrenagem, onde o desempenho estatístico mostrou-se mais estável. A relação intensidade-duração-frequência resultante é expressa pela Equação 4. Na Tabela 1 estão organizadas as intensidades estimadas pelas equações, bem como as variações percentuais da IDF proposta com relação a IDF do SGB e do DAEE.

$$I_{proposta} = \frac{1028{,}13 \cdot TR^{0{,}1683}}{(t_d + 6{,}99)^{0{,}7587}} \qquad (04)$$

Onde: *TR* é tempo de retorno e t_d o tempo de duração.

TR	td	Intensidade IDF SGB	Intensidade IDF DAEE	Intensidade IDF Proposta	Diferença Proposta-SGB (%)	Diferença Proposta-DAEE (%)
2	10	110,02	97,61	134,72	22,45	38,02
2	60	41,85	40,52	47,57	13,66	17,41
2	1440	3,87	2,98	4,62	19,39	55,01
10	10	147,70	163,06	176,63	19,59	8,32
10	60	56,19	71,12	62,37	11,00	-12,31
10	1440	5,20	6,21	6,06	16,60	-2,36
100	10	225,10	244,70	260,23	15,61	6,35
100	60	85,64	109,30	91,89	7,30	-15,93
100	1440	7,92	10,23	8,93	12,72	-12,71

Tabela 01: Estimativas de intensidades pluviométricas (mm/h) estimadas pelas equações do SGB, do DAEE e da IDF proposta e as respectivas variações percentuais.
Fonte: Autores (2026)

A comparação entre os modelos revela que a equação proposta apresenta intensidades superiores à do SGB em todos os cenários, com acréscimos médios superiores a 12% nas durações de 10 e 1440 minutos. Essas divergências podem ser atribuídas ao método de desagregação pluviométrica utilizado para desenvolvimento da IDF do SGB, com base em coeficientes de desagregação regionais, que tendem a suavizar a variabilidade de curto período, enquanto a equação proposta deriva de dados locais de alta resolução. Essa disparidade evidencia a fragilidade do uso de métodos de desagregação indireta para o dimensionamento de sistemas de microdrenagem em Bauru, onde a resposta das bacias urbanas é altamente dependente de eventos extremos de curta duração.

Em relação ao DAEE, a IDF proposta se mostrou mais conservadora para eventos de baixa recorrência (TR=2 anos), com diferenças de até 55,01%, e para durações curtas (td=10 min). Todavia, para tempos de retorno elevados e durações prolongadas, a equação proposta apresentou valores até 15,9% inferiores aos do DAEE. Essas divergências ressaltam a importância da atualização das séries históricas, indicando que modelos regionais antigos podem não representar com precisão a variabilidade climática atual, ora subestimando picos de curta duração, ora superestimando volumes em durações longas. Este padrão evidencia a capacidade do novo modelo em capturar intensidades críticas de precipitação para durações curtas, as quais são fundamentais para o dimensionamento de estruturas de microdrenagem urbana, mitigando riscos de subdimensionamento em cenários de chuvas convectivas intensas.

Considerações Finais

Os resultados obtidos demonstram que a distribuição GEV, aliada à regressão logarítmica, proporcionou um ajuste robusto e hidrologicamente consistente para a série histórica analisada. A comparação com modelos institucionais revelou divergências que ressaltam a necessidade de atualização constante das curvas IDF, sob risco de subdimensionamento de sistemas de drenagem inicial. Embora todos os modelos de frequência estejam sujeitos às incertezas inerentes à extrapolação estatística, a robustez dos indicadores de ajuste e a atualização da série temporal sugerem que a IDF proposta oferece uma representação mais conservadora e fiel ao comportamento hidrológico contemporâneo da região, sendo preferível para o dimensionamento de infraestruturas urbanas em relação a modelos regionais defasados. A equação proposta, ao integrar dados de alta resolução, oferece uma estimativa mais equilibrada e aderente à variabilidade pluviométrica atual, se mostra essencial para o planejamento e a resiliência da drenagem urbana no município de Bauru.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao financiamento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Número do Processo: 88887.962863/2024-00, e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - Número do Processo: 2020/15434-0. Agradecemos também a Universidade Estadual Paulista (UNESP) pelo apoio recebido e ao Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMET) pelo fornecimento de dados.

Referências Bibliográficas

BESKOW, S., Caldeira, T.L., de Mello, C.R., Faria, L.C. and Guedes, H.A.S. (2015). Multi Parameter Probability Distributions for Heavy Rainfall Modeling in Extreme Southern Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies,* 4, 123-133. [1]

EINI, M. R. et al. Rising heavy precipitation extremes in Central European river basins under a high emission scenario. Scientific Reports, [s. l.], v. 16, n. 11233, 2026. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-026-45624-9. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-026-45624-9.

JENKINSON, A. F. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Quartely Journal of the Royal Meteorological Society*, [S.l], v. 81, n. 348, p. 158-171, 1955.

KEMPKA, M. et al. Implantação de microrreservatórios de lotes como proposta para diminuir a lâmina de água nas galerias e o pico de vazão no sistema de microdrenagem de um novo loteamento. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, Uberaba, v. 9, n. 3, p. 252-266, out./dez. 2024. DOI: https://doi.org/10.18554/rbcti.v9i3.8178.

MACHADO, Jeferson Prietsch; MACHADO, Cristiane Ferrari Canez; SCHIEWALDT, Caio Brandão. Eventos extremos de precipitação no município de Bauru-SP: possibilidade de ocorrências de desastres naturais? *Anuário do Instituto de Geociências*, Rio de Janeiro, v. 42, n. 1, p. 255-266, 2019. DOI: 10.11137/2019_1_255_266.

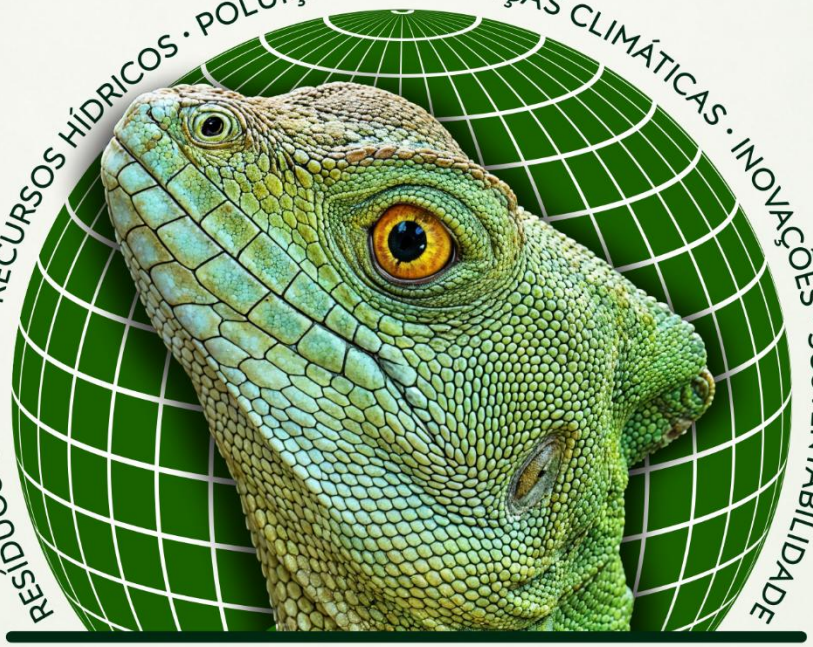
NAGHETTINI, Mauro; PINTO, Éber José de Andrade. *Hidrologia estatística*. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

SÃO PAULO. DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. *Equações de Chuvas Intensas do Estados de São Paulo – Convênio DAEE-USP.* São Paulo: DAEE/CTH. 1999. 124p.

SERVIÇO GEOLÓGICO BRASILEIRO - SGB. *Plano de Informações de Chuvas Intensas do Brasil: Equações de Intensidade-Duração-Frequência*. Brasília, DF: Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), 2014. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/server/api/core/bitstreams/f38563ec-2c57-475e-ad83-a8d34b63b9b3/content. Acesso em: 20 abr. 2026.

ÁREA TEMÁTICA 26

RECURSOS HÍDRICOS: PLANEJAMENTO, GESTÃO E POLÍTICAS PÚBLICAS



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

GESTÃO DAS ÁGUAS INTEGRADA À GESTÃO DO TERRITÓRIO RURAL: UMA ANÁLISE DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTA BÁRBARA/MG

1 Taís Silva Lomba, 2 Hugo Portocarrero, 3 Eliane Maria Vieira

1 Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, e-mail: tais.lomba21@gmail.com; 2 Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, e-mail: hportocarrero@gmail.com, 3 Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, e-mail: elianevieira@unifei.edu.br

Palavras-chave: Gestão das Águas; Gestão do Território Rural; Bacia do rio Santa Bárbara.

Introdução

A Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997) estabelece como base territorial para sua implementação a bacia hidrográfica. As bacias hidrográficas são áreas delimitadas pelos divisores topográficos, nas quais o escoamento das águas das chuvas converge, por ação da gravidade, para um curso d'água principal por meio de seus tributários (Piroli, 2022). Em paralelo, tem-se o Código Florestal Brasileiro, regido pela Lei 12.651/2012, determina que toda propriedade rural seja inscrita no Cadastro Ambiental Rural (CAR) afim de integrar as informações destas propriedades como uma base consolidada de dados essenciais ao monitoramento, planejamento ambiental e econômico, além da prevenção ao desmatamento. Nesse sentido, a gestão territorial rural em bacias hidrográficas exerce papel estratégico na conservação dos recursos hídricos, especialmente em regiões onde a ocupação rural é predominante. No Brasil, a divisão geopolítica municipal pode, em alguns casos, coincidir de forma parcial ou majoritária com os limites de uma bacia hidrográfica, o que exige que as decisões de gestão sejam orientadas por uma análise comparativa entre os recortes administrativos e naturais. Dessa forma, a articulação entre os instrumentos de gestão de recursos hídricos e de ordenamento territorial rural mostra-se fundamental para a promoção do uso sustentável do solo e da água em escala de bacia hidrográfica. A sub-bacia hidrográfica do rio Santa Bárbara integra a bacia hidrográfica do rio Piracicaba, a qual está inserida na bacia hidrográfica interestadual do rio Doce, localizando-se na região central do estado de Minas Gerais. Considerando sua inserção parcial no Quadrilátero Ferrífero, região de elevada relevância econômica em Minas Gerais, o estudo buscou analisar a integração entre a gestão dos recursos hídricos e a gestão do território rural, identificando atores envolvidos, eficiências existentes e proposições de ações de melhoria para os municípios da bacia.

Metodologia

Para a caracterização e análise da bacia deste estudo, foram executadas as seguintes ações:

(i) Extração dos *shapefiles* e dicionários de dados das camadas utilizadas com a descrição dos campos da tabela de atributos da plataforma de metadados da Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais (IDE-SISEMA/MG), sendo as camadas utilizadas: **a)** percentual da população urbana do município atendida por tratamento de esgoto (2024); **b)** bacia hidrográfica ottocodificada (2020); **c)** hidrografia principal ottocodificada (2022); **d)** imóveis para recomposição de APPs declarados no CAR (2024). Para a elaboração do mapa de uso e cobertura do solo, foi utilizado o dado matricial de uso e ocupação do solo extraído do SRTM/Embrapa (2000), adotando-se o código de cores da coleção 10 do MapBiomas (2024) para a caracterização das classes.

(ii) Manipulação das camadas *shapefile* no *software QGIS Desktop 3.40.10 Bratislava* para a elaboração dos mapas temáticos e cálculo das áreas de interesse valendo-se do uso das ferramentas de resumo estatístico disponíveis;

(iii) Caracterização dos meios físico, antrópico e rural da área de estudo, com base na integração dos dados espaciais e na revisão bibliográfica sobre a gestão das águas e do território, visando à identificação dos principais atores envolvidos, bem como das eficiências e deficiências associadas à gestão da bacia, para subsidiar a proposição de ações de melhoria.

Caracterização da sub-bacia

A sub-bacia hidrográfica do rio Santa Bárbara abrange os municípios de Barão de Cocais, Santa Bárbara, São Gonçalo do Rio Abaixo e Catas Altas, totalizando 78.567 habitantes, com maior concentração populacional em Santa Bárbara (30.466 hab.) e Barão de Cocais (30.778 hab.), seguidos por São Gonçalo do Rio Abaixo (11.850 hab.) e Catas Altas (5.473 hab.). Inserida parcialmente no Quadrilátero Ferrífero, região de grande interesse minerário, a bacia apresenta elevada complexidade geológica, com predomínio de formações ferríferas bandadas, metassedimentos, quartzitos, xistos e rochas carbonáticas, condicionando a ocorrência de solos como Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelos distróficos, Cambissolos Háplicos, Argissolos Vermelho-Amarelos e extensas áreas de Neossolos Litólicos e afloramentos rochosos. O relevo é majoritariamente ondulado a fortemente ondulado, com setores montanhosos e escarpados concentrados principalmente nas porções sul e sudeste da bacia, refletindo-se em amplitudes altimétricas que variam aproximadamente entre 630 m e 2.070 m. O bioma predominante na bacia é a Mata Atlântica, com presença de formações florestais e áreas de transição com campos rupestres associados ao Quadrilátero Ferrífero. O uso do solo é marcado pela predominância de formação florestal e pastagens, além de áreas de mineração, afloramentos rochosos, silvicultura e núcleos urbanos concentrados nos municípios. Os mapas de localização, hidrografia, uso e cobertura do solo são apresentados na Figura 1.

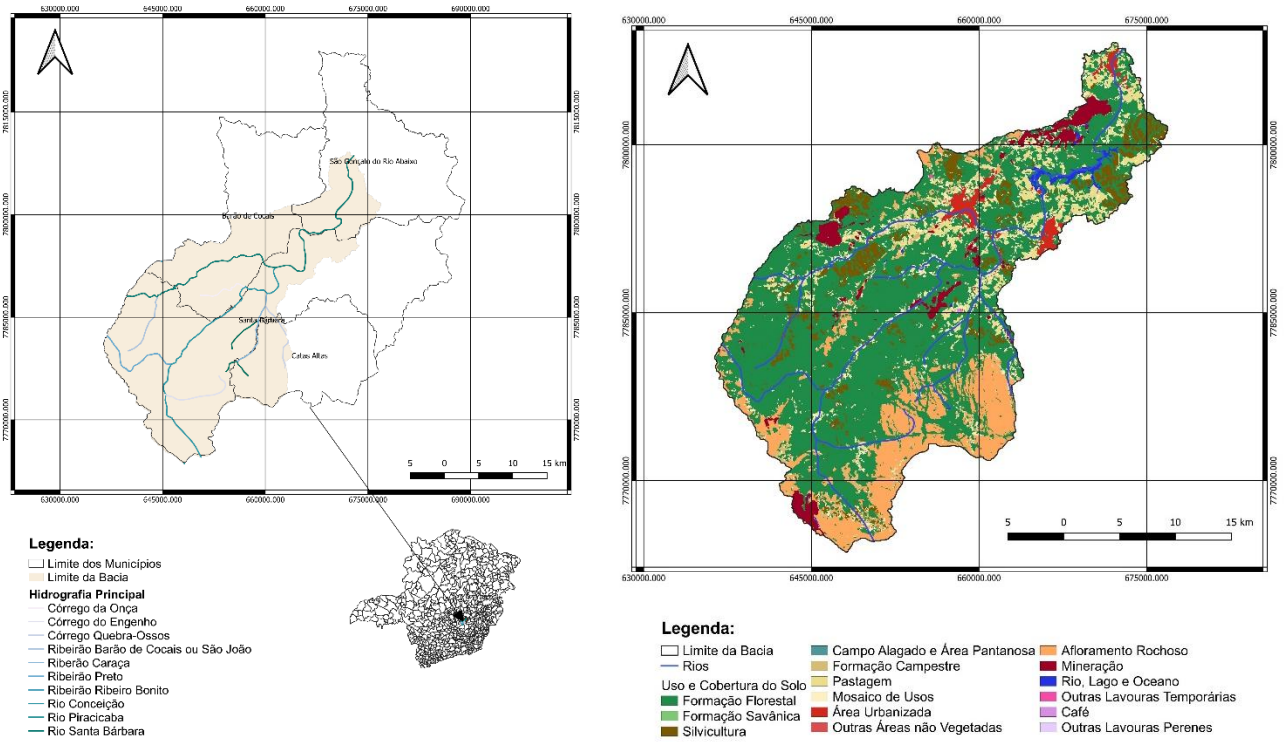


Figura 01: Mapa de localização e hidrografia principal à esquerda; Mapa de uso e cobertura do solo à direita. Fonte: Elaborado pelos autores (2026) a partir dos dados do IDE-SISEMA/MG (2020;2022;2024), MapBiomas (2024) e SRTM/Embrapa (2000).

Análise geopolítica e das áreas rurais

Quando se observa a divisão geopolítica dos municípios que compõem a bacia, atenta-se que a ocupação por propriedades rurais é majoritária em 93%. Consoante a este fator, quando se trata do recorte territorial da bacia, constata-se também um elevado percentual de propriedades rurais cadastradas (74,5%), refletindo uma ampla regularização acerca deste instrumento. No entanto, cabe ressaltar que este percentual pode vir a ser ainda maior em virtude das propriedades que ainda não foram regularizadas ou não foram declaradas. A síntese da distribuição territorial é apresentada pela Tabela 1.

Unidade	Área (km²)	Área na bacia (km²)	%
Barão de Cocais	340,56	340,56	100
Catas Altas	238,21	76,50	32
Santa Bárbara	684,75	450,32	66
São Gonçalo do Rio Abaixo	364,75	364,75	100
Área total	**1628,27**	**1232,13**	**-**
Propriedades Rurais	1516,44	-	93
	-	917,08	74,5

Tabela 01: Síntese da participação municipal e da ocupação rural na Bacia do Rio Santa Bárbara (MG). Fonte: IDE-SISEMA/MG (2020), adaptado pelos autores.

Na sub-bacia hidrográfica do rio Santa Bárbara, onde predomina o uso rural do solo e há elevado percentual de imóveis cadastrados no Cadastro Ambiental Rural (CAR), a efetividade da conservação das Áreas de Preservação Permanente (APPs) hídricas depende da articulação entre instrumentos ambientais e de saneamento básico. Embora o CAR constitua importante base para regularização ambiental e identificação espacial das APPs, sua função declaratória não garante, por si só, a melhoria da qualidade dos corpos hídricos. Os dados espaciais indicam que as propriedades rurais cadastradas totalizam 151.644 hectares (1.516,44 km²), dos quais 4.312,95 hectares (43,13 km²) correspondem a APPs hídricas a recuperar, representando 2,84% da área total cadastrada (Figura 2). Esse passivo ambiental evidencia a necessidade de articular a recomposição de APPs às políticas de saneamento, com foco no controle de cargas difusas no meio rural. Nesse contexto, a disponibilidade de recursos da cobrança pelo uso da água torna o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) hídrico instrumento viável para induzir a recuperação ambiental e aprimorar a qualidade hídrica. Conforme verificado nos documentos técnicos da bacia publicados pela Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM/MG, 2024), embora os municípios possuam Planos Municipais de

Saneamento Básico (PMSB) formalmente instituídos conforme a Lei nº 11.445/2007, inclusive com apoio de programas do comitê de bacia e recursos da cobrança pelo uso da agua, não se observou atualização plena ou implementação efetiva desses instrumentos em conformidade com as diretrizes mais recentes da política nacional de saneamento Lei nº 14.026/2020.

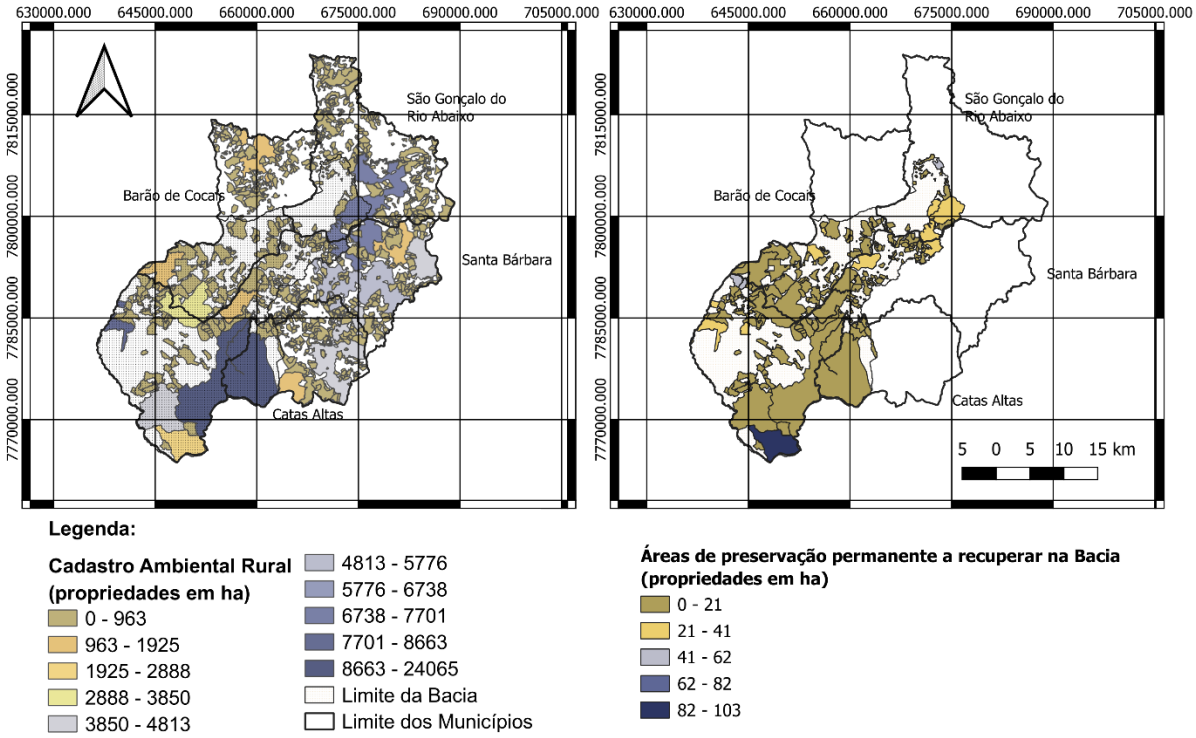


Figura 02: Mapa de caracterização das áreas rurais declaradas no CAR e Áreas de Preservação Permanente (APP) a serem recuperadas nas propriedades da bacia.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026) a partir dos dados obtidos pelo IDE-SISEMA/MG (2020; 2022; 2024).

Tal lacuna torna-se relevante quando se considera que relatórios internacionais apontam o lançamento de esgoto não tratado, o escoamento urbano e as atividades agropecuárias entre as principais causas de degradação da qualidade da agua em todo o mundo (UN-Water, 2011). Nesse contexto, a ausência de consolidação de ações e monitoramento dos sistemas de saneamento pode representar vetor significativo de pressão sobre os corpos hídricos da bacia, especialmente em território de predominância rural. Assim, a efetividade da recuperação das Áreas de Preservação Permanente (APPs), especialmente das matas ciliares, depende de sua integração com políticas e ações estruturadas de saneamento, de modo a garantir não apenas a recomposição vegetal, mas a proteção funcional da qualidade hídrica.

Considerações Finais

A sub-bacia hidrográfica do rio Santa Bárbara apresenta condições institucionais favoráveis à gestão integrada dos recursos hídricos, em razão do elevado percentual de propriedades rurais cadastradas no CAR e da inserção dos municípios no Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba, responsável pela gestão da sub-bacia, além da existência formal de Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB). O Comitê da Bacia do Rio Piracicaba realiza revisões periódicas dos instrumentos de planejamento de recursos hídricos, promovendo atualizações relevantes para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos. Contudo, observa-se que tais avanços não se refletem com a mesma intensidade no âmbito municipal. Ressalta-se que, no âmbito da revisão legislativa nacional, já tramitam projetos de lei que propõem a prorrogação dos prazos das metas de universalização dos serviços de saneamento de 2033 para o ano de 2040, o que evidencia instabilidade regulatória e pode gerar postergações adicionais na implementação das metas. Considerando a predominância territorial rural na sub-bacia, essa lacuna torna-se ainda mais sensível, uma vez que o saneamento rural tende a permanecer como componente secundarizado no planejamento local. Além disso, a simples previsão de recuperação de APPs, conforme o Código Florestal, não é suficiente se não estiver articulada às metas de saneamento. A recomposição de APPs deve ser acompanhada do controle das cargas poluidoras difusas, especialmente de efluentes domésticos em áreas rurais, para que a proteção dos corpos hídricos seja efetiva. Dessa forma, recomenda-se que a revisão e atualização dos PMSB ocorram de forma articulada ao planejamento da bacia, incorporando metas específicas para o saneamento rural e estratégias de proteção das APPs. Recomenda-se, ainda, que os municípios internalizem e operacionalizem as diretrizes estabelecidas pelo Comitê de Bacia, incorporando-as ao planejamento local como compromissos estruturantes de longo prazo, capazes de transcender ciclos eleitorais e divergências político-ideológicas. A implementação contínua dessas políticas no território rural tende a produzir reflexos positivos no âmbito urbano, promovendo melhoria progressiva da qualidade da água e maior segurança hídrica para toda a bacia.

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 cientificado aportado até o momento.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Brasília, DF: Presidência da República, 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 10 fev. 2026.

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. Brasília, DF: Presidência da República, 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 10 fev. 2026.

BRASIL. **Projeto de Lei nº 4.888/2024, que fixa o prazo de universalização do saneamento básico no país para o ano de 2040.** Câmara dos Deputados, 2024. Disponível em: https://www.camara.leg.br/noticias/1141067-PROJETO-PRORROGA-UNIVERSALIZACAO-DO-SANEAMENTO-BASICO-NO-PAIS-PARA-2040. Acesso em: 14 fev. 2026.

EMBRAPA. **Brasil em relevo: dados SRTM**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2000. Disponível em: https://www.relevobr.cnpm.embrapa.br. Acesso em: 10 fev. 2026.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). **Parecer Técnico nº 59/FEAM/URA LM – CAT/2024. Processo nº 1370.01.0008914/2021-55.** Belo Horizonte: FEAM, 2024. Disponível em: https://sistemas.meioambiente.mg.gov.br/licenciamento/uploads/WJH03bly1_HCWYJolx2rQH--tspo5gk7.pdf. Acesso em: 13 fev. 2026.

MAPBIOMAS. **Códigos da legenda da Coleção 10 – descrição da legenda e cores da transição** (2024). Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/download/codigo-de-legenda/. Acesso em: 10 fev. 2026.

PIROLI, E. L. **Bacias hidrográficas: definições e representação.** *In:* Água e bacias hidrográficas: planejamento, gestão e manejo para enfrentamento das crises hídricas [online]. São Paulo: Editora UNESP, 2022, pp. 43-62. ISBN: 978-65-5714-298-1. Disponível em: https://doi.org/10.7476/9786557142981.0004. Acesso em: 10 fev. 2026.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE MINAS GERAIS (SEMAD). **Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais (IDE-SISEMA/MG).** Belo Horizonte: SEMAD, 2020. Disponível em: https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br. Acesso em: 10 fev. 2026.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS – IDE-SISEMA/MG. **Percentual da população urbana do município atendida por tratamento de esgoto (2024).** Metadados geoespaciais. Disponível em: https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/6bd6eac2-1776-466d-8de9-2aeaaa44ea01. Acesso em: 10 fev. 2026.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS – IDE-SISEMA/MG. ***Bacia hidrográfica ottocodificada (2020).*** Metadados geoespaciais. Disponível em: https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/b594d15b-4be5-4ae5-b5d6-cb995bd66ca9. Acesso em: 10 fev. 2026.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS – IDE-SISEMA/MG. ***Hidrografia principal ottocodificada (2022).*** Metadados geoespaciais. Disponível em: https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/ebb215b7-10a5-481b-8cb2-823b4cf3d5e4. Acesso em: 10 fev. 2026.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS – IDE-SISEMA/MG. ***Imóveis para recomposição de APPs declarados no CAR (2024).*** Metadados geoespaciais. Disponível em: https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/16b1de8f-7f90-400f-8c8b-b9e1650ebd1b. Acesso em: 10 fev. 2026.

UN-Water. **Water Quality and Wastewater – Facts and Figures.** Relatório UN-Water. 2011. Disponível em: https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2018/10/WaterFacts_water_and_watewater_sep2018.pdf?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 12 fev. 2026.

AVALIAÇÃO DA IMPORTÂNCIA ECOSSISTÊMICA DOS SERVIÇOS DE SUPORTE NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITAJAÍ-MIRIM (SC)

1Ana Luisa Silva Donazzolo, 1Jullia Comicholi Jargas, 2Rodrigo Fortunato de Oliveira, 1,2Vivian de Mello Cionek

1 Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI, e-mail: analuisa1414@live.com; 2 Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI, e-mail: julliajargas@gmail.com; rodrigofortunato144@gmail.com; vivian.cionek@univali.br

Palavras-chave: Importância ecossistêmica, Serviços Ambientais, Geoprocessamento, Uso e Ocupação do Solo.

Introdução

Os serviços ecossistêmicos correspondem aos benefícios diretos e indiretos gerados pelos ecossistemas, resultantes de processos ecológicos essenciais que sustentam a vida humana e os sistemas naturais (Daily; Farley et al., 2004), sendo reconhecidos desde a década de 1970 e consolidados pela Avaliação Ecossistêmica do Milênio, que os classificou em serviços de provisão, culturais, regulação e suporte (MEA, 2005). Os serviços ecossistêmicos de suporte compreendem processos fundamentais como a ciclagem de nutrientes, a formação e conservação do solo e a manutenção da biodiversidade, estando diretamente associados à preservação da vegetação nativa (MEA, 2005). Em bacias hidrográficas inseridas no bioma Mata Atlântica, como a do Rio Itajaí-Mirim, a substituição da vegetação natural por usos antrópicos tem intensificado a fragmentação da paisagem, reduzido a conectividade ecológica e comprometido a qualidade dos recursos hídricos, aumentando a vulnerabilidade ambiental (Bertoni, 2005).

Nesse contexto, a biodiversidade e os corredores ecológicos assumem papel central na regulação dos processos ecológicos, enquanto instrumentos de gestão territorial, como o Cadastro Ambiental Rural, subsidiam ações de monitoramento e políticas públicas de incentivo à conservação; entretanto, a provisão dos serviços ecossistêmicos na bacia ainda é pouco conhecida, evidenciando a necessidade de avaliações integradas que apoiem o planejamento ambiental e a definição de áreas prioritárias para conservação (BRASIL, 2012).

Material e Métodos

A área de estudo corresponde à Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí-Mirim, localizada no Vale do Itajaí, em Santa Catarina, com área aproximada de 1.677 km². Abrange os municípios de Gaspar, Ilhota, Guabiruba, Brusque, Camboriú, Itajaí, Vidal Ramos, Presidente Nereu e Botuverá que possuem diferentes vocações socioeconômicas, apresentando predominância de pequenas propriedades rurais e pertencem ao bioma Mata Atlântica, caracterizado por formações de Floresta Ombrófila Densa (EMBRAPA, 2004).

A aquisição dos dados foi realizada com base em técnicas de sensoriamento remoto e no uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Para isso, foram utilizadas bases cartográficas e dados ambientais disponíveis em plataformas públicas e institucionais (Oliveira et al., 2008).

A avaliação dos serviços ecossistêmicos de suporte foi realizada de forma integrada, considerando os critérios de vegetação nativa, conectividade ecológica e biodiversidade, conforme as diretrizes da Avaliação Ecossistêmica do Milênio e estudos correlatos (de Groot et al., 2002; MEA, 2005). A vegetação nativa foi quantificada a partir da proporção de remanescentes florestais em cada imóvel rural, a conectividade ecológica avaliada pela presença de fragmentos de vegetação nativa com área mínima de 1 hectare, representativos da formação de corredores ecológicos, e a biodiversidade analisada mediante o cruzamento dos limites dos imóveis com o mapeamento de Áreas Prioritárias para a Conservação da Biodiversidade. Os critérios foram ranqueados em escala de zero a cinco, com base em indicadores e coeficientes de ponderação previamente definidos para a bacia hidrográfica, permitindo uma avaliação sistemática e comparável da provisão dos serviços de suporte. A partir da integração das bases de dados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas, foi proposto o Índice de Importância Ecossistêmica (IIE), calculado por meio da média ponderada das notas atribuídas aos critérios de vegetação nativa, corredores ecológicos e biodiversidade, com pesos ajustáveis conforme a equação 01, possibilitando a classificação dos imóveis rurais segundo sua importância ecológica (Cartolano, 2023).

$$IIE\ Suporte = (Vegetação\ Nativa * 33) + (Corredores\ Ecológicos * 33) + (Biodiversidade * 33) \quad (01)$$

Resultados e Discussão

Os limites dos imóveis rurais da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí-Mirim foram obtidos a partir dos dados do Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural, totalizando 5.523 imóveis. A caracterização fundiária baseou-se no Módulo Fiscal, definido pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária como unidade agrária para classificação dos imóveis rurais (BRASIL, 1979), o qual corresponde predominantemente a 12 ha na bacia, refletindo o predomínio de pequenas propriedades e da agricultura familiar (Tabela 01).

Tabela 01 - Classificação dos imóveis rurais dos municípios da BHRIM em relação ao tamanho de suas áreas.

Classe	Módulos Fiscais (MF)	Áreas equivalentes (ha)	Quantidade de CARs	%
Classe I	<1	<12	3186	57,70%
Classe II	1 - 4	12-48	1964	35,60%
Classe III	4 - 15	48-180	293	5,30%
Classe VI	>15	>180	80	1,40%

Observou-se a predominância de imóveis com elevados percentuais de cobertura vegetal, com destaque para 2.391 propriedades que apresentam mais de 50% de sua área ocupada por vegetação nativa, evidenciando um estado geral favorável de conservação, especialmente nas Classes de Módulo Fiscal I e II, as quais concentram a maior parte dos imóveis com maiores proporções de vegetação, reforçando o papel das pequenas propriedades na manutenção da cobertura vegetal da bacia (Tabela 02).

Em relação à conectividade ecológica, 3.939 imóveis apresentaram conexão com fragmentos de vegetação nativa com área igual ou superior a 1 ha, indicando potencial para a formação de corredores ecológicos. A maior concentração de imóveis conectados também ocorreu nas Classes de Módulo Fiscal I e II, enquanto 1.584 imóveis não apresentaram conectividade, sinalizando áreas onde a fragmentação da paisagem pode comprometer o fluxo gênico e a manutenção dos processos ecológicos associados aos serviços de suporte (Tabela 02).

No critério biodiversidade, os resultados indicaram predominância de áreas classificadas como de baixa prioridade para conservação, totalizando 3.674 imóveis, o que corresponde a cerca de 66% do total avaliado. As classes de média e alta prioridade somaram 746 e 565 imóveis, respectivamente, sendo que apenas 10,22% dos imóveis apresentaram alta prioridade para conservação, concentrando áreas de maior valor ecológico. Adicionalmente, 538 imóveis foram classificados como ausentes de prioridade, geralmente associados a áreas mais intensamente antropizadas. A distribuição desses indicadores em função do tamanho dos imóveis reforça a heterogeneidade ambiental da bacia e a influência do uso da terra sobre a provisão dos serviços ecossistêmicos de suporte (Tabela 02).

Tabela 02 – Classificação dos imóveis rurais da BHRIM segundo os indicadores de vegetação nativa, conectividade ecológica e biodiversidade, por classes de Módulo Fiscal.

Vegetação Nativa						
Notas	**Indicadores**	**Classe MF**				**Total Geral**
		I	**II**	**III**	**IV**	
5	> 50%	1035	1064	223	69	2391
4	20 - 50%	698	580	44	8	1330
3	10 - 20%	376	151	10	2	539
2	0 - 10%	480	126	13	1	620
0	0%	598	42	3	0	643
Corredores Ecológicos						
Notas	**Indicadores**	**I**	**II**	**III**	**IV**	**Total Geral**
5	Conectam	1716	1855	288	80	3939
0	Não se conectam	1471	108	5	0	1584
Biodiversidade						
Notas	**Indicadores**	**I**	**II**	**III**	**IV**	**Total Geral**
5	Alta prioridade	344	185	27	9	565
2	Média prioridade	530	166	41	9	746
1	Baixa prioridade	1862	1533	221	58	3674
0	Ausente	450	80	4	4	538

A análise integrada indicou que a provisão dos serviços ecossistêmicos de suportem está fortemente associada ao predomínio de pequenas propriedades rurais, que exercem papel relevante na manutenção da cobertura vegetal e da conectividade da paisagem. Conforme evidenciado no mapa de classificação dos imóveis rurais por classes fundiárias (Figura 01), observa-se

a concentração de imóveis das Classes I e II ao longo da bacia, bem como a distribuição espacial heterogênea das áreas com maior e menor importância ecológica. Contudo, a elevada ocorrência de áreas classificadas com baixa ou ausente prioridade para conservação da biodiversidade, especialmente nas porções mais antropizadas e urbanizadas da bacia, evidencia a pressão dos usos antrópicos sobre os ecossistemas naturais. Esse padrão reforça a necessidade de ações direcionadas à conservação e à restauração ambiental, sendo a abordagem integrada dos serviços ecossistêmicos de suporte um subsídio técnico relevante para o planejamento territorial e para a implementação de políticas públicas, como programas de Pagamento por Serviços Ambientais.

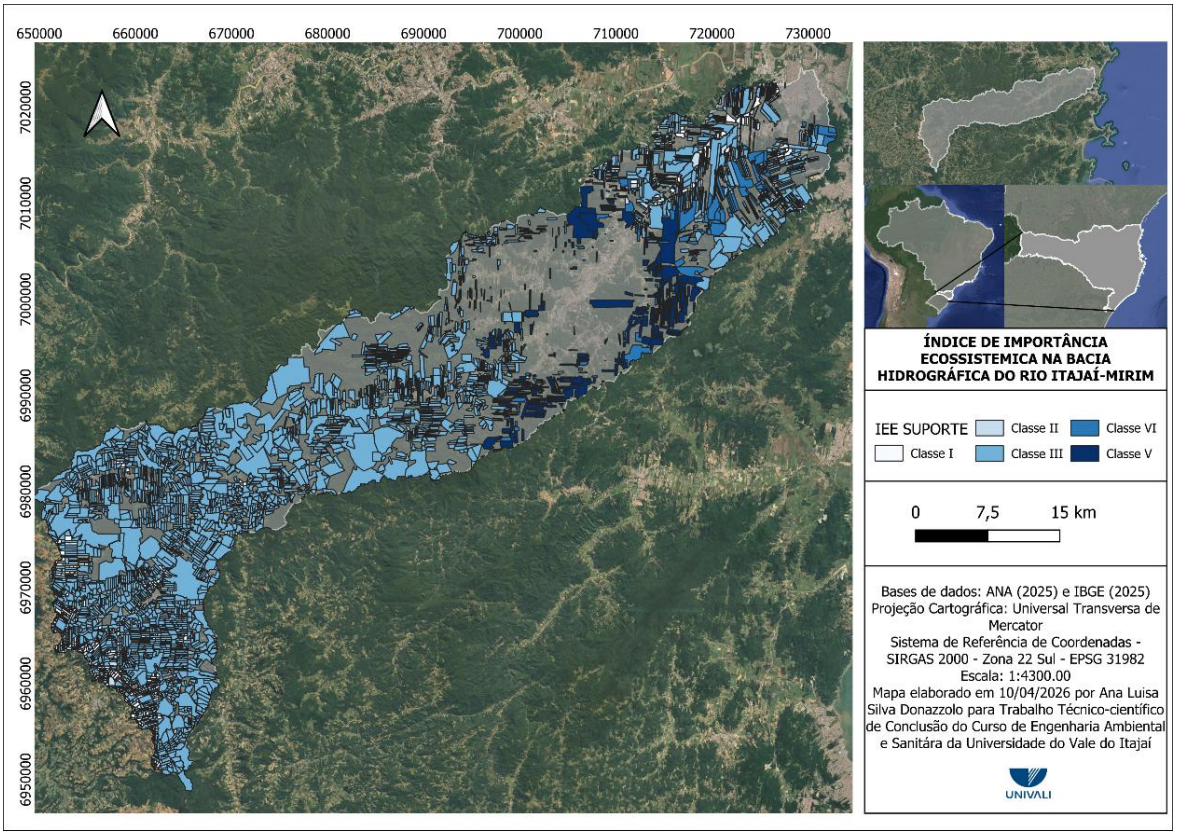


Figura 01 - Classificação dos imóveis em relação ao IIE de Suporte.
Fonte: Do autor (2026)

Considerações Finais

A aplicação do Índice de Importância Ecossistêmica (IIE) evidenciou diferenças significativas na provisão dos serviços ecossistêmicos de suporte na BHRIM, revelando que a manutenção da vegetação nativa, da conectividade e da biodiversidade não ocorre de forma homogênea na paisagem. Os resultados indicam que, embora uma parcela dos imóveis apresente elevados percentuais de cobertura vegetal, a fragmentação da paisagem e a predominância de áreas classificadas com baixa prioridade para conservação da biodiversidade indicam limitações na funcionalidade ecológica da bacia. Nesse contexto, o IIE mostrou-se uma ferramenta relevante para hierarquizar áreas segundo sua importância ecológica, permitindo identificar imóveis e regiões estratégicas que demandam ações prioritárias de conservação e restruturação, especialmente no âmbito da gestão territorial e do direcionamento de programas de Pagamento por Serviços Ambientais.

Agradecimentos

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pelo apoio financeiro concedido por meio do financiamento TO 2024TR001778, que possibilitou a realização deste estudo.

Referências Bibliográficas

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. 6. ed. São Paulo: Ícone, 2008.

BRASIL. Lei nº 6.746, de 10 de dezembro de 1979. Dispõe sobre o Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural e define critérios para a fixação do módulo fiscal. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 11 dez. 1979.

BRASIL. Decreto nº 7.830, de 17 de outubro de 2012. Dispõe sobre o Sistema de Cadastro Ambiental Rural, o Cadastro Ambiental Rural, estabelece normas de caráter geral aos Programas de Regularização Ambiental, de que trata a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 18 out. 2012.

CARTOLANO, Rafael Torres. Pagamento por serviços ambientais: uma metodologia para identificação de imóveis rurais com potencial para prestação de serviços ecossistêmicos. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2023.

DAILY, G. C.; FARLEY, J. Ecosystem services: from theory to implementation. Washington, DC: Island Press, 2004.

EMBRAPA. Brasil em relevo: dados SRTM. Brasília, DF: Embrapa, 2004.

DE GROOT, R. S.; WILSON, M. A.; BOUMANS, R. M. J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. Ecological Economics, v. 41, n. 3, p. 393–408, 2002.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis. Washington, DC: World Resources Institute, 2005.

OLIVEIRA, S. N. de; SILVA, A. M. da; SOUZA, A. M. de. Aplicação do sensoriamento remoto e do sistema de informações.

ANÁLISE DA IMPLEMENTAÇÃO DAS METAS VI E VII DO PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE SANTA CATARINA

1 Gisele de Souza Mori, 2 Vinícius Tavares Constante

1 Secretaria de Estado do Meio Ambiente e da Economia Verde, e-mail: gisele.mori@semae.sc.gov.br; 2 Secretaria de Estado do Meio Ambiente e da Economia Verde, e-mail: vinicius.constante@semae.sc.gov.br;

Palavras-chave: Metas do Plano Estadual de Recursos hídricos; Outorga de Direito de Uso dos Recursos Hídricos; Vazão Outorgada

Introdução

A gestão dos recursos hídricos deve considerar, de forma integrada, aspectos econômicos, sociais e ambientais, visando garantir a sustentabilidade dos usos múltiplos da água. No Brasil, essa gestão foi instituída pela Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei Federal nº 9.433/1997), e, em Santa Catarina, pela Lei Estadual nº 9.748/1994, que estabelece fundamentos, diretrizes, instrumentos e a estrutura de governança do setor.

O uso inadequado dos recursos hídricos pode gerar conflitos entre diferentes setores usuários. Nesse contexto, o planejamento das bacias hidrográficas é essencial para subsidiar a gestão e mediar esses conflitos.

O Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina (PERH/SC) constitui o principal instrumento de planejamento da gestão hídrica no Estado, orientando a utilização sustentável, a preservação e a disponibilidade dos recursos hídricos.

Concluído em 2017 e oficializado em 2018, o PERH/SC estabelece quatro objetivos e nove metas a serem alcançadas até 2027, visando garantir a disponibilidade hídrica para as gerações atuais e futuras.

Duas destas metas estão relacionadas a implementação da outorga de direito de uso dos recursos hídricos, instrumento fundamental para garantir que o uso desse recurso finito seja sustentável, legal e equilibrado entre todos os setores da sociedade. A consolidação de base de dados confiáveis é fundamental para o acompanhamento das metas e alavancar ações estratégicas para ampliar a gestão de recursos hídricos, buscando garantir o atendimento de usos para a atual e futuras gerações.

Material e Métodos

Os dados utilizados são provenientes do Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNARH) e do Sistema de Outorga de Santa Catarina (SIOUT-SC), o primeiro gerido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA em conjunto com os órgãos gestores estaduais e distrital, e o segundo pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e da Economia Verde (SEMAE). O período de análise compreende dados disponíveis até dezembro de 2025.

Foram analisadas as metas VI (outorgar pelo menos 50% dos usuários até 2027) e VII (outorgar pelo menos 80% da vazão outorgável até 2027) do PERH/SC, conforme apresentado na Figura 01.



Figura 01: Metas gerais do PERH/SC.
Fonte: Santa Catarina (2018, p. 55)

A avaliação foi realizada por meio de dois indicadores: (i) proporção de usuários regularizados em relação ao total estimado e (ii) relação entre vazões outorgadas e vazões outorgáveis.

Para a análise da relação entre vazões outorgadas e vazões outorgáveis foi utilizada a planilha de dados provenientes do CNARH para auxiliar no monitoramento das metas do PERH e a comparada com a base de dados (conforme a Figura 35 - Mapa Síntese do Diagnóstico dos Recursos Hídricos de Santa Catarina do Relatório Síntese do PERH - pág. 39 e dados do CNARH).

O primeiro indicador foi analisado por Região Hidrográfica, com distinção entre captações superficiais e subterrâneas.

Resultados e Discussão

As metas analisadas visam ampliar a implementação do instrumento de outorga, tanto em relação ao número de usuários regularizados quanto à vazão outorgada.

Atualmente, não há uma base consolidada que permita identificar com precisão o número total de usuários de recursos hídricos no Estado, o que limita a aferição direta do cumprimento da Meta VI. Estima-se, entretanto, a existência de mais de 500 mil usuários, dos quais 20.716 encontram-se regularizados, conforme dados do CNARH (ANA, 2026), representando aproximadamente 4,14%. Esse resultado evidencia um baixo nível de regularização, indicando a necessidade de fortalecimento das políticas públicas voltadas à ampliação do cadastro e da outorga.

Considerando que grande parte dos usuários possui captações de baixa vazão, a análise baseada em volumes outorgados pode ser mais representativa do que aquela baseada exclusivamente no número de usuários. Outro aspecto importante é a distribuição no território, portanto, a avaliação das vazões já regularizadas por região hidrográfica pode identificar regiões onde é necessário ampliar esforços de implementação do instrumento.

Nessa linha, foi utilizada a planilha de dados provenientes do CNARH para auxiliar no monitoramento das metas do PERH e a partir da base de dados (conforme a Figura 35 - Mapa Síntese do Diagnóstico dos Recursos Hídricos de Santa Catarina do Relatório Síntese do PERH - pág. 39 e dados do CNARH) foi possível calcular o indicador na forma percentual da vazão regularizada em relação à vazão de demanda estimada no PERH, para captações superficiais em operação, por Região Hidrográfica (RH), conforme apresentado abaixo:

Tabela 01: % Vazão regularizada em relação à estimada no PERH.
Fonte: Elaboração própria (2026)

RH	Bacias	Vazões Outorgadas CNARH (m³/s)	vazão de retirada PERH (m³/s)	% Vazão regularizada em relação à estimada no PERH
1	Antas	0,32	2,00	15,95%
2	Chapecó	3,98	4,00	99,60%
3	Peixe e Jacutinga	4,28	3,00	142,68%
4	Canoas	0,52	4,00	12,89%
5	Canoinhas	0,04	3,00	1,44%
6	Cubatão e Itapocu	7,58	12,00	63,15%
7	Itajaí	4,41	18,00	24,50%
8	Tijucas, Biguaçu, Cubatão Sul e Madre + Ilha	0,98	10,00	9,78%
9	Tubarão	2,04	7,00	29,11%
10	Araranguá e Urussanga	2,55	26,00	9,80%

No consolidado estadual, o percentual da vazão regularizada em função da vazão de demanda estimada para águas superficiais é de **29,99%**.

Para a Meta VII, o indicador foi calculado com base na relação entre vazão outorgada e vazão outorgável (disponibilidade hídrica passível de outorga), conforme definido no PERH. Foi diferenciada a demanda e disponibilidade superficial da subterrânea.

Tabela 02: disponibilidade hídrica e vazões outorgáveis.
Fonte: Elaboração própria (2026)

RH	Bacias	Q90	Q95	Q98	50%Q90	50Q95	50Q98
1	Antas	28,3	19,5	12,4	14,15	9,75	6,2
2	Chapecó	82,5	64,2	45,9	41,25	32,1	22,95
3	Peixe e Jacutinga	45,3	34,6	23,8	22,65	17,3	11,9
4	Canoas	146,9	109,5	74,1	73,45	54,75	37,05
5	Canoinhas	63,4	50,1	37,8	31,7	25,05	18,9
6	Cubatão e Itapocu	58,7	47,2	37,3	29,35	23,6	18,65
7	Itajaí	129,7	99,9	70,1	64,85	49,95	35,05
8	Tijucas, Biguaçu, Cubatão Sul e Madre + Ilha	64,0	53,2	43,7	32	26,6	21,85
9	Tubarão	64,3	50,7	38,9	32,15	25,35	19,45
10	Araranguá e Urussanga	37,6	25,3	16,3	18,8	12,65	8,15

A partir da base de dados (conforme Tabela 1 - Disponibilidade hídrica superficial do Relatório Síntese do PERH - pág. 23 e dados do CNARH) obteve-se os seguintes percentuais de atendimento por Região Hidrográfica (RH) para as águas superficiais:

RH	Bacias	Vazões Outorgadas CNARH (m³/s)	% de atendimento em função das vazões superficiais outorgadas
1	Antas	0,32	3,27%
2	Chapecó	3,98	17,36%
3	Peixe e Jacutinga	4,28	35,97%
4	Canoas	0,52	1,39%
5	Canoinhas	0,04	0,23%
6	Cubatão e Itapocu	7,58	25,82%
7	Itajaí	4,41	12,58%
8	Tijucas, Biguaçu, Cubatão Sul e Madre + Ilha	0,98	4,47%
9	Tubarão	2,04	10,48%
10	Araranguá e Urussanga	2,55	13,56%

Tabela 03: Percentual de atendimento em função das vazões superficiais em operação.
Fonte: Elaboração própria (2026)

No consolidado estadual, o percentual apurado para águas superficiais é de 11,86%. Esses resultados indicam que o Estado ainda se encontra distante do cumprimento da meta estabelecida que foi o 80% da vazão outorgável, evidenciando a necessidade de aprimoramento dos processos de regularização e de gestão da disponibilidade hídrica superficial.

Quanto às águas subterrâneas, os valores de vazão disponível por aquífero são mais difíceis de aferir. Atualmente utilizamos nos processos de outorga parâmetros de produtividade dos poços. Não obstante, seguem os dados de demanda subterrânea já regularizadas por Região Hidrográfica:

RH 1 – Extremo Oeste: 1,2014 m³/s
RH 2 – Meio Oeste: 3,9085 m³/s
RH 3 – Vale do Rio do Peixe: 2,9212 m³/s
RH 4 – Planalto de Lages: 7,0670 m³/s
RH 5 – Planalto de Canoinhas: 0,0590 m³/s
RH 6 – Baixada Norte: 0,4085 m³/s
RH 7 – Vale do Itajaí: 0,5572 m³/s
RH 8 – Litoral Centro: 4,1068 m³/s
RH 9 – Sul Catarinense: 6,3521 m³/s
RH 10 – Extremo Sul Catarinense: 0,1978 m³/s

Assim, a vazão total regularizada da demanda subterrânea é de 26,7796 m³/s. Contudo, atualmente não conseguimos aferir o quanto isso representa em relação à vazão outorgável subterrânea.

Considerações Finais

Os resultados obtidos evidenciam que, embora tenham ocorrido avanços na implementação do instrumento de outorga no Estado de Santa Catarina, os níveis atuais de regularização ainda estão distantes das metas estabelecidas pelo PERH/SC, especialmente no que se refere à proporção de usuários regularizados e à vazão outorgada. Considerando que já estamos próximos do prazo de 2027, observa-se que as metas provavelmente não serão atingidas.

A ausência de uma base de dados consolidada sobre o total de usuários de recursos hídricos representa uma limitação relevante para o monitoramento da Meta VI, indicando a necessidade de investimentos na melhoria dos sistemas de informação, inclusive com painéis interativos para o melhor acompanhamento da implementação do instrumento.

No que se refere à Meta VII, os baixos percentuais de vazão outorgada em relação à vazão outorgável demonstram que ainda há um amplo potencial para expansão da gestão por meio da outorga, especialmente em regiões com menor nível de regularização.

Destaca-se, ainda, a dificuldade de avaliação das águas subterrâneas, em função da limitação de dados sobre a disponibilidade hídrica, o que reforça a importância do aprimoramento dos estudos hidrogeológicos no Estado.

Observa-se que as metas VI e VII estão centradas na outorga de captação, ou seja, nos aspectos de regulação quantitativa dos recursos hídricos. Nesse sentido, para aprimorar o monitoramento e ampliar o alcance dessas metas, recomenda-se a incorporação de indicadores relacionados à outorga para a diluição de efluentes, de modo a contemplar a dimensão qualitativa dos recursos hídricos.

Por fim, os resultados reforçam a importância do fortalecimento institucional, da ampliação do cadastro de usuários e da melhoria dos instrumentos de gestão, como estratégias essenciais para o cumprimento das metas do PERH/SC e para a promoção do uso sustentável dos recursos hídricos.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos - CNARH Brasília: ANA. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/. Acesso em: 136 março 2026.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 389, 9 jan. 1997. Disponível em: planalto.gov.br. Acesso em: 16 março 2026.

Documento Síntese do Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH, 2018),disponível em: https://www.aguas.sc.gov.br, Acesso em: 16 março 2026.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável. PERSH-SC: Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina: documento síntese. Florianópolis: SDS, 2018. 66 p. Disponível em: https://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHRI/Plano%20Estadual/Documento%20Sintese/documento_sintese_do_plano_2018-03-15.pdf. Acesso em: 23 abr. 2026. A indicação para citação no corpo do texto é (SANTA CATARINA, 2018).

SANTA CATARINA. Lei nº 9.748, de 30 de novembro de 1994. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e dá outras providências. Diário Oficial do Estado de Santa Catarina, Florianópolis, 06 dez. 1994. Disponível em: https://leis.alesc.sc.gov.br/ato-normativo/11221. Acesso em: 16 março 2026.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDE). SIOUT-SC: Sistema de Outorga da Água de Santa Catarina. Florianópolis: SDE/SEMAE. Disponível em: aguas.sc.gov.br.Acesso em: 16 março 2026.

PROJETO: "COBRANÇA PELO USO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO ESTADO DE SANTA CATARINA, METODOLOGIAS E ASPECTOS OPERACIONAIS"

1 Jairo Marchesan, 2 Eduardo Lando Bernardo, 3 Rafael Leão, 4 Vilmar Comassetto, 5 Caroline Brocardo, 6 André Leão

1 Universidade do Contestado (UNC), e-mail: jairo@unc.br; 2 Universidade do Contestado (UNC), e-mail: eduardolbernardo@gmail.com; 3 Universidade do Contestado (UNC), e-mail: eng.rafaelleao@gmail.com; 4 Universidade do Contestado (UNC), e-mail: vcomassetto@yahoo.com.br; 5 Universidade do Contestado (UNC), e-mail: carolineebrocardo@gmail.com; Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), e-mail: engenheiro.andreleao@gmail.com.

Palavras-chave: Instrumentos de Gestão; Cobrança; Recursos Hídricos

Introdução

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei Federal nº 9.433/97 (Lei das Águas), traz em seus princípios, a água como um recurso natural limitado, de domínio público, de valor econômico criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) estabeleceu os seguintes instrumentos de gestão dos recursos hídricos: plano de recursos hídricos, enquadramento dos corpos d'água em classes, outorga dos direitos de uso de recursos hídricos, cobrança pelo uso de recursos hídricos e sistema de informações sobre recursos hídricos. No Capítulo I, nos Fundamentos da Lei 9.433/97, o artigo 1º consta: "A Política Nacional de Recursos Hídricos baseia-se nos seguintes fundamentos: I – a água é um bem de domínio público; II – a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico; III – em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais; IV – a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas". A Lei nº 9.984/2000 constituiu a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), órgão responsável pela implementação da PNRH. No Capítulo I, nos Fundamentos da Lei 9.433/97, o artigo 1º consta: "A Política Nacional de Recursos Hídricos baseia-se nos seguintes fundamentos: I – a água é um bem de domínio público; II – a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico; III – em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais; IV – a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas". Segundo ANA (2014), "a cobrança pelo uso da água é um dos instrumentos de gestão de recursos hídricos, essencial para criar as condições de equilíbrio entre a oferta (disponibilidade de água) e a demanda, promovendo a harmonia entre os usuários, ao mesmo tempo em que também promove a redistribuição dos custos sociais, a melhoria da qualidade dos efluentes lançados nos corpos hídricos, além de possibilitar a formação de fundos financeiros para as obras, programas e intervenções para melhoria das condições ambientais da bacia". Nesta direção, a cobrança pode ser entendida como um instrumento disciplinador e educador, que reconhece a água como um bem econômico, oferecendo ao usuário uma indicação do seu valor, incentivando o uso racional e proporcionando recursos financeiros para a execução de programas e intervenções na bacia hidrográfica, conforme estabelecido nos Planos de Recursos Hídricos. No Estado de Santa Catarina, a Lei nº 9.748/1994, instituiu a Política Estadual de Recursos Hídricos que também reconhece a água como bem público de valor económico, prevê sua adoção segundo as peculiaridades de cada bacia hidrográfica, indicando que sua regulamentação compete ao Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH). De acordo com a Meta VI do Objetivo Estratégico IV do Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH (2017) do Estado de Santa Catarina, a cobrança pelo uso dos recursos hídricos deve ser implementada, em escala piloto, em pelo menos uma das bacias hidrográficas do Estado até 2027, para que sejam avaliadas as condições de aplicação desse instrumento no Estado, posteriormente. Para atender a demanda e viabilizar esse objetivo de prever a futura implementação do instrumento, em junho de 2024, a Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de Santa Catarina (FAPESC), lançou a Chamada Pública nº. 32/2024 - Programa Gestão e Regulação dos Recursos Hídricos em Santa Catarina. A Universidade do Contestado (UNC) candidatou-se à referida Chamada e venceu a proposta com o Projeto: "A cobrança pelo uso de recursos hídricos no Estado de Santa Catarina: metodologias e aspectos operacionais". O Projeto de pesquisa tem duração de vinte e quatro meses, iniciado em fevereiro de 2025 e apresenta por objetivo geral elaborar estudos e metodologias para subsidiar o Estado de Santa Catarina no processo de implementação da cobrança pelo uso de recursos hídricos.

Material de Métodos

A abordagem metodológica do projeto é caracterizada por uma natureza técnico-científica e integradora, fundamentada nos marcos legais das PNRH (Lei nº 9.433/1997) e PERH (Lei nº 9.748/1994). A proposta adota uma visão holística que combina levantamentos quantitativos, simulações econômico-financeiras e processos participativos junto aos 16 Comitês de Bacias Hidrográficas (CBHs) de Santa Catarina. A execução ocorre em uma rede de cooperação interinstitucional envolvendo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a Secretaria de Estado do Meio Ambiente e da Economia Verde (SEMAE), o Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH/SC) e os Comitês de Bacia Hidrográfica CBHs, o que assegura a legitimidade técnica e institucional das proposições. A metodologia está estruturada em etapas sequenciais e interdependentes que incluem: Sistematização de dados: Levantamento e consolidação de dados de vazão requerida ano base 2024, integrando as bases do

Sistema Integrado de Gestão de Outorgas (SIOUT) e do Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNARH); Análise de Experiências e Percepção com a Realização de um levantamento sistemático de experiências nacionais de cobrança e identificação da percepção dos atores locais sobre o instrumento; Simulação e Validação com o Desenvolvimento de simulações para estabelecer mecanismos e Preços Públicos Unitários (PPU) viáveis economicamente para as diferentes Unidades de Planejamento e Gestão (UPGs), seguido pela validação dessas propostas junto aos Comitês. Outra etapa prevê a Proposição Normativa com a Elaboração de minutas de normativos e definições de aspectos operacionais para a efetiva implementação da cobrança no Estado. Essa estratégia metodológica visa não apenas o levantamento de dados técnicos, mas também a democratização do conhecimento e a participação dos membros dos CBH em todos os processos, garantindo que as metodologias reflitam as realidades regionais catarinenses.

Resultados e Discussão

Considerando que o projeto se encontra em fase de desenvolvimento, inicialmente o estudo concentrou-se na sistematização e consistência da base de dados de outorgas e cadastros de Santa Catarina, integrando os sistemas SIOUT e CNARH com ano base 2024. Os resultados indicam que a vazão total de captação outorgada em território catarinense atinge 163,7 m³/s. Em uma análise setorial agregada, observa-se que a irrigação é o setor predominante em volume, sendo responsável por 43,1% da vazão total outorgada, seguida pelo abastecimento público, que representa 20,1%. Embora o setor de criação animal detenha a maior quantidade de outorgas no estado (48,8% dos registros), sua participação na vazão total é de 13,6%, enquanto a indústria responde por 12,1%. Os demais setores, como aquicultura e mineração, somam 11% da demanda. Adicionalmente, a aplicação do Princípio de Pareto revela que apenas 20% dos usuários outorgados (2.367 registros) concentram 80% do volume total de captação. Este diagnóstico demonstra que a demanda hídrica em Santa Catarina é tracionada majoritariamente pelas atividades agropecuárias e pelo abastecimento humano, fornecendo a base técnica necessária para a proposição de mecanismos de cobrança e definição de Preços Públicos Unitários condizentes com a realidade estadual. Além disso, foram sistematizadas as discussões do instrumento da cobrança nos Planos de Recursos Hídricos (PRH) de cada bacia hidrográfica e no Plano Estadual (PERH/SC). Os resultados agregados revelam um cenário de heterogeneidade: embora a maioria das bacias hidrográficas possua planos de recursos hídricos concluídos, a previsão de mecanismos e valores específicos para a cobrança é variável. Identificou-se que planos mais antigos (publicados a aproximadamente 15 anos atrás) ou em processo de atualização carecem de mecanismos operacionais detalhados, enquanto bacias com maior conflito pelo uso da água apresentam propostas mais robustas. De forma geral, o PERH/SC atua como o eixo norteador, estabelecendo que a cobrança deve ser implementada de forma progressiva e integrada aos demais instrumentos de gestão, como a outorga e o enquadramento. A análise consolidada indica que a estruturação de um modelo estadual de cobrança exige a harmonização dessas diretrizes locais com parâmetros nacionais, garantindo que o instrumento cumpra sua função de incentivar a racionalização do uso e viabilizar os investimentos necessários para a segurança hídrica em Santa Catarina, bem como se arrecade recursos financeiros para a criação e mantenimento de Entidades Delegatárias. Concomitantemente, foram realizadas visitas técnicas a experiências práticas, assim contemplaram-se os órgãos gestores e entidades fundamentais no cenário nacional, incluindo o Instituto Estadual do Ambiente (INEA-RJ), AGEVAP e Consórcio Ambiental Intermunicipal Lagos São João, no Rio de Janeiro; a ADASA no Distrito Federal; a Fundação Agência das Bacias PCJ em Piracicaba/SP; além do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM-MG), CBH Grande em Poços de Caldas/MG e Agência Peixe Vivo em Belo Horizonte/MG. Adicionalmente, foram realizadas reuniões na sede da (ANA). As percepções coletadas revelam que o sucesso da cobrança nestas regiões não decorreu de uma imposição, mas da consolidação de um "pacto social" tripartite entre o poder público, os setores usuários e a sociedade civil, o que confere legitimidade ao instrumento. Observou-se uma transição clara do caráter meramente arrecadatório para um modelo indutor de comportamento, onde a cobrança estimula a eficiência no uso da água. A transparência na aplicação descentralizada dos recursos, com o financiamento de projetos estruturais de saneamento e recuperação ambiental que retornam benefícios tangíveis aos usuários, foi identificada como o principal pilar de sustentação do sistema. Embora existam diferentes fórmulas de cálculo e valores dos Preços Públicos Unitários (PPU) para se adaptarem às realidades econômicas regionais, há um consenso sobre a necessidade de modelos administrativos enxutos e do protagonismo dos Comitês de Bacia na gestão, pautada nos objetivos dos Planos de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas. Notou-se, ainda, que a aceitação do instrumento é mais complexa em alguns setores, exigindo elasticidade metodológica e uma implementação gradual. Em suma, a percepção comum entre as entidades visitadas é que a existência da cobrança é o que efetivamente viabiliza a gestão dos recursos hídricos e contribui com segurança hídrica nas bacias hidrográficas.

Considerações Finais

Preliminarmente, a análise integrada dos dados técnicos obtidos, normativos e das experiências interinstitucionais permitiu inferir que a possibilidade de implementação da cobrança pelo uso de recursos hídricos em Santa Catarina ultrapassa a esfera da arrecadação financeira, podendo consolidar-se como um instrumento estratégico de governança e sustentabilidade ambiental. A heterogeneidade identificada nos planos de recursos hídricos das bacias catarinenses reforça a necessidade de um modelo estadual que seja, ao mesmo tempo, padronizado em suas diretrizes gerais e flexível em suas aplicações locais. A transição para um sistema de cobrança eficaz exige a harmonização das normativas vigentes com as realidades econômicas regionais, garantindo que o instrumento atue como um indutor de boas práticas e racionalização do uso. As experiências exitosas observadas nos estados visitados (RJ, SP, MG e DF) demonstram que a legitimidade da cobrança não advém apenas da imposição legal, mas da construção de um sólido "pacto social" tripartite. A transparência na aplicação dos recursos e o retorno desses

valores em benefícios tangíveis para as próprias bacias são os pilares que transformam a percepção do usuário, que passa a ver a cobrança não como uma oneração, mas como um investimento em segurança hídrica. Portanto, com base no estudo realizado até o presente momento, os resultados sugerem que o sucesso da implementação em Santa Catarina dependerá da capacidade do Estado em manter o protagonismo dos Comitês de Bacia Hidrográfica e em adotar uma implementação gradual e pedagógica. O desenvolvimento de metodologias e Preços Públicos Unitários (PPUs) condizentes com a realidade local, aliado a modelos administrativos enxutos, é o caminho para viabilizar a gestão eficiente dos recursos hídricos, garantindo a disponibilidade de água em quantidade e qualidade para os usos múltiplos das atuais e futuras gerações catarinenses.

Agradecimentos

Os Autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (Fapesc) e à Universidade do Contestado (UNC) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ANA. Lista de termos para o Thesaurus de Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas (ANA). Brasília: ANA, 2014.

BRASIL. Lei Federal n. 9.433, Política Nacional de Recursos Hídricos. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 10/04/2026.

BRASIL. Lei Federal n. 9.984, Cria a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9984.htm. Acesso em: 10/04/2026.

SANTA CATARINA. Lei Estadual n. 9.748, Política Estadual de Recursos Hídricos. Disponível em: https://leis.alesc.sc.gov.br/ato-normativo/11221. Acesso em: 10/04/26.

SANTA CATARINA. Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH/SC (2017). Disponível em: https://www.aguas.sc.gov.br/base-documental/plano-estadulal-biblioteca. Acesso em: 10/04/2026.

IMPLANTAÇÃO DE UNIDADE DEMONSTRATIVA DE IRRIGAÇÃO DA EMATER-DF

1 Anne Caroline Lobo Borges, 2 Icléa Almeida de Queirós Silva, 3 Antonio Dantas Costa Junior, 4 Arnaldo Augusto da Silveira, 5 Edvan Sousa Ribeiro, 6 José Voltaire Brito Peixoto

1 Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural, e-mail: anne.borges@emater.df.gov.br; 2 Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural, e-mail: iclea.silva@emater.df.gov.br; 3 Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural, e-mail: antonio.dantas@emater.df.gov.br; 4 Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural, e-mail: arnaldo.silveira@emater.df.gov.br; 5 Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural, e-mail: edvan.ribeiro@emater.df.gov.br; 6 Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural, e-mail: jose.peixoto@emater.df.gov.br

Palavras-chave: Unidade Demonstrativa, Irrigação, Recursos Hídricos

Introdução

O Programa Produtor de Água, instituído pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) em 2001, tem como objetivo promover a revitalização ambiental de bacias hidrográficas por meio da implementação de ações em áreas voluntariamente disponibilizadas por produtores rurais. Esses produtores passam a ser reconhecidos como "produtores de água" e são contemplados com mecanismos de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). As intervenções incluem a adoção de práticas conservacionistas de solo, construção de terraços, diversificação produtiva por meio de sistemas agroecológicos, orgânicos ou agroflorestais, adequação de estradas com técnicas como barraginhas, além de ações de reflorestamento e proteção de Áreas de Preservação Permanente (APP) e da vegetação nativa. Tais medidas visam ampliar a infiltração de água no solo, favorecer a recarga do lençol freático e mitigar processos de erosão, assoreamento e escoamento superficial, contribuindo para a melhoria da qualidade e da disponibilidade hídrica.

No Distrito Federal, o Projeto Produtor de Água no Descoberto (PPAD), lançado em 2019 e coordenado por uma Unidade de Gestão de Projeto (UGP) composta por diversas instituições, surge como resposta ao avanço da degradação ambiental na bacia do Alto Rio Descoberto. Trata-se de uma região estratégica para a segurança hídrica e alimentar do Distrito Federal e do estado de Goiás, responsável por aproximadamente 60% do abastecimento hídrico do DF. A bacia enfrenta pressões decorrentes da expansão urbana, do desmatamento e do uso intensivo dos recursos hídricos. Nesse contexto, o projeto tem como finalidade ampliar a infiltração e o armazenamento de água, reduzir os impactos da variabilidade climática e fortalecer a recarga de solos, aquíferos e reservatórios, visando à preservação da bacia e à sua consolidação como referência na produção sustentável de água e alimentos. Para tanto, são desenvolvidas ações integradas de conservação ambiental, regularização, educação, pesquisa e incentivo à adoção de boas práticas agropecuárias.

A estratégia de implementação na Bacia do Alto Descoberto fundamenta-se na metodologia de Unidades Demonstrativas (UD), amplamente empregada na extensão rural. Nesse contexto, foram selecionados produtores rurais para a implantação de Unidades Demonstrativas de Irrigação (UDIs), mediante celebração de Termo de Cooperação Técnica com a Emater-DF, no âmbito do convênio firmado entre a ANA e a Emater-DF. As UDIs possibilitam a aplicação prática de tecnologias, aliada ao acompanhamento técnico contínuo, permitindo a avaliação integrada de resultados sociais, econômicos e ambientais. Estruturadas como propriedades-referência, essas unidades atuam como vitrines tecnológicas e espaços de aprendizagem, promovendo a difusão de práticas eficientes de manejo hídrico, incentivando a adoção de soluções sustentáveis por outros produtores e contribuindo para a racionalização do uso da água e o fortalecimento da sustentabilidade produtiva e ambiental na região.

Diante desse cenário, após a publicação do Edital de Chamamento Público da Emater-DF nº 001/2023, em agosto de 2025, foi implantada, na área de atuação do Escritório Local de Alexandre de Gusmão, a primeira Unidade Demonstrativa de Irrigação, consolidando-se como um marco na trajetória institucional. Mais do que uma entrega técnica, essa iniciativa representa a convergência entre inovação, sustentabilidade e compromisso com o produtor rural, configurando um avanço relevante na promoção do uso eficiente da água na agricultura. Ao longo de seus 48 anos de atuação, a Emater-DF reafirma, por meio dessa ação, seu protagonismo na extensão rural, ao transformar conhecimento técnico em prática aplicada, fortalecendo a resiliência dos sistemas produtivos e estabelecendo um novo referencial para ações integradas de conservação de água e solo no Distrito Federal.

Material e Métodos

As Unidades Demonstrativas de Irrigação (UDIs) têm como finalidade promover, em condições reais de campo, a adoção de tecnologias e práticas mais eficientes de manejo hídrico na agricultura, visando à otimização do uso da água, à redução de perdas e ao aumento da sustentabilidade dos sistemas produtivos.

A UDI disponibilizada ao produtor rural pela Emater-DF, no âmbito do Convênio nº 922525/2021, firmado com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), é composta pelos seguintes itens:

ITENS	DESCRIÇÃO	QUANTIDADE
Revestimento de Reservatório de Água	Lona plástica do tipo geomenbrana PEAD	150 m^2
Equipamentos para a leitura da umidade do solo	Kit Tensímetro digital de agulha, tensiômetro de punção de 20 cm e tensiômetro de punção de 40cm. Cada Kit deverá ser composto 01 tensímetro digital de agulha, 06 tensiômetro de punção de 20 cm de comprimento e 06 tensiômetro de punção de 40 cm de comprimento.	1 Kit
Medidores de Consumo de Água Bruta	Hidrômetro de Água Bruta	1 unidade
Captação de Água da Chuva	Instalação de kit de captação de água da chuva	200 m^2 (telhado)
Placas de Identificação	Placas de Identificação para ser instaladas na entrada do imóvel rural localizado em zona rural (área externa)	1 unidade

Tabela 01: Itens que compõem a Unidade Demonstrativa de Irrigação (UDI).
Fonte: Emater-DF (2025).

O investimento estimado para implantação da UDI é de R$ 20.200,00 (vinte mil e duzentos reais). Além do fornecimento dos equipamentos, o produtor rural contemplado recebe assistência técnica quanto à instalação, operação e manejo dos dispositivos, prestada por extensionistas da Emater-DF e pelos fornecedores dos equipamentos.

Após a seleção da primeira Unidade Demonstrativa de Irrigação, o produtor rural foi formalmente notificado, sendo celebrado o Termo de Cooperação Técnica e o respectivo Plano de Trabalho junto à Emater-DF. A entrega dos equipamentos ocorreu em 12 de agosto de 2025, com a participação das equipes técnicas de escritório e de campo.



Figura 01: Entrega dos equipamentos da Unidade Demonstrativa de Irrigação (UDI) ao produtor rural.
Fonte: Emater-DF (2025).

A partir da entrega e implantação, o produtor assumiu a responsabilidade pela adequada operação, guarda e manutenção dos bens recebidos, comprometendo-se a mantê-los em condições adequadas de uso, conservação e limpeza, conforme orientações técnicas da Emater-DF e disposições estabelecidas nos termos de responsabilidade.

As atividades relacionadas à implantação da Unidade Demonstrativa de Irrigação foram conduzidas de forma integrada por uma equipe técnica composta por Agrônomos e Engenheiras Ambientais, abrangendo desde a articulação institucional até a execução e o acompanhamento das intervenções em campo.

Inicialmente, foram realizadas ações de articulação com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e definida a metodologia de implementação no âmbito do convênio ANA/Emater-DF. Em seguida, procedeu-se à seleção e aquisição dos equipamentos por meio de processo licitatório, bem como à elaboração e publicação do Edital de Chamamento Público, que subsidiou a seleção do produtor rural beneficiário. Paralelamente, foram conduzidas etapas de reconhecimento

preliminar da área com base em imagens de satélite, elaboração de mapas temáticos e realização de visitas técnicas contínuas voltadas ao planejamento e acompanhamento das ações.

Na etapa de execução, foram realizadas vistorias técnicas in loco, levantamento topográfico da área e análise da declividade do terreno, com o objetivo de subsidiar a definição do local mais adequado para a implantação do reservatório hídrico. A partir dessas informações, foram conduzidas a construção do reservatório e a execução das intervenções previstas, seguidas do acompanhamento técnico contínuo das estruturas implantadas, garantindo a conformidade das ações com os critérios técnicos estabelecidos e a adequada operacionalização da unidade.

Resultados e Discussão

A implantação da Unidade Demonstrativa de Irrigação resultou em avanços significativos no sistema produtivo da propriedade, especialmente no que se refere à eficiência do uso da água. A instalação de hidrômetro e de equipamentos para monitoramento da umidade do solo possibilitou maior controle do consumo hídrico, permitindo ao produtor ajustar o manejo da irrigação com base em dados técnicos, reduzindo desperdícios e promovendo maior precisão na aplicação de água. Adicionalmente, a construção de reservatório revestido com geomembrana contribuiu para o aumento da segurança hídrica da propriedade, assegurando maior estabilidade no abastecimento, sobretudo em períodos de menor disponibilidade.

Essas intervenções tem refletido diretamente na organização do sistema produtivo, promovendo maior racionalização dos insumos, redução de custos operacionais e incremento da sustentabilidade da produção. A adoção de práticas mais eficientes de manejo hídrico evidencia o potencial das tecnologias implementadas em promover ganhos simultâneos de ordem econômica e ambiental.



Figura 02: Comparativo entre o reservatório preexistente e o novo reservatório implantado.
Fonte: Emater-DF (2025).

No âmbito territorial, a propriedade apresenta elevado potencial de consolidação como unidade de referência, por se tratar da primeira UDI no contexto do Projeto Produtor de Água no Descoberto implantada pela Emater-DF. Nesse sentido, passa a desempenhar função estratégica como espaço demonstrativo, favorecendo a difusão de tecnologias e práticas sustentáveis entre produtores da região. A utilização da área para produção de conteúdo em formato de ensino a distância (EAD) amplia o alcance das ações, viabilizando a disseminação do conhecimento técnico gerado em campo de forma acessível e replicável.

Os resultados observados extrapolam os limites da propriedade, evidenciando impactos positivos nas dimensões ambiental, econômica e social. Destacam-se a redução do desperdício de água, a melhoria da produtividade e o fortalecimento da agricultura familiar. Além disso, o produtor assume papel relevante como agente multiplicador, estimulando a adoção de práticas sustentáveis por outros agricultores. Dessa forma, a iniciativa contribui de maneira efetiva para a conservação dos recursos hídricos e para o desenvolvimento rural sustentável na região.

Considerações Finais

A experiência decorrente da implantação da Unidade Demonstrativa de Irrigação evidencia elevado potencial de replicabilidade, uma vez que se baseia em metodologia simples, prática e adaptável a diferentes contextos produtivos. Como continuidade da iniciativa, está prevista a implantação de mais seis unidades ao longo de 2026, ampliando o alcance das ações na bacia do Alto Rio Descoberto e fortalecendo o efeito multiplicador junto aos produtores rurais da região.

A metodologia adotada destaca-se pela capacidade de gerar resultados concretos em curto prazo, com impactos diretos na melhoria da eficiência do uso da água, no incremento da produtividade e na promoção da sustentabilidade dos sistemas produtivos. Adicionalmente, por se fundamentar na aprendizagem prática associada ao acompanhamento técnico contínuo, favorece a adoção das tecnologias por outros produtores, configurando-se como estratégia eficiente de difusão de boas práticas.

Ressalta-se, contudo, que cada propriedade rural apresenta especificidades relacionadas ao sistema produtivo, dimensão da área, condições topográficas, disponibilidade hídrica e nível tecnológico, o que demanda a elaboração de soluções individualizadas para a implantação das UDIs. Nesse contexto, os projetos são estruturados de forma a compatibilizar viabilidade técnica, econômica, social e ambiental, com ênfase no uso racional dos recursos hídricos.

O modelo adotado no âmbito do Programa Produtor de Água, coordenado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico e executado pela Emater-DF, demonstra eficiência na aplicação dos recursos ao integrar a disponibilização de equipamentos à assistência técnica qualificada e ao engajamento do produtor rural. Essa articulação institucional e operacional fortalece a sustentabilidade da iniciativa e amplia sua capacidade de expansão, permitindo sua adaptação a diferentes realidades e seu potencial de consolidação como referência na promoção do uso eficiente da água na agricultura, em escala regional e nacional.

Agradecimentos

A equipe técnica responsável pela implantação da Unidade Demonstrativa de Irrigação agradece ao Presidente da Emater-DF Cleison Medas Duval e Diretora-executiva Loiselene Carvalho da Trindade pelo apoio institucional e incentivo à execução da iniciativa.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Programa Produtor de Água*. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programa-produtor-de-agua. Acesso em: 09 abr. 2026.

PRODUTOR DE ÁGUA NO DESCOBERTO. *Projeto Produtor de Água no Descoberto*. Disponível em: https://produtordeaguadescoberto.df.gov.br/. Acesso em: 09 abr. 2026.

EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DO DISTRITO FEDERAL (EMATER-DF). Documentos institucionais e relatórios técnicos.

GOVERNANÇA REGULATÓRIA E CAPTAÇÃO SUBTERRÂNEA NO PLANEJAMENTO URBANO: INTEGRAÇÃO DOS AQUÍFEROS AO ORDENAMENTO TERRITORIAL MUNICIPAL À LUZ DA AGENDA 2030

1 Renata Alves Perez, 2 Hermam Vargas Silva, 3 Manoel Valter de Pádua, 4 Humberto Hissashi Takeda, 5 José Paulo Piccinini Pinese

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: renathaperez@hotmail.com; 2 Universidade Estadual de Londrina - email: vargashermam@gmail.com 3 Profissional autônomo:mvpadua@hotmail.com; 3 Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: humbertotakeda@gmail.com; 4 Universidade Estadual de Londrina, e-mail:pinese.uel.br

Palavras-chave: Governança hídrica; Captação subterrânea; Planejamento urbano.

Introdução

A governança exercida pelas Entidades Reguladoras Infraconstitucionais, como o ORCISPAR, constitui instrumento de efetivação da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas. Sua atuação dialoga diretamente com o ODS 6, ao transformar metas globais de universalização em indicadores locais de eficiência e potabilidade, e também com o ODS 11 e o ODS 3, ao fortalecer a gestão urbana e prevenir riscos à saúde pública. Ao harmonizar modicidade tarifária e investimentos, contribui ainda para o ODS 12.

Nesse cenário, a água subterrânea — armazenada nos aquíferos — assume papel estratégico no abastecimento urbano. Entretanto, a ausência de monitoramento adequado e o bombeamento superior à recarga natural têm provocado rebaixamento dos níveis e comprometido a segurança hídrica (Silva & Pinese, 2024; Foster, 2022). As transformações no uso do solo e a impermeabilização das cidades alteram o ciclo hidrológico e reduzem a infiltração, exigindo abordagem integrada entre hidrologia, planejamento territorial e regulação (Souza, 2006).

No âmbito do CISPAR, a expressiva quantidade de poços tubulares outorgados em municípios como Ibiporã, Marechal Cândido Rondon, Sarandi e Marialva evidencia que a captação subterrânea se configura como uso do solo urbano, demandando regramento específico. Assim, a incorporação de diretrizes técnicas de projeto, monitoramento e gestão dos aquíferos ao planejamento municipal é condição essencial para garantir sustentabilidade, qualidade de vida e equilíbrio ambiental.

Materiais e Métodos

A pesquisa possui abordagem qualitativa e quantitativa, com caráter exploratório e descritivo, fundamentada em levantamento bibliográfico, documental e análise de dados secundários.

Inicialmente, realizou-se revisão de literatura sobre governança hídrica, regulação do saneamento, uso do solo urbano e gestão de águas subterrâneas, com base em publicações técnicas e científicas, bem como em documentos institucionais da Organização das Nações Unidas e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Foram também considerados estudos recentes sobre rebaixamento de aquíferos e sustentabilidade da captação subterrânea.

A etapa quantitativa baseou-se na coleta e sistematização de dados secundários provenientes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Censo 2022) e do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas, com levantamento do número de poços tubulares outorgados nos municípios integrantes do CISPAR selecionados para análise (Ibiporã, Marechal Cândido Rondon, Sarandi e Marialva). A partir desses dados, foram calculados indicadores como habitantes por poço, área territorial por poço e densidade demográfica, permitindo avaliar a intensidade do uso da água subterrânea no contexto urbano.

Complementarmente, procedeu-se à análise normativa e institucional das atribuições do CISPAR e do ORCISPAR, com ênfase na regulação da captação subterrânea e sua interface com o planejamento municipal. A interpretação dos resultados foi realizada à luz dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente aqueles relacionados à água, saúde, cidades sustentáveis e consumo responsável, buscando integrar aspectos técnicos, ambientais e de governança.

Discussões e Resultados

Histórico e Atribuições do ORCISPAR

A criação do CISPAR (Consórcio Intermunicipal de Saneamento do Paraná) é o resultado da fusão de dois consórcios: o Consórcio Intermunicipal de Saneamento Ambiental (CISMAE) , e o Consórcio Intermunicipal dos Serviços Municipais de Saneamento Ambiental do Norte do Paraná (CISMASA). Os dois consórcios operavam inicialmente sob regime de direito privado. Todavia, a necessidade de adequação à Lei dos Consórcios Públicos (Lei nº 11.107/2005) deu origem a um protocolo de intenções no ano de 2005, resultando na transição para a natureza jurídica de direito público em junho de 2007. Atualmente, o CISPAR possuii 118 municípios consorciados, oferecendo suporte técnico e institucional para fortalecer a gestão dos quatro eixos do saneamento.

A obrigatoriedade imposta pelo Novo Marco Legal do Saneamento, Lei nº. 11.445 de 2027 atualizada pela Lei nº .14.026/2020, consolidou o papel do ORCISPAR. Criado originalmente em 2010, o órgão foi renomeado em 2025 como Órgão Regulador de Saneamento do Paraná, sendo hoje reconhecido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) como uma Entidade Reguladora Infraconstitucional (ERI). Sua competência abrange o monitoramento da qualidade e sustentabilidade dos serviços prestado em 55 municípios no eixo de água e esgoto (Figura 01) e 21 municípios em resíduos e drenagem.

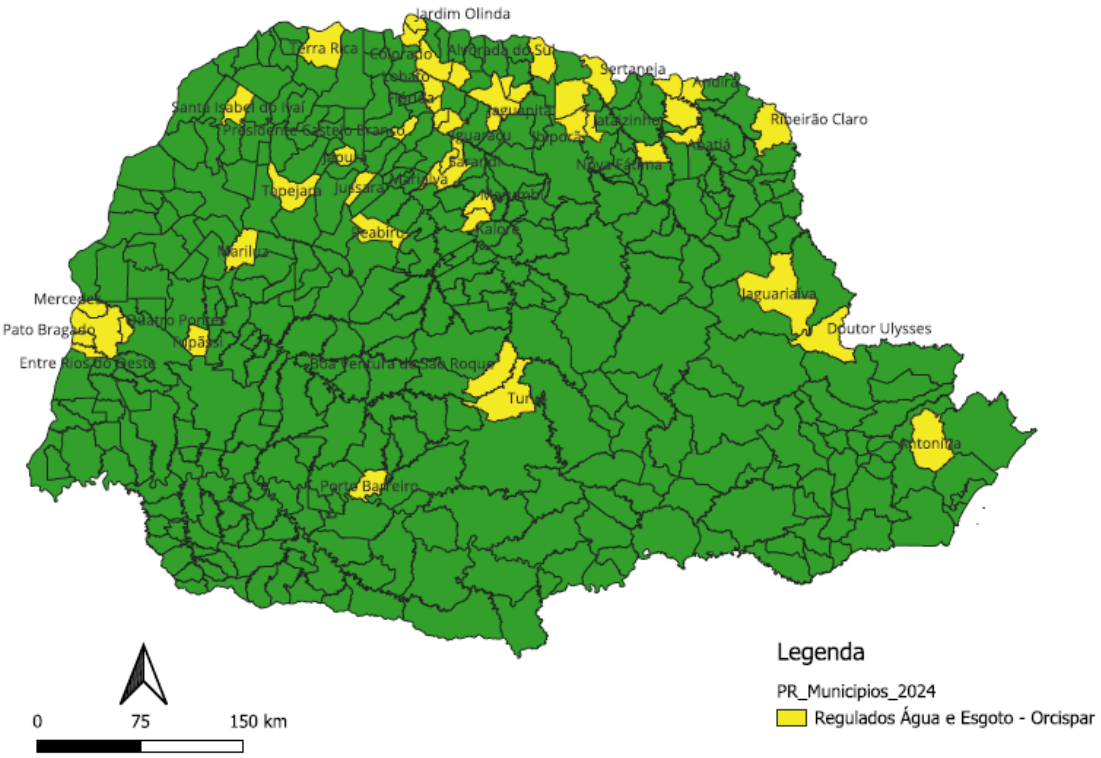


Figura 01 – Municípios regulados em água e esgoto pelo ORCISPAR
Fonte: Renata Alves Perez (2026)

Relação dos ODS e o Papel da Agência Reguladora

A governança realizada pelas ERIs, como o ORCISPAR, atua como um mecanismo de viabilização para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 (ONU, 2015). O foco principal está na ODS 6 (Água Limpa e Saneamento), em que a atuação da agência reguladora altera os objetivos globais de universalização para indicadores locais de eficiência e potabilidade. Ao exercer seu papel como órgão regulador, a agência garante que o acesso ao saneamento seja um direito concreto e sustentável para todos.

A regulação também afeta o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), gerenciando o gerenciamento de resíduos e drenagem urbana, diminuindo os efeitos ambientais e aumentando a resiliência das cidades. Adicionalmente, a regulação funciona como uma estratégia de prevenção em saúde, afetando o ODS 3 (Saúde e Bem-Estar) ao reduzir a disseminação de doenças transmitidas pela água. Em conclusão, ao harmonizar a modicidade tarifária com a demanda por investimentos, a agência fomenta o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), encorajando o uso consciente dos recursos naturais e combatendo o desperdício em toda a cadeia produtiva (ONU, 2015; ANA, 2020).

Situação das águas subterrâneas

A água invisível a humanidade está sob os nossos pés, nas rochas, nos solos, e são chamadas de aquíferos. É um recurso usado por bilhões de pessoas no mundo. Na agricultura é muito usada no abastecimento e irrigação das lavouras. No espaço urbano, sua utilização é direcionada ao abastecimento de residências, indústrias etc. Entretanto, falta governança, ou seja, gestão e monitoramento adequado, o que causa o rebaixamento dos níveis dos aquíferos mundo afora a níveis alarmantes, podendo, inclusive, haver o risco de secar, (Silva & Pinese, 2024). A conclusão é de que o bombeamento excede a recarga natural e que o futuro do abastecimento não será governado pela precipitação, mas por outros processos hidrológicos, como a recarga, e se torna essencial aprofundar os estudos e o monitoramento para que o desenvolvimento econômico futuro possa ser sustentável (Foster, 2022).

Por conseguinte, quais são os fatores que devem ser observados para um gerenciamento eficaz? Antes disso, é preciso entender a água como um sistema, que circula através do meio terrestre (atmosfera, biosfera, solo e rochas), que armazena e interage entre si, uma vez que hidrologia é a ciência que estuda “a ocorrência, circulação e distribuição, além das propriedades químicas e físicas, a sua reação com o ambiente do seu entorno (o que inclui os seres vivos)”. É a totalidade da história da terra. (Souza, 2006).Por outro lado, com as mudanças no uso do solo (desmatamento, aumento de áreas de pastagens, culturas e urbanas) vai existir a separação do fluxo de infiltração, do escoamento superficial, modificando as propriedades hidráulicas, diminuindo o fluxo para os aquíferos e rios. Existem, também, casos nos quais há uma inversão de fluxo, ou seja, o rio passa a ofertar suas águas ao aquífero. É necessário dizer aqui que o aquífero é um sujeito de direito (Fernandes & Fernandes, 2025) .

Para uma melhor compreensão deste fenômeno no CISPAR podemos citar 4 municípios importantes. Que são:

Tabela 01: Dados captação subterrânea
Fonte: IBGE e SIAGAS – compilado pelos autores

Município	*Habitantes (mil) Censo IBGE 2022*	*Área (Km²)*	*Número de poços tubulares outorgados*	*Habitantes/poços Hab/poço*	*Area do município/poço Km² /poço*	*Densidade demográfica Hab/Km²*
Ibiporã	*51.603*	*297,742*	*79*	*653,2*	*3.768,9*	*173,3*
Marechal Cândido Rondon	*55.836*	*745,748*	*355*	*157,3*	*2.100,7*	*74,9*
Sarandi	*128.106*	*103,501*	*225*	*569,4*	*460,0*	*1144,5*
Marialva	*41.851*	*475,564*	*399*	*104,9*	*1.191,9*	*88,0*

O poço tubular é um uso do solo no ambiente urbano e requer regramento para sua inclusão no planejamento para o crescimento do município. O CISPAR vem implementando um processo de transmissão de tecnologia e de educação ambiental para fazer frente a sua missão de promover um saneamento sustentavel.

Desta maneira, aceita que o município é um ente federativo com responsabilidades constitucionais, a saber, saúde, saneamento, educação e uso do solo e concorrentemente a área ambiental (Silva, 2023).

Água subterrânea utilizada para abastecimento necessita estudos básicos da interação rocha-solo (nos aquíferos) para que a segurança hídrica se mantenha, uma vez que as características hidraúlicas se alteram com o uso do recurso, além das mudanças nas composições físico químicas que acompanham estas interações. Por outro lado, as propriedades hidráulicas do aquifero devem ser, também, monitoradas pela possibilidade de alterações que acontecem no meio geológico, num pequeno espaço territorial, como um município.

O meio urbano é um conjunto de anteparos no subsolo que não são observados normalmente nos planos diretores. Garagens, fundações mais profundas, lagoas de infiltração de efluentes, alem de impermeabilização de extensas áreas da cidade. A figura abaixo mostra estas interrelações com ciclo hidrológico da superfície ao meio subterrâneo.

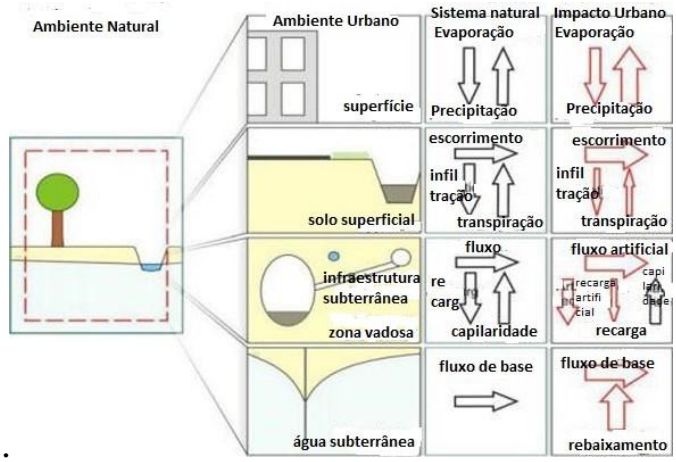


Figura 02: Impacto urbano sobre o ciclo das águas. As flechas vermelhas indicam fluxos de água que foram modificados ou introduzidos pela urbanização.
Fonte: Modificado de Schirmer et al., 2013

Da mesma maneira, estes equipamentos se relacionam com a qualidade da saúde e da qualidade de vida e da saúde da população. Normas técnicas são ignoradas e a gestão do conjunto de poços tubulares para o urbano, torna a gestão do CISPAR e do ORCISPAR com a promoção de um conjunto de orientações para as administrações descentralizadas com a intenção de integrar estas regras na administração da qualidade do serviço prestado. Esse conjunto envolve instruções normativas de projeto, de execução, de limpeza e de manutenção dos poço , englobando todas em uma instrução de gestão do aquífero na área do município

Considerações finais

A integração das águas subterrâneas ao planejamento urbano não é apenas uma necessidade técnica, mas um imperativo ético e legal, dado que o aquífero é hoje reconhecido como um sujeito de direito. A análise dos municípios de Ibiporã, Marechal Cândido Rondon, Sarandi e Marialva demonstra que a pressão sobre os aquíferos é crescente, exigindo que a regulação vá além da superfície.

O papel do ORCISPAR é fundamental para preencher o vácuo de governança identificado. A implementação de instruções normativas que regulem desde o projeto e execução até a manutenção dos poços é o caminho para garantir que a universalização do saneamento (ODS 6) ocorra sem comprometer a integridade dos sistemas hídricos subterrâneos. Conclui-se que o futuro da segurança hídrica urbana depende da capacidade dos municípios em integrar a gestão do subsolo aos seus Planos Diretores, transformando a "água invisível" em uma prioridade visível da gestão pública.

Referências Bibliográficas

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. *Manual de regulação: saneamento básico*. Brasília, DF: ANA, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/ana. Acesso em: 24 fev. 2026.

FERNANDES, L. C. de S.; FERNANDES, A. M. Aquífero como sujeito de direito: um precedente legal brasileiro. *Veredas do Direito: Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável*, v. 22, e222749, 2025. DOI: https://doi.org/10.18623/rvd.v22.2749.
FOSTER, S. The key role for groundwater in urban water supply security. *Journal of Water and Climate Change*, v. 13, n. 10, 2022. DOI: https://doi.org/10.2166/wcc.2022.174.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. 2015. Disponível em: https://brasil.un.org. Acesso em: 24 fev. 2026.

SCHIRMER, M.; LESCHIK, S.; MUSOLFF, A. Current research in urban hydrogeology – A review. *Advances in Water Resources*, v. 51, p. 280–291, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.06.015.

SILVA, H. V. Águas subterrâneas, Estado, comitê de bacias e municípios: responsabilidades. In: ENCONTRO NACIONAL DE COMITÊS DE BACIAS HIDROGRÁFICAS, 2023. Poster.

SILVA, H. V.; PINESE, J. P. P. The crisis under our feet: a preliminary analysis of groundwater in the municipalities of the Paranapanema basin (SP/PR). *Region – Water Conservancy*, v. 7, n. 1, p. 15–27, 2024. DOI: https://doi.org/10.32629/rwc.v7i1.2283.

SOUZA, L. C. de. Mudanças de paradigmas urbanísticas em face da necessária proteção das águas subterrâneas: a ordenação do solo da cidade a partir de seu subsolo através do zoneamento especial ambiental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14., 2006. Anais […]. p. 1–17.

TENDÊNCIAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA GESTÃO HÍDRICA: ESTUDO NA MICROBACIA DO RIO CAIÇÁ

1Daianne Santos dos Anjos, 2Karla Fabiany Santana Passos, 3Carla Suellen Alves Santos, 4Raimundo Rodrigues Gomes Filho, 5Vania Elisabete Schneider, 6Daniella Rocha

[1]Universidade Federal de Sergipe, e-mail: daianne1696@gmail.com; [2]Universidade Federal de Sergipe, e-mail: karla.engseg@gmail.com; [3]Universidade Federal de Sergipe, e-mail: eng.carlasualves@gmail.com; [4]Universidade Federal de Sergipe, e-mail: rrgomesfilho@academicco.ufs.br; [5]Universidade Federal de Sergipe, e-mail: veschnei@ucs.br; [6]Universidade Federal de Sergipe, e-mail: daniellarocha.ufs@gmail.com

Palavras-Chave: Antropização, Mudanças no uso do solo, Gestão de bacias hidrográficas.

Introdução

O Brasil abriga um dos maiores reservatórios de água e biodiversidade do mundo, mas enfrenta desequilíbrios ambientais decorrentes do desmatamento e da antropização de áreas naturais, o que afeta diretamente os recursos hídricos (Conti, 2021). Para assegurar o manejo das águas, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (Lei nº 9.433/1997) articula fundamentos e instrumentos para sua efetiva aplicação (Brasil, 1997).

A cobertura e o uso dos solos são variáveis centrais na gestão hídrica, pois determinam a infiltração, o escoamento superficial e a recarga de aquíferos, influenciando a vulnerabilidade das bacias (Lei; Wagner; Fohrer, 2022). Em bacias de pequeno porte, a expansão urbana desordenada, a conversão da vegetação nativa e a ocupação de Áreas de Preservação Permanente (APPs) intensificam a pressão territorial e agravam a vulnerabilidade hídrica (Santos; Caracristi, 2025).

No âmbito estadual, Sergipe dispõe da Política Estadual de Meio Ambiente (Lei nº 5.858/2006) e da Política Estadual de Recursos Hídricos (Sergipe, 2006, 1997). No âmbito municipal, Simão Dias, parte integrante da microbacia do rio Caiçá, possui instrumentos como o Plano Diretor Participativo (Lei nº 586/2013) e o Código Ambiental Municipal (Lei Complementar nº 1.065/2023), que tratam, respectivamente, da defesa e conservação do meio ambiente, bem como da proteção e preservação da biodiversidade (Simão Dias, 2023). Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é analisar a dinâmica do uso e ocupação do solo na microbacia do rio Caiçá, em Simão Dias – SE, e suas implicações socioambientais, identificando tendências de transformação territorial para subsidiar estratégias de planejamento e gestão sustentável dos recursos hídricos.

Material e Métodos

A microbacia do rio Caiçá, com área total de drenagem de 170,47 km², está situada na porção alta da bacia hidrográfica do rio Piauí. Sua nascente localiza-se no povoado Caiçá, na divisa com o município de Paripiranga (BA) (Fontes et al., 2017). Já sua foz ocorre no rio Jacaré, afluente do Piauí, no município de Lagarto (SE).

Para a execução deste estudo, utilizaram-se dados de uso e ocupação do solo em formato raster (30 m), obtidos na plataforma MapBiomas – Coleção 9 (1985–2024), considerando os anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2024. Os limites da microbacia foram extraídos de shapefiles oficiais da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. A elaboração cartográfica foi realizada no QGIS (versão 3.40), com reclassificação das classes originais em categorias analíticas. Para cada período, quantificou-se a área por classe (km² e %) e realizou-se uma análise comparativa temporal para identificar tendências de transformação territorial.

A partir dos resultados cartográficos, analisou-se a relação entre as mudanças no uso e na ocupação do solo e a proteção de áreas ambientalmente sensíveis da microbacia, considerando os impactos decorrentes das atividades antrópicas. Elaborou-se um mapa conceitual para sistematizar as interações territoriais e aplicou-se um teste de regressão linear, realizado com o auxílio da plataforma Microsoft Excel, para verificar a existência e a intensidade das relações entre as variáveis selecionadas.

Com base na integração dos resultados cartográficos e estatísticos, foram formuladas diretrizes de planejamento voltadas à mitigação da vulnerabilidade hídrica, fundamentadas na revisão de instrumentos de gestão territorial e de recursos hídricos aplicáveis a bacias de pequeno porte no semiárido sergipano (Lima et al., 2025).

Resultados e Discussão

O período entre 1985 e 2024, na microbacia do rio Caiçá, foi marcado por uma reconfiguração territorial intensa, decorrente do desmatamento, da expansão urbana e da conversão de áreas naturais (Figura 1). Ao longo das quatro décadas, a região passou por reconfigurações contínuas, especialmente nas classes de formações savânicas e florestais. A principal transformação ocorreu pela expansão das pastagens, que passaram a ocupar mais de um terço da área a partir de 1995 (34,65%). Conforme Batista et al. (2017), as pastagens e a agricultura já dominam 85% da bacia, restando hoje apenas 15% dessa configuração original.

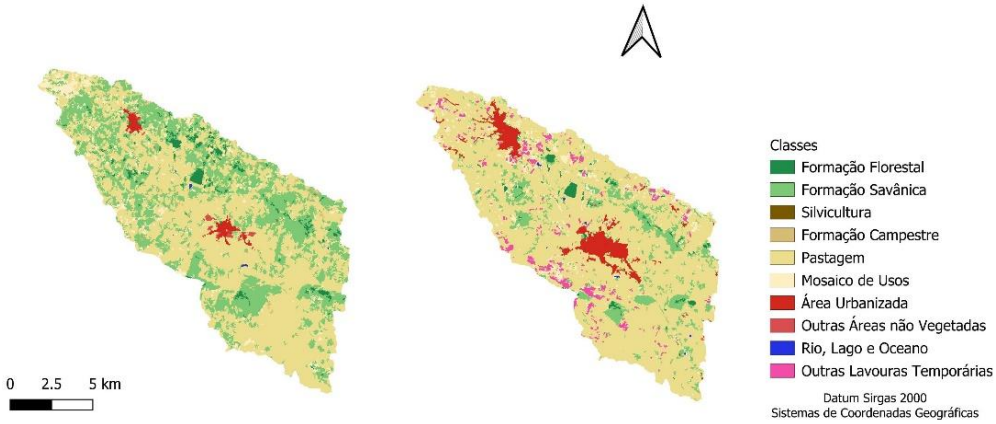


Figura 1. Mapa de uso e cobertura do solo da microbacia do rio Caiçá nos anos de 1985 e 2024
Fonte: Elaborado pelos autores com base em MapBiomas (2025).

O crescimento e a predominância das pastagens evoluíram significativamente no estado, especialmente nos biomas de transição entre a Mata Atlântica e a Caatinga. Esse aumento está relacionado à expansão da pecuária, visto que 68% das propriedades rurais são destinadas a essa atividade (Galina; Ilha; Pagotto, 2022). Outro aspecto relevante é a emergência de outras lavouras temporárias a partir de 2005 que ganharam um incremento mais expressivo a partir de 2015 (0,58%), indicando intensificação das atividades agrícolas em detrimento das pastagens e da vegetação natural. O aumento recente do mosaico de usos reforça essa ideia de fragmentação, sugerindo unidades de produção menores e uma paisagem mais heterogênea.

A urbanização, embora incipiente em 1985 (0,50%), apresentou crescimento progressivo de 2,37% em 2024, possivelmente impulsionada pela ocupação periurbana e pelo adensamento em núcleos populacionais. Estudos como o de Fontes et al. (2017), confirmam que esse avanço intensificou a pressão antrópica e o processo de degradação.

É possível observar, também, a transição da cobertura natural para o avanço das pastagens, que atingiram seu pico de expansão em 2005, enquanto a formação savânica apresentou declínio progressivo. Em paralelo, a expansão urbana e o aumento de lavouras temporárias revelam a intensificação da pressão antrópica. Esse avanço evidencia um crescimento linear e previsível, confirmado pelo coeficiente de determinação ($R^2 = 0.7077$). Tal consistência é demonstrada pela equação da reta ($y = 0.1501x - 299.3$), que é estatisticamente significativa e reflete uma pressão contínua no uso e na ocupação do solo na microbacia do rio Caiçá ao longo dos anos.

As principais tendências de transformação territorial observadas na microbacia ao longo das últimas décadas foram sintetizadas em um mapa conceitual (Figura 2), destacando os vetores que impulsionam as mudanças no uso e na ocupação do solo.



Figura 2. Mapa Conceitual de Tendência de Uso e Ocupação do Solo (1985-2024)
Fonte: Elaborado pelos autores com base em MapBiomas e IBGE, 2025.

Tais vetores reorganizam a paisagem e intensificam a pressão sobre áreas ambientalmente sensíveis, especialmente nas proximidades dos cursos d'água e em trechos de grande importância ecológica. Estudos de micro e pequenas bacias no Brasil mostram que a progressiva substituição da vegetação nativa por usos agropecuários e a ampliação da malha urbana reorganizam a paisagem de forma duradoura, concentrando pressões sobre trechos ripários e áreas de relevo mais acentuado, o que tende a comprometer funções protetoras essenciais às áreas sensíveis. O que é corroborado por Lopes et al (2024), que sugerem que vetores distintos (agricultura, pastagem e urbanização) atuam de forma combinada na recomposição da paisagem.

Nesse cenário, torna-se essencial a implementação de instrumentos legais e de normas rigorosas para a recuperação ambiental e o controle de poluentes emergentes. A Resolução Conama nº 357/2005 e a PNRH já estabelecem diretrizes fundamentais para o uso de propriedades urbanas, a classificação dos corpos de água e a gestão integrada dos recursos hídricos (BrasiL,2005, 1997). Estratégias como a preservação e a recuperação da mata ciliar, o tratamento de efluentes e a aplicação efetiva do Plano Diretor Participativo e do Código Ambiental Municipal são essenciais para mitigar os impactos do crescimento urbano e da ausência de infraestrutura sanitária (Simão Dias, 2023).

Conclusões

O estudo evidenciou que a microbacia do rio Caiçá passa por um processo contínuo de antropização, marcado pela redução da vegetação nativa e pela expansão de pastagens, lavouras temporárias e áreas urbanizadas. Esses fatores estão associados ao aumento da vulnerabilidade hídrica e à redução da resiliência ecológica da microbacia. Considera-se que a gestão da microbacia deve ser pautada por estratégias integradas de ordenamento territorial e conservação ambiental, incluindo o fortalecimento dos instrumentos legais, ampliação do monitoramento hídrico e investimento em ações como saneamento e reflorestamento, assegurando equilíbrio ambiental e qualidade de vida.

Referências

BATISTA, L. S.; SANTOS, M.R.A; SENA, I.M.N.; et *al*. Análise morfométrica da bacia do rio Caiçá, BA/SE. *In*: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 13., 2017, Aracaju. **Anais** [...]. Porto Alegre: ABRH, 2017. p. 79. Disponível: xiii simpósio de recursos hidrícos do nordeste análise morfométrica da bacia do rio caiça, ba/se. Acesso em 20 de out.2025.

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 e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [1997]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 1 nov. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e as diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 58–63, 18 mar. 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?id=450. Acesso em: 21 nov. 2025.

CONTI, D. M. Água: um tema urgente para o Brasil. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 24, p. 1–6, 2021. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoceditorialvu2021L4ED.

FONTES, A. R.; LUCAS, A. A. T.; CARVALHO, M. E. S. Índice de qualidade da água na microbacia do rio Caiçá, no perímetro urbano de Simão Dias/SE. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 11, n. 2, p. 51–60, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.18316/rca.v11i2.3170.

GALINA, I. B.; ILHA, D. B.; PAGOTTO, M. A. Dinâmica multitemporal da cobertura e do uso do solo do estado de Sergipe. **Scientia Plena**, Aracaju, v. 18, n. 4, p. 1-12, 2022. DOI: 10.14808/sci.plena.2022.045201.

LEI, C.; WAGNER, P. D.; FOHRER, N. Influences of land use changes on the dynamics of water quantity and quality in the German lowland catchment of the Stör. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 26, p. 2561-2582, 2022. DOI: https://doi.org/10.5194/hess-26-2561-2022.

LIMA, R. G. S.; SOUZA NETO, I. R.; ANJOS, D. S.; et al. Análise temporal dos fatores climáticos na bacia do Rio Piauí com a utilização da base de dados br-dwgd. In: congresso internacional de tecnologias para o meio ambiente, 8., 2025, Bento Gonçalves. **Anais eletrônicos** [...]. Bento Gonçalves: UCS, 2025. Disponível em: https://www.ucs.br/site/midia/arquivos/anais-8-congresso-tecnologias.pdf. Acesso em: 12 mar. 2026.

LOPES, M. C.; RABELO, K.B.; LUZ, V.A.P.; *et al*. Mapeamento do uso e ocupação do solo da microbacia hidrográfica do Riacho Timbaúbas em Juazeiro do Norte-CE utilizando SIG. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 10, n. 1, p. 24-36, 2024. DOI: 10.21680/2447-3359.2024v10n1ID33855.

SANTOS, C. M. S.; CARACRISTI, I. Influência do uso e ocupação do solo nas inundações na cidade de Sobral/CE. **Planeta Amazônia**, 2025. Disponível em: https://periodicos.unifap.br/planetaamazonia/article/view/222/114. Acesso em: 1 nov. 2025.

SERGIPE. **Lei nº 3.870, de 25 de setembro de 1997**. Institui a Política Estadual de Recursos Hídricos e dá outras providências. Aracaju: Assembleia Legislativa, [1997]. Disponível em: https://aleselegis.al.se.leg.br/Arquivo/Documents/legislacao/html/l38701997.html. Acesso em: 1 dez. 2025.

SERGIPE. **Lei nº 5.858, de 22 de março de 2006**. Dispõe sobre a Política Estadual de Meio Ambiente, institui o Sistema Estadual do Meio Ambiente e dá outras providências. Aracaju: Assembleia Legislativa, [2006]. Disponível em: https://al.se.leg.br/Legislacao/Ordinaria/2006/O58582006.pdf. Acesso em: 1 dez. 2025.

SIMÃO DIAS (SE). **Lei Complementar nº 1.065, de 2023**. Institui o Código Ambiental do Município. Diário Oficial do Município de Simão Dias, Simão Dias, SE, 2023.Disponível em:https://simaodias.se.gov.br/sites/simaodias.se.gov.br/files/LEI%20COMPLEMENTAR%20N%C2%BA%201.065.2023.pdf.Acesso em: 21 nov. 2025.

MONITORAMENTO HÍDRICO COMO FERRAMENTA DE INSERÇÃO SOCIAL DE MENINAS NA PESQUISA

1 Barbara Alves de Lima Nawate, 2 Jessica Feliciano Daitch de Castilho, 3 Milena Coutinho Correia, 4 Maurici Luzia C. Del Monego

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: engbarbaradelima@gmail.com; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: jessicafeliciano.ambiental@gmail.com; 3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: anelimccorreia@gmail.com; 4 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: mauriciluzia@gmail.com

Palavras-chave: Extensão Universitária; Recursos Hídricos; Monitoramento Ambiental.

Introdução

A presença de poluentes nos compartimentos ambientais tem se configurado como uma preocupação crescente para a população, órgãos governamentais e autoridades ambientais, uma vez que ainda não são plenamente conhecidos os efeitos e consequências decorrentes da exposição prolongada a esses contaminantes, especialmente em matrizes aquáticas, incluindo águas destinadas ao consumo humano (Soares, 2015).

No contexto ambiental, percebe-se, entretanto, que há uma distância entre os conhecimentos acadêmicos, a prática empresarial e legal, e a real efetivação pela sociedade. Ou seja, embora existam leis que precisem ser cumpridas, a maioria da população não as conhece ou ainda, não compreende a necessidade de manter o meio ambiente saudável.

Assim, fica evidente que a educação ambiental é uma prática a ser inserida socialmente desde a infância.

A educação ambiental está pautada na legislação brasileira desde a própria Constituição Federal (1998), no artigo 225, tornando o poder público responsável por promover a educação ambiental em todos os níveis de ensino, bem como, a conscientização pública, com o objetivo de preservar o meio ambiente. De mesmo modo, a Política Nacional de Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981) e a Política Nacional de Educação Ambiental (Lei nº 9.795/1999), sendo que, esta última define a educação ambiental como componente essencial e permanente da educação nacional. Em termos de Recursos Hídricos a educação ambiental é reforçada pela Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997), pois relaciona a educação ambiental à gestão participativa das águas.

Nesse contexto a implementação de projetos de caráter extensionistas voltados ao meio ambiente, especialmente ao monitoramento de recursos hídricos, apresentam grande potencial para contribuir com o atendimento das diretrizes previstas no Plano Nacional de Educação, instituído pela Lei nº 13.005/2014 (Brasil, 2014), sobretudo no que diz respeito à promoção de ações direcionadas ao enfrentamento de demandas sociais prioritárias, especialmente no âmbito da educação básica

Frente a esse cenário, diferentes iniciativas, tanto públicas quanto privadas, vêm sendo desenvolvidas com o propósito de promover, no ambiente escolar, ações multidisciplinares capazes de proporcionar aos estudantes e à comunidade uma compreensão mais crítica acerca do uso da energia e da importância da preservação ambiental, fundamentada em práticas de consumo consciente e eficiente. Nesse contexto, destaca-se também a produção de materiais didáticos como uma das principais estratégias adotadas em projetos voltados à temática energética, buscando ampliar o alcance das ações educativas e fortalecer os processos de ensino e aprendizagem relacionados à sustentabilidade (Paulino et al., 2017)

Portanto, iniciativas extensionistas voltadas à prática ambiental estimulam a criação de novos métodos e processos de produção, inovação e disseminação do conhecimento, favorecendo a ampliação do acesso ao saber e fortalecendo o desenvolvimento tecnológico e social do país.

Neste cenário, projetos ambientais de extensão tornam-se um ambiente integrativo entre diferentes iniciativas, conhecimentos e agentes envolvidos no processo educativo, reunindo profissionais com formação e experiência diversificadas nas áreas de ensino, pesquisa e extensão. Essa abordagem multidisciplinar fortalece ações integradas e contribui para estratégias mais adequadas às demandas do ensino de Ciências na educação básica, considerando as realidades locais.

O projeto de extensão “Seja uma mulher cientista: despertando o interesse pela ciência” passa a ser, então, um local de integração para a educação e incentivo à pesquisa, dentre as quais, a educação ambiental. O objetivo deste trabalho foi mostrar a prática de educação ambiental inserida em meninas participantes do projeto, a partir de uma oficina de recursos hídricos na qual, foi inserido o aprendizado teórico e prático, com visita a campo e laboratório, incentivando a prática ambiental e a continuidade de estudos voltados à tal área.

Material e Métodos

O projeto de extensão “Seja uma Mulher Cientista: despertando o interesse pela ciência”, desenvolvido na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Curitiba Ecoville, em parceria com escolas públicas da região, reúne docentes, estudantes de iniciação científica e extensionistas em ações voltadas à promoção da ciência. A participação de professores vinculados à pós-graduação e de alunos de mestrado e doutorado fortalece a atuação interdisciplinar e integrada do projeto, ampliando a articulação entre diferentes áreas do conhecimento.

Neste projeto, entre 2025 e 2027, realiza-se oficinas experimentais com a participação anual de quatro escolas públicas, envolvendo professoras de Ciências e estudantes do Ensino Fundamental e Médio. Anualmente, o projeto atende diretamente

quatro professoras e dezesseis estudantes. Em 2025, as escolas participantes realizaram 22 encontros na universidade. As oficinas são desenvolvidas em duas etapas complementares.

As atividades são desenvolvidas em duas etapas: inicialmente, professoras e estudantes participam de oficinas temáticas com atividades experimentais e metodologias ativas; posteriormente, os conhecimentos adquiridos são replicados nas escolas pelas próprias alunas, com apoio de kits fornecidos pelo projeto, ampliando o alcance das ações educativas.

Em 2026, foi ministrada a oficina: "Monitoramento de Recursos Hídricos" cujo foco era promover a educação ambiental mostrando que o monitoramento de recursos hídricos integra conhecimentos de hidrologia, química da água e cidadania ambiental.

Para tanto, a oficina se dividiu em três momentos: Palestra de Recursos Hídricos e Educação Ambiental, seguida de ida à campo com demonstração prática e participativa de amostragem de água para análise e, por fim, demonstração prática em laboratório de análise de nitrito.

Resultados e Discussões

A palestra ministrada (Figura 01) teve, como foco, incitar os conhecimentos gerais acerca de recursos hídricos e a forma como o ser humano se inter-relaciona com ele, permitindo a compreensão acerca dos corpos hídricos e os impactos das atividades humanas sobre sua qualidade. Por meio da análise de parâmetros químicos e biológicos é possível identificar alterações ambientais, avaliar condições de uso e subsidiar ações de preservação e gestão sustentável. Além do aspecto técnico-científico, essa temática também contribui para a formação de uma consciência crítica e participativa, estimulando o envolvimento da sociedade na proteção dos recursos hídricos e na promoção da sustentabilidade ambiental.



Figura 01: Palestra de Educação Ambiental e Recursos Hídricos.
Fonte: Os autores (2026)

Observou-se que as estudantes participantes do projeto demonstraram considerável familiaridade com a temática abordada, além de grande interesse e curiosidade ao longo das discussões. Diversos questionamentos foram direcionados aos palestrantes, solicitando maior aprofundamento em temas como a poluição de águas destinadas ao consumo humano e de aquíferos subterrâneos, os mecanismos de recarga de aquíferos em períodos de escassez hídrica e os fatores relacionados aos eventos de enchentes registrados nos últimos anos na região Sul do Brasil.

Na sequência, realizou-se a etapa de campo (Figura 01), na qual foi simulada uma atividade real de amostragem de água. Para isso, utilizaram-se equipamentos comumente empregados em programas de monitoramento ambiental, como garrafas descontaminadas para coleta, garrafa de Van Dorn, sonda multiparâmetros, turbidímetro e draga de Petersen para amostragem de sedimentos.



Figura 02: Prática de monitoramento de água em campo.
Fonte: Os autores (2026)

Seguiu-se, então, para a última etapa, em laboratório, com a análise da água amostrada anteriormente, para o parâmetro nitrito (Figura 03), um nutriente comumente monitorado que, em altos níveis de concentração pode indicar poluição em rios.



Figura 03: Prática laboratorial de análise de nitrito.
Fonte: Os autores (2026)

Ficou evidente que, embora a palestra tenha sido de grande valia, as etapas práticas tornaram a oficina mais atrativa para as estudantes participantes visto que muitas solicitaram tocar nos equipamentos, maiores explicação sobre o seu funcionamento e, principalmente, qual carreira deve-se seguir para trabalhar com meio ambiente no futuro.

Esta oficina trouxe à tona a importância de projetos extensionistas práticos voltados à estudantes carentes e mostra como a inserção dos estudantes no ambiente universitário tem grande potencial de inseri-los na universidade, futuramente, além de promover a cidadania e a grupos vulneráveis (Lopes et al., 2014).

A prática terá continuidade no futuro, com a abordagem do parâmetro amônia, bem como, com a replicação destes conhecimentos dentro das próprias escolas, o que torna estas meninas, protagonistas no seu ambiente, bem como, promove o censo de pertencimento com o projeto.

Considerações Finais

Conclui-se que a oficina proporcionou uma experiência significativa de integração entre educação ambiental, prática científica e formação cidadã, despertando o interesse das estudantes pelos temas relacionados aos recursos hídricos e às questões ambientais contemporâneas. A participação ativa das alunas, evidenciada pela curiosidade, pelos questionamentos realizados e pelo interesse nos equipamentos e procedimentos utilizados, demonstrou o potencial das atividades práticas como ferramenta de aproximação entre teoria e realidade. Além de ampliar o conhecimento sobre monitoramento da qualidade da água, poluição e escassez hídrica, a atividade também favoreceu o contato das participantes com o ambiente universitário e com possibilidades de atuação profissional na área ambiental. Dessa forma, reforça-se a importância de projetos extensionistas voltados à popularização da ciência e à inclusão de estudantes da educação básica em espaços acadêmicos, contribuindo para a formação de futuras cientistas e para o fortalecimento da consciência socioambiental. Por fim, conclui-se que o projeto traz a sensação de pertencimento às participantes, reforçando o próprio protagonismo.

Agradecimentos

Agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI, ao Ministério das Mulheres pelo financiamento, à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Curitiba, pelo apoio institucional e pela infraestrutura disponibilizada

Referências Bibliográficas

BRASIL. Lei nº 13.005, de 25 de junho de 2014. Aprova o Plano Nacional de Educação – PNE e dá outras providências. Diário

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. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 2 set. 1981.

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, 9 jan. 1997.

BRASIL. Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 28 abr. 1999.

LOPES, Roseli Esquerdo; BORBA, Patrícia Leme de Oliveira; TRAJBER, Natalia Keller de Almeida; SILVA, Carla Regina; CUEL, Brena Talita. Oficinas de atividades com jovens da escola pública: tecnologias sociais entre educação e terapia ocupacional. **Interface - Comunicação, Saúde, Educação**, [S.L.], v. 15, n. 36, p. 277-288, mar. 2011. FapUNIFESP (SciELO).

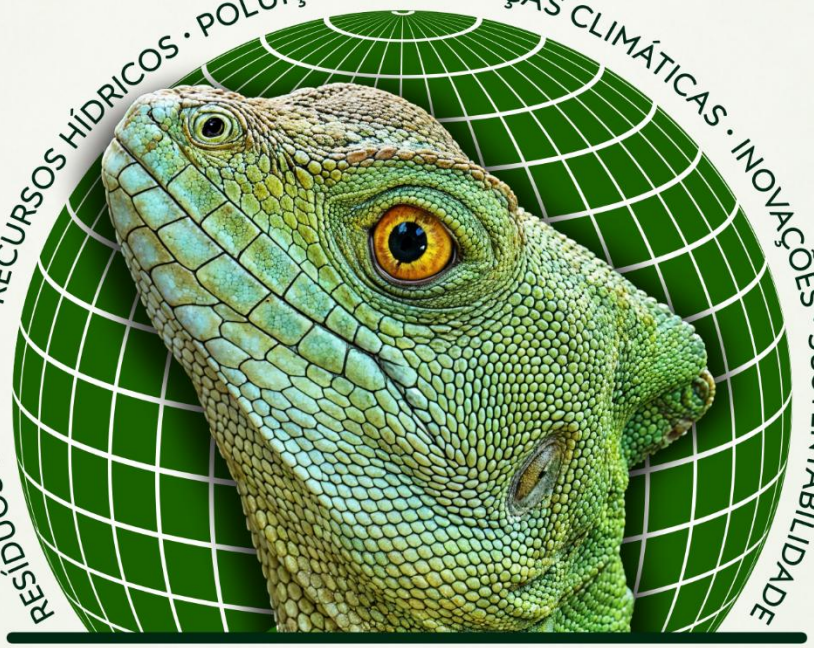
http://dx.doi.org/10.1590/s1414-32832011000100021.
Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 26 jun. 2014.

PAULINO, Tiago de Freitas; PINTO, Mateus Serra; COSTA, Giovani Vitório; BAMBIRRA, Mariana Botarro; PAULINO, Eliene de Souza. Oficinas educacionais: atividade de extensão como método para a melhor utilização da energia para estudantes do ensino fundamental. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, *[S. l.]*, v. 11, n. 5, p. 139–151, 2016. DOI: 10.34024/revbea.2016.v11.2353.

SOARES, A. F. S.; LEAO, M. M. D. Contaminação dos mananciais por micropoluentes e a precária remoção desses contaminantes nos tratamentos convencionais de água para potabilização. **Revista De Jure**, v. 14, n, 24, pp. 36-85, 2015.

ÁREA TEMÁTICA 27

RECURSOS HÍDRICOS: QUALIDADE DA ÁGUA



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA E DO SEDIMENTO NO RESERVATÓRIO DE BARRA BONITA (SÃO PAULO-SP): INDICADORES FÍSICO-QUÍMICOS E TRÓFICOS

1 Rafaella de Souza Menezes, 2 Aline Rigamonti Ramos, 3 Ginga Rainha Gula Bumba Manuel, 4 Besna Armando Daniel, 5 Zubeidat Precious Ahmed, 6 Elizabeth Abdulmalik, 7 Marcelo Luiz Martins Pompêo, 8 Viviane Moschini Carlos

1 Universidade Estadual Paulista (UNESP-Sorocaba), e-mail: rafaella.s.menezes@unesp.br; 2 Universidade de São Paulo (USP), e-mail: alinerigamonti@usp.br; 3 Universidade de São Paulo (USP), e-mail:rainhaginga@usp.br; 4 Universidade de São Paulo (USP), e-mail: besnacelestedaniel@usp.br; 5 Universidade de São Paulo (USP), e-mail:ahmedzube@usp.br; 6 Universidade de São Paulo (USP), e-mail: alizzie@usp.br; 7 Universidade de São Paulo (USP), e-mail: mpompeo@ib.usp.br; 8 Universidade Estadual Paulista (UNESP-Sorocaba), e-mail: viviane.moschini@unesp.br

Palavras-chave: Reservatório; Nutrientes; Eutrofização.

Introdução

A água como bem comum e recurso natural indispensável à manutenção da vida é fundamental que se encontre disponível em quantidade e qualidade adequadas (SILVA; COTRIM, 2016). Os reservatórios vêm sendo destinados a múltiplos usos, alguns dos quais apresentam exigências de qualidade mais rigorosas que outros (MAIA *et al*., 2007). Os estudos ecológicos das massas de água e dos sedimentos de reservatórios possibilitam o diagnóstico de suas condições (POMPÊO *et al*., 2024). Observam-se impactos negativos sobre o sistema aquático de reservatórios desde a fase de sua construção que refletem diretamente na qualidade da água, uma vez que a formação do reservatório reduz a capacidade de autodepuração do curso d'água, aumenta a retenção de sedimentos e nutrientes e altera as características físicas, químicas e biológicas do sistema (PRADO; NOVO, 2011). O avançado estágio de eutrofização provoca a depreciação das áreas marginais, compromete atividades recreativas e acarreta prejuízos ao funcionamento da usina hidrelétrica, além de gerar impactos ambientais como a inviabilização da vida aquática (BRAMORSKI; VILLELA, 2008).

O Reservatório de Barra Bonita tem apresentado um progressivo processo de degradação da qualidade de suas águas. O aporte excessivo de nutrientes no reservatório decorre de seus afluentes, os rios Tietê e Piracicaba, que transportam, além de resíduos agrícolas, descargas domésticas e industriais oriundas de grandes centros urbanos. O objetivo deste estudo é avaliar a qualidade da água e dos sedimentos do reservatório de Barra Bonita (SP), determinar seu estado trófico e comparar os resultados entre os diferentes pontos de amostragem, relacionando-os com achados de estudos anteriores e de outros ambientes lacustres.

Material e Métodos

Local de Monitoramento: Localizado na região centro-oeste do estado de São Paulo, o reservatório de Barra Bonita é o primeiro da série de reservatórios ao longo do rio Tietê. Formado pelo represamento dos rios Tietê e Piracicaba, entrou em operação em 1963 com o principal objetivo de gerar energia elétrica, embora atualmente desempenhe funções múltiplas, como navegação fluvial, irrigação, abastecimento urbano, turismo, lazer e pesca (TUNDISI *et al*., 2008). A bacia de contribuição para o reservatório de Barra Bonita adotado nesse estudo abrange aproximadamente 19.164,43 km² (fig. 01a), englobando porções das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba/Capivari/Jundiaí (BHPCJ) e Tietê/Sorocaba (BHTS) (PRADO; NOVO, 2007). Seus principais afluentes recebem intensa descarga de efluentes domésticos e industriais (BRAMORSKI, 2004). A região apresenta clima de transição entre tropical e subtropical, e sua área de entorno é predominantemente ocupada pela cultura da cana-de-açúcar (BUZELLI; CUNHA-SANTINO, 2013). Neste estudo, foram selecionados três pontos de monitoramento no reservatório (fig.01b): o Ponto 1(P1), localizado no braço do rio Tietê (22°40'6.74"S, 48°20'16.59"W); o Ponto 2(P2), no corpo central do reservatório, região de mistura entre os rios Tietê e Piracicaba (22°36'47.16"S, 48°21'16.97"W) e o Ponto 3(P3), no braço do rio Piracicaba (22°36'1.66"S, 48°17'55.61"W).

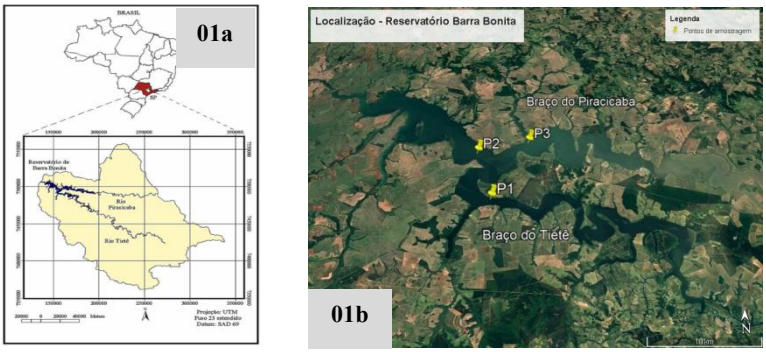


Figura 01a: Localização da Bacia hidrográfica de estudo no Estado de São Paulo e Brasil; 01b: Localização do reservatório e pontos de coleta P1, P2 e P3. Fonte: 01a – PRADO; NOVO (2007), adaptado; 01b – Google Maps (2025), elaboração dos autores.

Coleta e armazenamento de amostras de água e sedimento: Em cada ponto foi realizado o georreferenciamento do local por meio de GPS, profundidade com medidor a laser e transparência da água com disco de Secchi. As amostras de água foram coletadas com garrafa de Van Dorn e acondicionadas em caixa térmica, até sua análise laboratorial. Para análise de perfil *in situ*, foram lançadas duas sondas multiparâmetros capazes de realizar medição contínua ao longo da coluna d'água: sonda *AquaTroll* 700, *In-Situ* e sonda Turner C3, com sensores para medição de clorofila-a, ficocianina, turbidez, temperatura, pH, condutividade elétrica e oxigênio dissolvido. A coleta de sedimento superficial foi realizada com coletor de sedimento tipo Lens.

Análises em Laboratório: As análises foram realizadas no Laboratório de Limnologia do Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo (USP). Com exceção da determinação de sólidos suspensos totais, efetuada por filtração com bomba a vácuo, todas as análises foram conduzidas por método colorimétrico com metodologias vistas na tabela 01 e leituras de absorbância em espectrofotômetro Spectronic 200.

Tabela 01: Análises e metodologias utilizadas. Fonte: Os autores, 2025

Variáveis	Metodologia do Instituto de Biociências (2025) baseada em:
Nitrito/Nitrato	Mackreth et al.(1978)
Ortofosfato	Strickland & Parsons (1960)
Amônio	Koroleff (1976)
Fosfato Total/ Nitrogênio Total	Valderrama (1981)
Fósforo do Sedimento	Andersen (1976)
Clorofila-a	Shoaf & Lium (1976) e Jeffrey & Humphrey (1975)
Sólidos Suspensos Totais	Watzel & Likns (1991)
Índice de Estado Trófico (IET)	Lamparelli (2004)
Sedimento: Nitrogênio Total Kjeldahl	APHA (2005)

Cálculo do Índice de Estado Trófico (IET): Neste estudo, o cálculo considerou apenas as variáveis clorofila-a e fósforo total, desconsiderando a transparência da água (CETESB, 2021). O índice adotado segue a adaptação proposta por LAMPARELLI (2004) para ambientes lênticos (reservatórios).

Resultados e Discussão

No enquadramento vigente da CETESB e da Resolução CONAMA nº 357/2005, o reservatório de Barra Bonita, assim como seus afluentes são classificados como corpo hídrico de Classe 2 (BRASIL, 2005). Dessa forma, todas as análises e discussões apresentadas neste estudo consideram os limites de qualidade para essa classificação. Obtiveram-se os seguintes resultados para amostras de água na figura 02, para amostras de sedimentos na figura 03 e IET no gráfico **h** da figura 03:

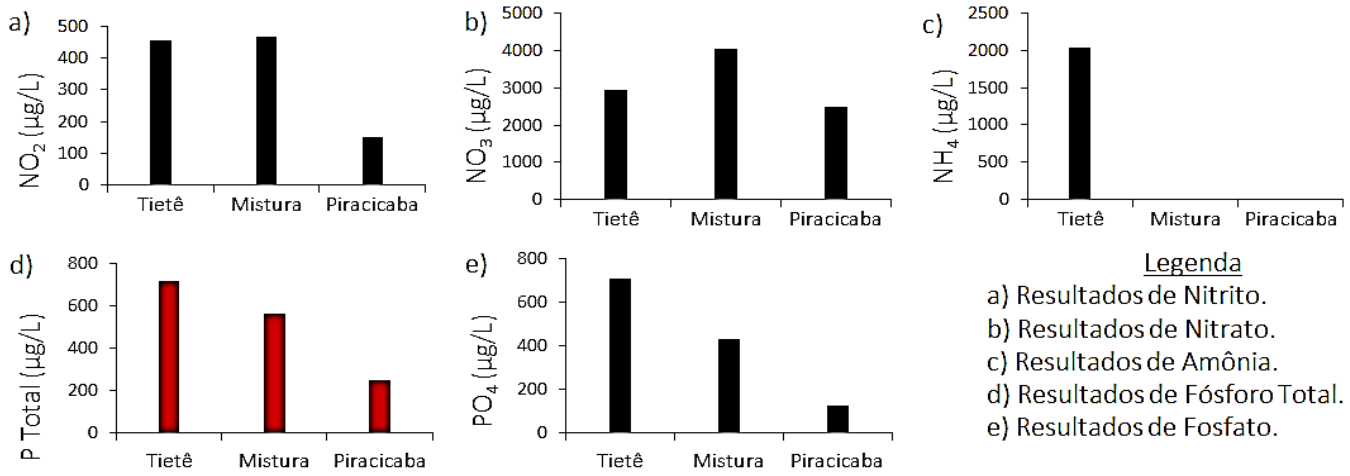
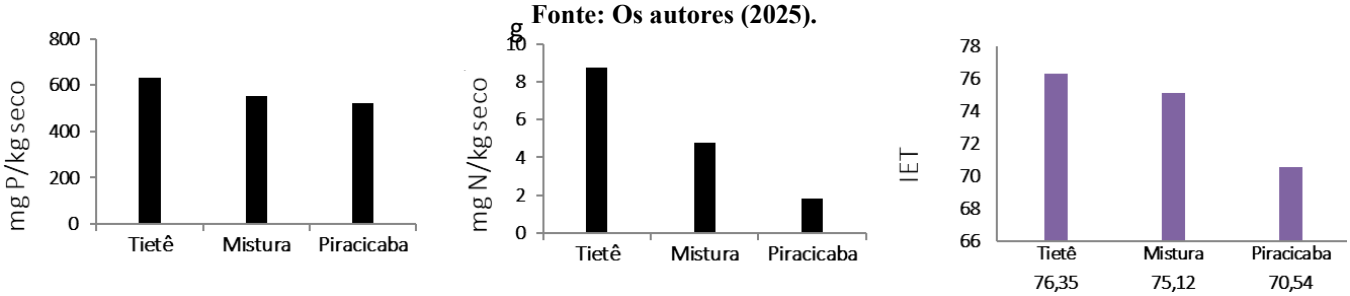


Figura 02: Gráficos com resultados das análises de nutrientes na água para os três pontos de amostragem. Fonte: Os autores (2025).



f) Análise de Fósforo em sedimento. g) Análise de Nitrogênio em sedimento. h) IET dos três pontos de amostragem.

Figura 03: Gráficos com resultados das análises do sedimento e gráfico de IET. Fonte: Os autores (2025).

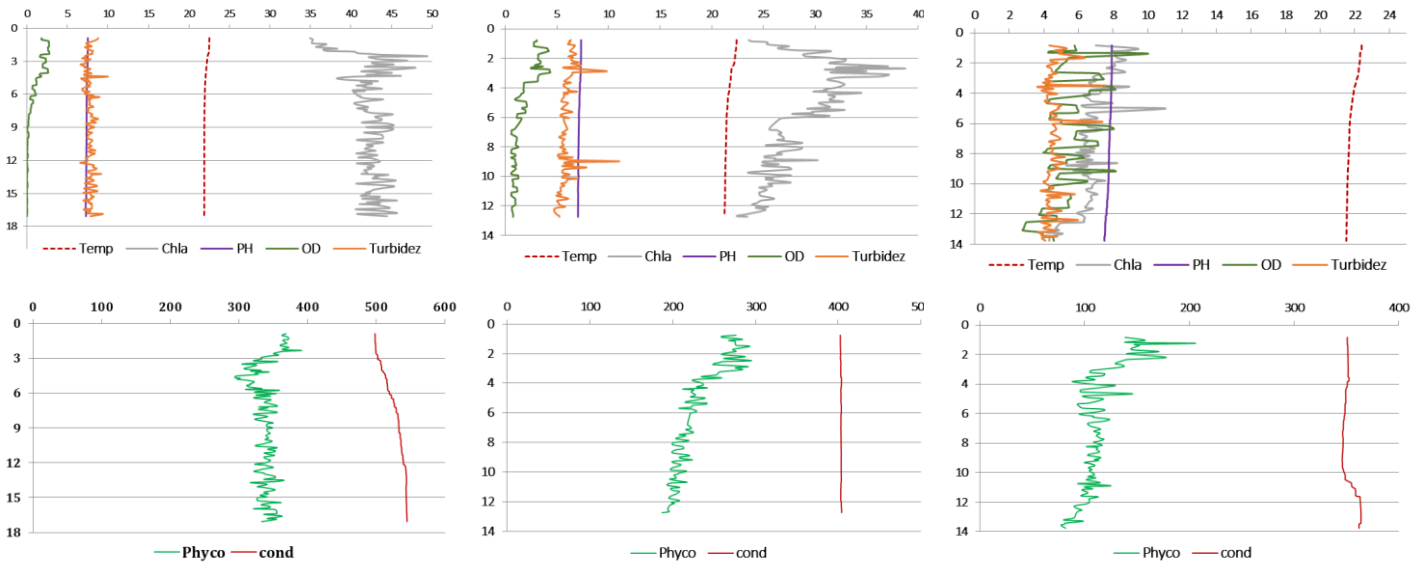
As análises de qualidade da água e do sedimento evidenciaram altas concentrações de nutrientes, principalmente fósforo e nitrogênio (gráficos **d**, **f** e **g**). Os dados indicam desequilíbrio nutricional e variações espaciais marcantes entre os pontos amostrados, refletindo distintos processos de aporte e ciclagem de nutrientes.

As concentrações de nitrito e nitrato em água indicam processos de nitrificação incompleta e alta disponibilidade de nitrogênio oxidado, condições que favorecem o crescimento fitoplanctônico quando associadas ao excesso de fósforo, um cenário típico de ambientes eutrofizados (POMPÊO *et al*., 2020). A presença de amônio apenas no braço do Tietê sugere a entrada de esgotos e condições redutoras na coluna d'água, indicando aporte antrópico. O fósforo total (gráfico **d**) foi o parâmetro mais crítico, excedendo amplamente os limites da Resolução CONAMA 357/2005, o que caracteriza o sistema como hipereutrófico, com forte influência de fontes externas de nutrientes e de liberação interna de fósforo a partir do sedimento, principalmente em ambiente anóxico (BUZELLI et al., 2013).

No sedimento, as concentrações de fósforo (gráfico **f**) confirmam enriquecimento significativo e alto potencial de remobilização sob condições redutoras, funcionando como um reservatório ativo de fósforo. Essa dinâmica reforça a importância do sedimento como fonte secundária de nutrientes, mantendo a eutrofização mesmo com redução de aportes externos, fenômeno já relatado por YANG *et al*. (2020) no lago eutrófico Chaochu, na China.

O Índice de Estado Trófico (IET) (gráfico **h**) classificou todos os pontos como hipereutróficos, corroborando os altos valores de clorofila-a e a presença de florações de cianobactérias, esse fenômeno é comum em sistemas tropicais eutrofizados, como descrito em diversos estudos de Pompêo e colaboradores. Estudos anteriores (BUZELLI *et al*., 2013) já apontavam essa condição em Barra Bonita, sugerindo processo crônico de eutrofização e possível agravamento em alguns setores, especialmente no braço do Tietê.

O padrão espacial e de perfis observados na coluna de água, confirma a heterogeneidade do sistema Tietê–Piracicaba, com acúmulo de nutrientes próximo às entradas dos afluentes e à zona de mistura. O reservatório de Barra Bonita, por ser o primeiro da cascata do rio Tietê, acumula poluentes da Região Metropolitana de São Paulo, permanecendo vulnerável à eutrofização devido ao tratamento insuficiente de esgotos e à falta de controle de fontes difusas - evidências já retratadas por POMPÊO *et al.* (2019; 2020), vistos nos gráficos de **i** a **n** da figura 04.



Gráficos i e l: Perfis do P1 (Tietê). **Gráficos j e m:** Perfis do P2 (Mistura) **Gráficos k e n:** Perfis do P3 (Piracicaba)
Figura 04: Gráficos com resultados dos perfis dos pontos de amostragem. **Fonte:** Os autores (2025).

A análise de perfis nos três pontos de amostragem evidencia diferenças limnológicas relevantes entre os braços do reservatório de Barra Bonita. Foram observadas variações mais pronunciadas, tanto verticais quanto espaciais, entre os braços e a zona de mistura, especialmente nas variáveis oxigênio dissolvido, clorofila *a*, ficocianina e condutividade elétrica, sugerindo uma leve melhora nas concentrações no rio Piracicaba e uma piora no rio Tietê. O braço do Tietê tende a apresentar condutividade mais elevada e condições mais propícias à intensificação de processos de decomposição de matéria orgânica em profundidade, enquanto o braço do Piracicaba parece exibir melhor oxigenação e menor biomassa fitoplanctônica, indicando uma possível função de amortecimento ambiental. Padrões semelhantes já foram discutidos na literatura, como em Buzelli e Cunha-Santino (2013), embora poucos estudos descrevam de forma integrada todos os aspectos observados neste trabalho.

Considerações Finais

Os resultados confirmam a forte influência antrópica sobre o reservatório de Barra Bonita, especialmente no braço do rio Tietê, que apresentou as piores condições de qualidade da água, com altas concentrações de fósforo total, clorofila-*a* e ficocianina, além de baixos níveis de oxigênio dissolvido. Tais condições configuram um estado hipereutrófico e severa

degradação ambiental, ultrapassando os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 (BRASIL, 2005). Em contraste, o braço do rio Piracicaba demonstrou melhores condições limnológicas, com maior oxigenação e menor biomassa fitoplanctônica, atuando como zona de diluição natural. No entanto, a persistência de altas cargas externas e internas de nutrientes indica risco de degradação progressiva, caso não haja controle efetivo das fontes poluidoras. De modo geral, o estudo confirma que o reservatório continua submetido a intensos aportes de nutrientes, tanto de origem externa (escoamento urbano e agrícola) quanto interna (ressuspensão do sedimento), o que reforça a necessidade de ações efetivas de controle de carga poluidora e gestão integrada da bacia hidrográfica para reverter o processo de eutrofização crônica.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), a Universidade de São Paulo (USP) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pelo apoio financeiro recebido. Ao professor Marcelo Pompêo pela utilização de seus laboratórios e toda instrução e aulas ministradas.

Referências Bibliográficas

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA**.** *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington, D.C.: APHA/AWWA/WEF, 2005.

BRAMORSKI, J.; VILLELA, S. M. Avaliação da qualidade de sedimentos dos rios Tietê e Piracicaba nos seus compartimentos de entrada no reservatório de Barra Bonita (SP). Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. DOI: https://doi.org/10.11606/D.18.2004.tde-10062008-212034.

BRAMORSKI, Julieta. Avaliação da qualidade de sedimentos dos rios Tietê e Piracicaba nos seus compartimentos de entrada no reservatório de Barra Bonita, SP. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

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. Diário Oficial da União**,** seção 1, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BUZELLI, G. M.; CUNHA-SANTINO, M. B. Avaliação da qualidade da água e do sedimento do reservatório de Barra Bonita (SP). *Ambiente & Água*, v. 8, n. 2, p. 118-132, 2013.

BUZELLI, G. M.; MOSCHINI-CARLOS, V.; POMPÊO, M.; et al. Diagnóstico da qualidade da água e do sedimento do reservatório de Barra Bonita (SP). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 2, p. 181-193, 2013.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo: Apêndice E – Índices de qualidade das águas, critérios de avaliação da qualidade dos sedimentos e indicador de controle de fontes*. São Paulo: CETESB, 2021. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/12/2022/11/Apendice-E-Indices-de-Qualidade-das-Aguas.pdf. Acesso em: 02 nov. 2025.

CETESB — Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo – 2005*. São Paulo: CETESB, 2005.

LAMPARELLI, M. C. Graus de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. 2004. 238 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MAIA, J. L.; MAUAD, F. F.; VENÂNCIO, S. S.; TEIXEIRA, F. J.; LOUREIRO, D. D. T.; ALBERTIN, L. L. Qualidade da água do reservatório de Barra Bonita (SP): análise temporal em diferentes profundidades. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, 2007. Disponível em:https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/151/55704c9724333

b6b21366c28f1423e4d_64a26775a1f858cd4da141fa10c2bacd.pdf. Acesso em: 4 nov. 2025.

POMPÊO, M. L. M. et al. Nitrogen and phosphorus in cascade multi-system tropical reservoirs: water and sediment. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 32, e22, 2020.

POMPÊO, M. L. M.; CARDOSO-SILVA, S.; FIGUEIRA, R. C. L.; MOSCHINI-CARLOS, V. (Org.). *Limnologia de reservatórios: do clássico às novas abordagens*. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2024.

POMPÊO, M. L. M.; Cardoso-Silva, S.; Moschini-Carlos, V.; Figueira, R. C. L. (2019). O crônico problema da qualidade das águas brutas em São Paulo: críticas e sugestões. São Paulo: Instituto de Biociências da USP.

PRADO, R. B.; NOVO, E. M. L. de M. Avaliação espaço-temporal da relação entre o estado trófico do reservatório de Barra Bonita (SP) e o potencial poluidor de sua bacia hidrográfica. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia, v. 19, n. 2, dez. 2007.

PRADO, R. B.; NOVO, E. M. L. M. Avaliação espaço-temporal da relação entre o estado trófico do reservatório de Barra Bonita (SP) e o potencial poluidor de sua bacia hidrográfica. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2011. DOI: https://doi.org/10.1590/S1982-45132007000200001.

SILVA, D. B.; COTRIM, M. E. B. Qualidade da água e sedimento em reservatório. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. DOI: https://doi.org/10.11606/D.85.2016.tde-08072016-103350.

TUNDISI, J. G. *et al*. Reservatórios do Sudeste do Brasil: bases científicas para o gerenciamento e uso sustentável. São Carlos: IIE, 2008.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Instituto de Biociências. Portal de Ecologia Aquática: protocolos analíticos. Disponível em: http://143.107.246.244/portal/index.php?option=com_docman&Itemid=425. Acesso em: 12 nov. 2025.

YANG, C.; YANG, P.; GENG, J.; YIN, H.; CHEN, K. Sediment internal nutrient loading in the most polluted area of a shallow eutrophic lake (Lake Chaohu, China) and its contribution to lake eutrophication. *Environmental Pollution*, v. 262, p. 114292, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114292.

ESTUDO COMPARATIVO DA EFICÁCIA DE INATIVAÇÃO MICROBIOLÓGICA: RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA, CLORAÇÃO E OZONIZAÇÃO EM ÁGUAS SUPERFICIAIS DO RIO RIOZINHO (IRATI - PR)

1 Angelo Sarna, 2 Amanda Maria de Lara, 3 Eduardo Mehret, 4 Jeanette Beber de Souza, 5 Jeniffer Bianca Palhano, 6 Mylena Maria Bida.

1 UNICENTRO, e-mail: angelo3210000@gmail.com; 2 UNICENTRO, e-mail: mandzzlara@gmail.com; 3 UNICENTRO, e-mail: mehreteduardo@gmail.com; 4 UNICENTRO, e-mail: jeanettebeber@yahoo.com; 5 UNICENTRO, e-mail: jeniffer.palhano@escola.pr.gov.br; 6 UNICENTRO, bidamylena@gmail.com

Palavras-chave: Qualidade de água; Ecotoxicologia; Desinfecção.

Introdução

A qualidade da água em rios urbanos é resultado direto da interação entre fatores naturais e antrópicos, refletindo o uso e ocupação do solo e o manejo de efluentes. Em municípios como Irati (PR), o Riozinho constitui um importante corpo hídrico receptor de efluentes tratados, sendo fundamental monitorar seu estado ambiental e a eficiência das tecnologias empregadas no tratamento de esgoto.

A presença de matéria orgânica, turbidez e microrganismos indicadores, como *Escherichia coli*, compromete tanto a saúde pública quanto os usos múltiplos da água. A avaliação integrada entre parâmetros físico-químicos, microbiológicos e ecotoxicológicos permite compreender os riscos associados ao lançamento de efluentes (Tessaro et al., 2021; Costa et al., 2020).

Os processos de desinfecção, etapa final do tratamento, têm como objetivo promover a inativação de microrganismos patogênicos. No Brasil, a cloração ainda é amplamente utilizada pela sua eficácia, simplicidade operacional e baixo custo; contudo, apresenta desvantagens, como formação de subprodutos tóxicos e presença de residual com potencial de causar impactos ambientais (Peres et al., 2022). Tecnologias como a ozonização e a radiação ultravioleta (UV), cada vez mais estudadas no país, surgem como alternativas viáveis, com elevada eficiência microbiológica e menor risco ecotoxicológico, já que não deixam residual na água tratada (Rodrigues; Daniel, 2021; Moraes et al., 2023).

Além disso, a avaliação ecotoxicológica por meio de organismos bioindicadores, como Daphnia magna, fornece informações fundamentais sobre os efeitos reais dos efluentes no ambiente aquático. A espécie é recomendada por normas internacionais e nacionais devido à sua sensibilidade e rápida resposta a contaminantes (ABNT, 2016; Guilhermino et al., 2019).

Dessa forma, o presente estudo realiza uma análise comparativa entre métodos de desinfecção (cloro, ozônio e UV) aplicados à água do Riozinho, avaliando a eficiência microbiológica e os efeitos ecotoxicológicos por meio de bioensaios com *Daphnia magna*, integrando a análise legal sob as Resoluções CONAMA 357/2005 e 430/2011.

Material e Métodos

A coleta ocorreu no Riozinho, próximo à zona de mistura do lançamento da ETE de Irati–PR. Foram coletados 40 L de água em frascos estéreis de PEAD, devidamente higienizados, identificados e transportados ao laboratório. A água bruta foi analisada conforme o Standard Methods (APHA, 2017): cor aparente (455 nm); turbidez (NTU); absorbância a 254 nm (A254) - matéria orgânica aromática e *E. coli* pelo método de membrana filtrante (0,45 µm) em meio Chromocult.

Para a cloração a desinfecção foi realizada com hipoclorito de sódio (NaClO), na dose de 10 $mg \cdot L^{-1}$, com 20 min de contato. Após o período de reação, efetuou-se descloração com tiossulfato de sódio. O residual foi analisado pelo método DPD.

A ozonização foi conduzida com o concentrador de oxigênio Everflo Philips (5 LPM) e o ozonizador BRO3-Plus1 (Brasil Ozônio). As amostras foram submetidas ao ozônio por 15 min em reator de batelada com difusão contínua. Na radiação ultravioloeta (UV) utilizou-se lâmpada UVC (254 nm), 15 W, instalada em reator fotoquímico de 27 L, com lâmina de água de 8 cm. O tempo de exposição foi de 120 s.

Os testes de toxicidade aguda com *Daphnia Magna* seguiram a OECD 202 e ABNT NBR 12713. Foram preparadas três réplicas para cada tratamento, em béqueres de 50 mL, contendo 10 organismos por réplica. As amostras testadas foram: água do rio (bruta); água tratada com cloro; água tratada com UV e água tratada com ozônio. As mortalidades foram registradas em 24 h e 48 h. A avaliação considerou indivíduos imobilizados ou mortos. A *Daphnia magna* é altamente sensível a oxidantes como o cloro, devido ao dano às brânquias, alterações osmóticas e estresse oxidativo, sendo amplamente utilizada em estudos nacionais recentes (Silva et al., 2023; Santos; Oliveira, 2022).

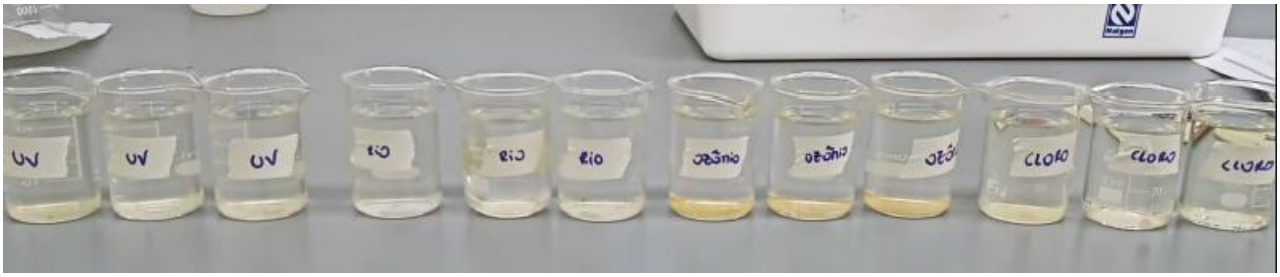


Figura 01: Triplicatas dos tratamentos (UV, rio, ozônio e cloro) preparadas para o ensaio ecotoxicológico com *Daphnia*.
Fonte: Autores (2025)

Foram repetidas as análises de turbidez, cor e *E. coli*. A eficiência foi calculada por redução logarítmica:

$$logred = log10(N0) - log10(N)$$

Resultados e Discussão

PARÂMETRO	VALOR	UNIDADE
Cor aparente	55	UC
Turbidez	17,7	NTU
Absorbância 254 nm	0,159	-
E. coli (N0)	Valor elevado*	UFC/100mL

Tabela 01: Características da água bruta do Rio Riozinho.
Fonte: Autores (2025)

Os valores de turbidez e absorbância indicam presença moderada de sólidos e matéria orgânica, comportamento típico em rios urbanos do sul do Brasil (Costa et al., 2020; Tessaro et al., 2021). Esses parâmetros influenciam diretamente a eficácia dos desinfetantes, a turbidez diminui a transmissão de UV (Rodrigues; Daniel, 2021), a matéria orgânica aumenta a demanda química de cloro (Peres et al., 2022) e substâncias húmicas reagem com oxidantes como ozônio (Moraes et al., 2023).

Método de desinfecção	N final (UFC/100mL)	Tempo de contato	Residual	Log de remoção
Cloro	10	20 min	0,45 mg/L	7,7
UV	1	120 s	Sem residual	8,3
Ozônio	40	15 min	Sem residual	6,7

Tabela 02: Características pós-desinfecção.
Fonte: Autores (2025)

A Radiação UV foi o método mais eficiente, com 8,3 log de remoção e apenas 1 UFC/100 mL. Resultados semelhantes são registrados em estudos brasileiros aplicados a efluentes domésticos, mostrando elevada eficiência e ausência de subprodutos (Rodrigues & Daniel, 2021; Moraes et al., 2023).

A cloração apresentou 7,7 log de remoção, porém o residual gerou toxicidade aguda total (100% de mortalidade). Estudos nacionais também confirmam alta toxicidade de resíduos de cloro para organismos aquáticos (Santos & Oliveira, 2022; Peres et al., 2022). A cloração permanece eficiente, porém requer forte controle operacional.

A ozonização apresentou 6,7 log de redução e nenhuma toxicidade nos bioensaios. No Brasil, a ozonização vem ganhando destaque em pesquisas pela eficiência microbiológica e baixo impacto ecotoxicológico (Moraes et al., 2023).

Os resultados da toxicidade com D*aphia Magna* foram: UV e Ozônio com nenhuma mortalidade, o rio (in natura) apresentou duas mortes em 48 h (baixa toxicidade) e o cloro teve 100% de mortalidade em 24 h. A literatura brasileira reforça que o cloro livre é altamente prejudicial à *Daphnia magna*, mesmo em baixas concentrações, devido à oxidação de tecidos sensíveis (Silva et al., 2023). Assim, a ecotoxicidade se mostrou um diferencial essencial entre os métodos.

Considerações finais

O estudo demonstrou que a água do Riozinho apresenta características típicas de um rio urbano, com moderada turbidez e matéria orgânica. Os três métodos testados foram eficientes na desinfecção microbiológica, contudo, diferiram amplamente em seus impactos ecotoxicológicos.

A radiação UV apresentou a maior eficiência e nenhuma toxicidade, configurando-se como alternativa segura e ambientalmente compatível. A ozonização também se mostrou eficiente e sem efeitos adversos para *Daphnia magna*, destacando-se como tecnologia promissora para aprimoramento de ETEs brasileiras. A cloração, embora efetiva, demonstrou forte toxicidade devido ao residual, confirmando a necessidade de rigoroso controle e descloração antes do lançamento.

Assim, o estudo reforça a importância de integrar análises microbiológicas e ecotoxicológicas no monitoramento de efluentes, oferecendo subsídios para escolhas tecnológicas mais sustentáveis no tratamento de águas e esgotos.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12713: ecotoxicologia aquática - toxicidade aguda - método de ensaio com Daphnia spp. **Rio de Janeiro:** ABNT, 2016.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 23. ed. Washington: APHA, 2017.

COSTA, M. A.; LOPES, A. S.; RIBEIRO, V. J. **Avaliação da qualidade de rios urbanos no sul do Brasil.** Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, 2020.

GUILHERMINO, L. et al. **Sensibilidade de microcrustáceos a contaminantes oxidantes.** Ecotoxicology, London, 2019.

MORAES, F.; SARTORI, A.; MACHADO, R. **Avaliação de tecnologias oxidativas avançadas no tratamento de efluentes.** Revista DAE, São Paulo, 2023.

PERES, L.; SANTOS, J.; FERREIRA, R. **Avaliação da toxicidade de desinfetantes clorados em ambientes aquáticos.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 2022.

RODRIGUES, A.; DANIEL, L. **Eficiência da radiação UV na inativação de coliformes em águas residuárias.** Revista Ambiente & Água, Taubaté, 2021.

SANTOS, M.; OLIVEIRA, G. **Toxicidade de oxidantes residuais para organismos aquáticos nativos.** Ciência e Natura, Santa Maria, 2022.

SILVA, J.; ANDRADE, M.; OLIVEIRA, L. **Impactos ecotoxicológicos do cloro residual em microcrustáceos.** Acta Limnologica Brasiliensia, Botucatu, 2023.

TESSARO, A.; LIMA, E.; ROCHA, C. **Parâmetros de qualidade da água em rios receptores de efluentes.** Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, 2021.

VON GUNTEN, U. **Ozonation in water treatment:** principles and impacts. Water Research, Amsterdam, 2018.

ANÁLISE PRELIMINAR DA INFLUÊNCIA DE PLACAS SOLARES COMO SUPERFÍCIE DE COLETA NA QUALIDADE DA ÁGUA DE CHUVA

1Viviane Sabino Teles, 2Thyago Torres de Castro Gama, 3Milleny Mikelly Reinaldo da Costa, 4João Henrique Nogueira dos Santos, 5Lucas Otávio Lourenço Lima, 6Silvio Pereira Neto, 7Paula Tereza de Souza e Silva, 8Miriam Cleide Cavalcante de Amorim

1 Universidade Federal do Vale do São Francisco, e-mail: viviane.teles@discente.univasf.edu.br; 2 Universidade Federal do Vale do São Francisco, e-mail: thyago.gama@discente.univasf.edu.br; 3 Universidade Federal do Vale do São Francisco, e-mail: milleny.costa@discente.univasf.edu.br, 4 Universidade Federal do Vale do São Francisco, e-mail: joão.henriquenogueira@discente.univasf.edu.br, 5 Universidade Federal do Vale do São Francisco, e-mail: lucas.lourenço@discente.univasf.edu.br, 6 Universidade Federal do Vale do São Francisco, e-mail: silvio.pereira@discente.univasf.edu.br, 7 Paula Tereza de Souza e Silva, email: paula.silva@embrapa.br, 8 Universidade Federal do Vale do São Francisco, e-mail: miriam.cleide@discente.univasf.edu.br.

Palavras-chave: Captação pluvial; Metais; Placas fotovoltaicas.

Introdução

Segundo relatório conjunto da Organização Mundial da Saúde (OMS) e do UNICEF, divulgado durante a Semana Mundial da Água de 2025, aproximadamente 2,1 bilhões de pessoas no mundo ainda não têm acesso à água potável manejada de forma segura (OMS; UNICEF, 2025). No semiárido nordestino, predominam rios intermitentes, irregularidade espacial e temporal das precipitações, baixos índices pluviométricos, elevadas temperaturas e altas taxas de evaporação, além da concentração das chuvas em poucos meses do ano. Nesse cenário, aliado à ausência de universalização dos sistemas de abastecimento, o aproveitamento de água de chuva configura-se como alternativa estratégica para mitigação da escassez hídrica, inclusive com potencial para fins potáveis (Silva; Alcoforado, 2026).

Sistemas de captação e armazenamento de água de chuva podem representar solução viável de suprimento hídrico, desde que adequadamente planejados e dimensionados. Para isso, devem ser considerados fatores como regime pluviométrico local, área e tipo de superfície de captação, coeficiente de escoamento, materiais empregados na cobertura e possíveis perdas no sistema (García-Ávila *et al.*, 2023).

A qualidade da água pluvial é influenciada por diversos aspectos ambientais e estruturais, entre os quais se destacam a localização geográfica da área de captação, o uso e ocupação do solo, a presença de vegetação e as condições da superfície de coleta. Impurezas depositadas, como partículas atmosféricas e resíduos orgânicos, bem como os materiais utilizados em coberturas e reservatórios, podem contribuir para alterações físicas, químicas e microbiológicas da água armazenada (Finkler *et al.*, 2023). Nesse sentido, o fenômeno conhecido como *first flush* — o escoamento inicial associado aos primeiros milímetros de chuva — exerce grande influência na qualidade da água captada em sistemas de aproveitamento, pois tende a carrear a maior parte das impurezas acumuladas sobre as superfícies de captação, como sólidos suspensos, material particulado atmosférico e outros contaminantes. Estudos recentes demonstram que a água de *first flush* pode apresentar concentrações elevadas de parâmetros indesejáveis e que a sua exclusão pode contribuir significativamente para a melhoria da qualidade do volume coletado posteriormente (Maykot, Vaz & Ghisi, 2025).

A definição dos usos mais adequados para a água da chuva está diretamente relacionada às suas características qualitativas e aos padrões normativos vigentes. No Brasil, a ABNT NBR 15527:2019 estabelece diretrizes para o aproveitamento de águas pluviais para fins não potáveis, indicando requisitos e parâmetros de qualidade a serem observados para usos como descarga sanitária, irrigação e lavagem de áreas externas. Entretanto, quando há destinação para consumo humano, a água deve atender aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888, de 2021, do Ministério da Saúde, que dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano.

Paralelamente, a utilização de painéis solares tem crescido significativamente em escala global, impulsionada pela transição energética e pela ampliação do uso de fontes renováveis em edificações residenciais e comerciais (David *et al.*, 2025). Em países em desenvolvimento, esse avanço também é expressivo, sendo favorecido por políticas de incentivo e maior conscientização ambiental (Oliva; Santamaria, 2025). Diante da crescente inserção de placas solares em edificações, torna-se relevante investigar possíveis interações entre essas superfícies e sistemas de captação de água de chuva, uma vez que sua constituição física envolve materiais que, sob degradação, podem impactar o meio ambiente. A anatomia desses dispositivos inclui vidro frontal temperado, células de silício dopadas, encapsulantes poliméricos e diversos metais em seus contatos elétricos, soldas e semicondutores, como o Chumbo (Pb), Cádmio (Cd), Cobre (Cu) e Prata (Ag). A exposição contínua a altos níveis de radiação UV e estresse térmico no semiárido pode comprometer a isolação hermética desses componentes, que podem influenciar diretamente a qualidade da água armazenada (Fonseca, 2020).

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a qualidade físico-química da água de chuva coletada diretamente a céu aberto e após escoamento sobre superfície contendo placas solares, analisando a influência dessa cobertura nos parâmetros de qualidade da água.

Material e Métodos

O estudo foi realizado no campus da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), localizado em Juazeiro, Bahia (9,41° S; 40,50° O), apresentando clima classificado como BSwh', segundo Köppen-Geiger, caracterizado por elevadas temperaturas médias anuais (superiores a 24 °C) e precipitação média anual em torno de 529 mm, com chuvas concentradas em poucos meses do ano (Embrapa, 2010).

Foram utilizados dois reservatórios com capacidade volumétrica de 500 L, confeccionados em polietileno, posicionados em área externa do campus. A Caixa 1 foi instalada a céu aberto, sem qualquer superfície de captação superior, recebendo diretamente a precipitação pluvial. A Caixa 2 foi posicionada sob a projeção de uma estrutura coberta composta por módulos fotovoltaicos, com superfície de vidro e estrutura de suporte metálica e vigamento em madeira, de modo a permitir o escoamento da água precipitada sobre as placas diretamente para o interior do reservatório.

Os reservatórios foram expostos à precipitação por período inferior a 24 horas, entre os dias 20 e 21 de outubro de 2025. Após o evento de chuva, foram coletados aproximadamente 2 L de água de cada reservatório para realização das análises laboratoriais. As análises físico-químicas foram realizadas em triplicata no Laboratório de Engenharia Ambiental (LEA) da UNIVASF, conforme os procedimentos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (*APHA, 2023). Determinou-se os parâmetros pH, turbidez, cor aparente e sólidos totais (ST), sendo todas as análises realizadas em triplicata, a fim de garantir maior confiabilidade aos resultados obtidos. As análises de metais foram realizadas em laboratório especializado da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA Semiárido). É importante salientar que o estudo possui caráter exploratório preliminar, tendo sido avaliado um único evento pluviométrico, com o objetivo de identificar possíveis tendências iniciais quanto à influência da superfície fotovoltaica na qualidade da água coletada.

Resultados e Discussão

A água coletada nas duas condições experimentais apresentou diferenças em alguns parâmetros físico-químicos, indicando possível influência da superfície de contato na qualidade da água armazenada. Os resultados médios obtidos para as análises de pH, turbidez, condutividade elétrica, cor e sólidos totais estão expressos na Tabela 1.

Amostra	pH	Turbidez (NTU)	Cor (μC)	Sólidos Totais (mg/L)
Caixa 1	7,72	2,86	2,47	102,67
Caixa 2	7,61	4,39	0,57	140,67

Tabela 01: Resultados dos parâmetros de pH, turbidez, condutividade elétrica, cor e sólidos totais. Fonte: Autoria própria (2026)

Os valores médios de pH indicam caráter levemente alcalino em ambas as caixas. Esses resultados situam-se dentro da faixa recomendada pela Portaria GM/MS nº 888/2021 para água destinada ao consumo humano (6,0 a 9,0), bem como na ABNT NBR 15527:2019. O comportamento levemente alcalino pode estar associado à dissolução de partículas minerais presentes na atmosfera, à poeira característica da região semiárida e à possível influência dos materiais das superfícies de captação e armazenamento. Assim, sob o ponto de vista do pH, a água analisada não apresenta restrições para usos não potáveis e, isoladamente, também atende ao padrão de potabilidade.

Em relação aos parâmetros estéticos, a cor aparente apresentou valores inferiores ao limite de 15 uH estabelecido pela Portaria, sendo que a ABNT NBR 15527:2019 não fixa valor máximo para esse parâmetro. A cor aparente está relacionada tanto à presença de substâncias dissolvidas quanto de partículas em suspensão, podendo refletir a influência de material particulado atmosférico e de resíduos depositados sobre a superfície de captação.

De forma complementar, a turbidez decorre da existência de materiais orgânicos e inorgânicos finamente divididos, incluindo microrganismos, podendo representar risco à qualidade sanitária da água, uma vez que essas partículas podem proteger microrganismos e dificultar sua remoção ou inativação, além de comprometer o aspecto visual (Henriques *et al.*, 2012). No presente estudo, foram observados valores de 2,86 NTU na Caixa 1 e 4,39 NTU na Caixa 2. O aumento discreto na segunda amostra pode estar associado ao arraste de poeira, material particulado atmosférico e resíduos orgânicos acumulados na superfície das placas solares. Apesar da diferença entre as amostras, ambas permanecem em conformidade com o valor máximo permitido (VMP) de 5 uT estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021 e pela ABNT NBR 15527:2019.

Os valores para ST (102,67 mg/L na Caixa 1 e 140,67 mg/L na Caixa 2), evidenciam maior concentração de material dissolvido e/ou em suspensão na segunda amostra. Essa diferença pode estar associada à deposição prévia de partículas atmosféricas, poeira e resíduos orgânicos sobre a superfície de captação, bem como à ausência do descarte da primeira água de chuva (*first flush*), que tende a concentrar impurezas acumuladas entre eventos pluviométricos. Considerando que os ST englobam tanto sólidos dissolvidos quanto suspensos, sua variação reflete diretamente as condições ambientais e estruturais do sistema. Segundo a Portaria, o VMP para sólidos totais dissolvidos é de 500 mg/L. Dessa forma, ambas as amostras se encontram abaixo do valor máximo permitido.

A análise das concentrações de metais (Tabela 3) evidenciou diferenças entre as duas condições de captação avaliadas. Com as maiores concentrações ocorrendo na Caixa 2, posicionada sob a cobertura com placas solares, o ferro ultrapassou o VMP de 0,3 mg/L estabelecido pela Portaria. Embora o ferro não represente, em geral, risco toxicológico significativo nas concentrações

encontradas no presente estudo, sua presença acima do VMP pode comprometer aspectos organolépticos e indicar possível contribuição de processos de corrosão ou carreamento de partículas metálicas presentes na estrutura de suporte das placas solares, também sendo possível estar associado à lixiviação de traços de ferro presentes no vidro frontal dos módulos (Machado, 2024).

Amostra	Zinco (mg/L)	Cobre (mg/L)	Manganês (mg/L)	Ferro (mg/L)	Níquel (mg/L)	Chumbo (mg/L)	Cromo (mg/L)	Cádmio (mg/L)
Caixa 1	0,003	0,001	0,023	0,176	<LD	<LD	0,005	0,002
Caixa 2	0,034	0,112	0,045	0,452	<LD	0,034	0,021	0,004

Tabela 03: Resultados das análises de metais.
Fonte: Autoria própria (2026)

Situação mais preocupante foi observada para o chumbo, que apresentou concentração abaixo do limite de detecção na Caixa 1 e 0,034 mg/L na Caixa 2, valor mais de três vezes superior ao VMP de 0,01 mg/L. A exposição ao chumbo pela ingestão de água contaminada está associada a efeitos adversos graves à saúde humana, incluindo danos ao sistema nervoso central, desenvolvimento cognitivo prejudicado em crianças e disfunções de órgãos, e não existe um nível de chumbo considerado seguro para consumidores (OMS, 2024). Considerando o elevado potencial tóxico do chumbo, especialmente por seu caráter bioacumulativo, o resultado sugere possível deposição atmosférica associada a emissões veiculares ou industriais, bem como as fitas de interconexão e pastas de solda de estanho-chumbo que conectam as células fotovoltaicas (Góes *et al.,* 2023).

O cádmio também apresentou incremento entre as amostras, sendo que na segunda condição houve leve ultrapassagem do VMP (0,003 mg/L). Embora a diferença absoluta seja pequena, o resultado reforça a hipótese de que a superfície das placas solares pode atuar como área de retenção de material particulado contendo metais-traço.

Os metais zinco, cobre, manganês e cromo permaneceram abaixo do VMP em ambas as amostras. Entretanto, todos apresentaram aumento na Caixa 2, indicando tendência de enriquecimento metálico associada à superfície de captação. O níquel permaneceu abaixo do limite de detecção, não sendo possível inferir influência significativa nas condições avaliadas. Estudos sobre gestão e reaproveitamento de resíduos de painéis solares indicam que os módulos de primeira geração são constituídos majoritariamente por silício, vidro, alumínio, cobre e prata, além de conterem materiais potencialmente tóxicos, como cádmio, chumbo e outros metais pesados (Góes *et al.*, 2023). Embora esses elementos estejam estruturalmente incorporados ao módulo, processos de intemperismo, deposição atmosférica e lixiviação superficial podem favorecer a mobilização de traços metálicos durante eventos de precipitação, especialmente no escoamento inicial da chuva.

De forma integrada, os resultados sugerem que a superfície das placas solares pode atuar tanto como meio de acúmulo de partículas atmosféricas quanto como potencial fonte secundária de metais, que são mobilizados pelo escoamento inicial. Considerando que o tempo de exposição foi inferior a 24 horas, as diferenças observadas indicam que mesmo períodos curtos de deposição podem ser suficientes para alterar a composição química da água captada.

Ressalta-se que o estudo possui caráter preliminar, sendo recomendável a realização de coletas em diferentes eventos pluviométricos e períodos de estiagem para avaliação da variabilidade temporal e confirmação da tendência observada. Apontando para a necessidade de adoção de dispositivos de descarte da primeira água (*first flush*) em sistemas de aproveitamento de águas pluviais instalados sob coberturas com placas solares.

Considerações Finais

Os parâmetros físico-químicos analisados apresentaram valores compatíveis com características da água de chuva e permaneceram dentro dos limites estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021, bem como em conformidade com a ABNT NBR 15527:2019 no que se refere aos usos não potáveis. Observou-se, entretanto, tendência de valores ligeiramente mais elevados na Caixa 2 para turbidez, condutividade elétrica e sólidos totais, indicando maior incorporação de partículas e íons possivelmente associados ao arraste de material depositado sobre a cobertura com placas solares.

A análise de metais revelou comportamento distinto entre as condições avaliadas. Verificou-se incremento na Caixa 2, com destaque para ferro, chumbo e cádmio. O ferro ultrapassou o valor máximo permitido, enquanto o chumbo apresentou concentração mais de três vezes superior ao limite normativo, configurando potencial restrição ao uso para consumo humano sem tratamento prévio. O cádmio também apresentou valor ligeiramente acima do padrão estabelecido.

Os resultados obtidos, embora preliminares, evidenciam que a qualidade da água pluvial é influenciada e pela interação com a placa fotovoltaica como superfícies de captação, que favorecem o acúmulo e a posterior lixiviação de metais durante os eventos pluviométricos. Recomenda-se aprofundamento dos estudos ampliando o período de coleta de amostras. Assim como adoção de dispositivos de descarte da primeira água (*first flush*), manutenção periódica das superfícies de captação e controle analítico contínuo, especialmente em sistemas associados a coberturas com placas solares.

Referências Bibliográficas

APHA, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, WATER ENVIRONMENTAL FEDERATION. Standard Methods of the Examination of Water and Wastewater. Ed. 22, ALPHA/AWWA/WEF, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15527:2019. Água de chuva — Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis — Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 7 maio 2021.

DANIELLA, Machado. **REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE VIDRO DE PLACAS FOTOVOLTAICAS SOLAR, COMO COMPÓSITO GEOPOLIMÉRICO NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. 2024. 85 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) - Instituto de Engenharia, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba, 2024.

DAVID, Robby Pahlevi *et al.* Utilization of solar panels in various applications: A systematic literature review. *In*: Basel Switzerland: MDPI, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/engproc2025107033.

FINKLER, Laís Andressa *et al.* Avaliação da qualidade da água da chuva em um município da região das Missões/RS, suas potencialidades de uso e possíveis tratamentos: Evaluation of rainwater quality in a municipality of the Missões/RS region, its potential for use and possible treatments. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 6, n. 3, p. 2728–2735, 2023. DOI: 10.34188/bjaerv6n3-059.

FONSECA, José Eduardo Ferreira da. **AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO EM SISTEMAS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA**. 2020. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) -Escola de Engenharia, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, Porto Alegre, 2020.

FUNDO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A INFÂNCIA (UNICEF). 1 em cada 4 pessoas em todo o mundo ainda não tem acesso à água potável, afirmam OMS, UNICEF. Brasília, 26 ago. 2025. Disponível em: https://www.unicef.org/brazil/innocenti/brazil/comunicados-de-imprensa/1-em-cada-4-pessoas-em-todo-o-mundo-ainda-nao-tem-acesso-agua-potavel. Acesso em: 10 fev. 2026.

GARCÍA-ÁVILA, Fernando *et al.* Rainwater harvesting and storage systems for domestic supply: An overview of research for water scarcity management in rural areas. **Results in Engineering**, v. 18, n. 101153, p. 101153, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101153.

GÓES, Patrícia Fagundes *et al.* Resíduos de painéis solares fotovoltaicos: uma revisão dos impactos ambientais e toxicológicos. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 14, n. 8, p. 12528–12553, 2023. DOI: http://doi.org/10.7769/gesec.v14i8.2553.

GUIMARÃES LIMA, Clarissa *et al.* **Análise físico-química da água de cisterna como solução para a escassez hídrica no semiárido nordestino: um estudo de caso em Soledade-PB**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 33., 2025. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anaiseletronicos/33cbesa/310_tema_i.pdf.

HENRIQUES, J. A. *et al.* Potencial de Remoção de Turbidez de Água para o Abastecimento de Comunidades Rurais com o Uso da Moringa oleifera Lam. *In*: Campina Grande, Paraíba, Brasil: Instituto Nacional do Semiárido, 2012.

MAYKOT, Jéssica Kuntz; MARTINS VAZ, Igor Catão; GHISI, Enedir. Characterisation of first flush for rainwater harvesting purposes in buildings. **Water**, v. 17, n. 12, p. 1772, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/w17121772.

OLIVA, Edison Jair Duque; ATEHORTUA SANTAMARIA, Rodrigo. Decoding solar adoption: A systematic review of theories and factors of photovoltaic technology adoption in households of developing countries. **Sustainability**, v. 17, n. 12, p. 5494, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/su17125494.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Intoxicação por chumbo**. Genebra: OMS, 2024. Disponível em: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health. Acesso em: 10 fev. 2026.

SILVA, Selma Thais Bruno da; ALCOFORADO, Joaquim Luis Medeiros. Educação ambiental como prática social para o aproveitamento sanitariamente seguro de água de chuva no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Educação Ambiental,** São Paulo, v. 21, n. 1, p. 268–287, 2026. Disponível em: https://periodicos.unifesp.br/index.php/revbea/article/view/20645/14838.

TEIXEIRA, A.H.C. Informações Agrometeorológicas do Polo Petrolina, PE/Juazeiro, BA -1963 a 2009. Petrolina: Embrapa Semiárido. 2010. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/883657/1/SDC233.pdf. Acesso em: 10 fev. 2026.

AVALIAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DAS NASCENTES URBANAS DO MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE-MG

1 Daniely Cristina Simões Ferreira, 2 Fabiana da Conceição Pereira Tiago (orientadora)
1 Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), e-mail: engambdanielycsferreira@gmail.com; 2 Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), e-mail: fabsmicro@gmail.com.

Palavras-chave: Nascentes urbanas; Diagnóstico; Saúde.

Introdução:

Segundo a Marinha do Brasil (2022), cerca de 70% da superfície do planeta é coberta por água. Contudo, estima-se que somente 1% desse montante está disponível para consumo, o que significa que apenas uma pequena parte pode ser utilizada pelos seres vivos e nas atividades humanas, como irrigação de lavouras, abastecimento urbano e rural, geração de energia elétrica, entre outras. Essa escassa porção de água viável é encontrada principalmente em rios, lagos e aquíferos; porém, ela não está naturalmente disponível em condições adequadas para atender a todos os usos, e tampouco é distribuída igualmente no mundo.

Para a água ser considerada adequada para finalidades nobres, como o consumo direto, preparação de alimentos e higiene pessoal, ela deve atender a parâmetros de qualidade que, quando cumpridos, garantem um uso seguro. No Brasil, esses parâmetros são determinados pelo Ministério da Saúde, e estão descritos na portaria GM/MS nº 888/2021, que determina que a água potável deve estar em conformidade com a referência de substâncias químicas que representam risco à saúde e cianotoxinas, e com o padrão organoléptico de potabilidade. Além disso, ela deve estar de acordo com o padrão microbiológico, que engloba parâmetros de turbidez da água pós-filtração ou pré-desinfecção na Estação de Tratamento de Água (ETA); concentração residual de desinfetante e tempo de contato; coliformes totais, *Escherichia coli* e bactérias heterotróficas; e residual de desinfetante (portaria GM/MS nº 888/2021).

Percebe-se que, para ser considerada potável e segura para usos nobres, isto é, para finalidades que exigem qualidade superior, a água precisa atender a uma série de critérios, que são alcançados apenas após tratamentos específicos. Para assegurar a saúde da população brasileira e, por consequência, contribuir para o cumprimento das metas dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) 3 e 6 da Agenda 2030 - que, dentre outros aspectos, visam combater doenças de veiculação hídrica e universalizar o acesso à água -, seria necessário que todos os cidadãos do país tivessem acesso ao recurso em quantidade e qualidade adequada, o que, infelizmente, ainda não ocorre. O estudo "A vida sem saneamento: para quem falta e onde mora essa população?", divulgado pelo Instituto Trata Brasil em 2023, aponta que a privação de acesso à água potável atinge, inclusive, os moradores da região Sudeste, que, apesar de ser o centro econômico do país, concentrou, em 2022, 2.186 milhões de moradias que não tinham acesso à rede de abastecimento de água tratada. Cabe destacar que parte dessas moradias encontra-se nas grandes capitais, a exemplo de Belo Horizonte, onde 4.9% dos domicílios não são atendidos com rede de abastecimento de água, conforme dados do SINISA de 2025, com ano de referência 2024.

Nesse contexto, em que populações de baixa renda, em especial, enfrentam maiores dificuldades para acessar água em quantidade e qualidade adequadas às suas necessidades básicas, muitas famílias recorrem a formas alternativas de obtenção desse recurso. Um exemplo são as nascentes urbanas, que são surgências de água subterrânea localizadas em áreas já ocupadas pela cidade. Essas nascentes, comumente utilizadas como fonte de água em alguns bairros da capital mineira, embora apresentem água cristalina e, em alguns casos, em abundância, frequentemente não passam por avaliações prévias de qualidade ou, quando passam, os resultados não são amplamente divulgados à população. A falta de informações sobre a qualidade da água pode levar a usos inseguros, configurando riscos aos consumidores e um potencial problema de saúde pública, uma vez que diversas doenças podem ser veiculadas pelo consumo de água contaminada.

Considerando esse cenário, o presente trabalho teve como objetivo investigar se a qualidade microbiológica da água de quatro nascentes urbanas localizadas no município de Belo Horizonte: Nascente da Felicidade (Jardim Felicidade), Nascente da Praça Laplace (Santa Lúcia), Nascente da Escola Municipal Santos Dumont (Santa Efigênia) e Bica da Petrolina (Sagrada Família) é compatível com os usos que a população declara fazer da água proveniente dessas fontes. Para isso, foram realizadas análises microbiológicas de amostras de água provenientes das quatro fontes e aplicado um questionário junto aos usuários, de modo a compreender os principais usos atribuídos ao recurso. A partir da comparação entre os resultados laboratoriais e as informações obtidas junto à população, buscou-se avaliar potenciais riscos à saúde pública e subsidiar reflexões sobre a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade da água dessas fontes no contexto urbano.

Materiais e Métodos:

A metodologia adotada neste estudo baseou-se na realização de análises microbiológicas da água de quatro nascentes localizadas no município de Belo Horizonte (nascentes da Felicidade, da Petrolina, da Praça Laplace e da Escola Municipal Santos Dumont), e na aplicação de um questionário diagnóstico junto às respectivas comunidades do entorno, nos bairros Jardim Felicidade, Sagrada Família, Santa Lúcia e Santa Efigênia. O objetivo principal dessas ações foi identificar os usos atribuídos à água das fontes estudadas pelas pessoas que residem, trabalham e/ou frequentam as regiões circundantes às nascentes, bem como avaliar o potencial de risco deles, através da comparação com os resultados dos testes laboratoriais.

Para tal, foram realizadas três campanhas para coleta de amostras de água nas quatro localidades, nos meses de março, maio e junho de 2025. As amostras, que foram coletadas em frascos esterilizados, foram submetidas à técnica de tubos múltiplos

ou Número Mais Provável (NMP) no Laboratório de Análises Ambientais e Sanitárias do Campus I do CEFET-MG, contemplando a realização de testes presuntivos e confirmativos para detecção de coliformes totais e fecais.

Concomitantemente às análises laboratoriais, foi aplicado um questionário diagnóstico junto à população alvo. As perguntas foram elaboradas conforme as diretrizes metodológicas de Lakatos e Marconi (2015), validadas por pares e aprovadas pelo Comitê de Ética em Pesquisa do CEFET-MG através do parecer nº 7.246.598, sendo posteriormente organizadas em um formulário elaborado na plataforma Google Forms. As perguntas questionavam o respondente a respeito da vinculação dele com a nascente de referência e dos usos já realizados da água. A aplicação ocorreu de forma presencial e online entre os dias 29/05/2025 e 31/07/2025, contando com o apoio de representantes locais para ampliação da adesão.

Após o encerramento do período de coleta de respostas, os dados oriundos das questões foram submetidos à análise temática por frequência, conforme o método proposto por Bardin (2016), que consiste na codificação dos trechos relevantes das respostas a fim de facilitar a avaliação dos dados de questões abertas. Dessa forma, foram atribuídos códigos às tipologias de uso identificadas, a saber: pesquisa acadêmica; lavagem de espaços; lavar as mãos e rosto; dessedentação animal; e utilização no trabalho, os quais foram criados no âmbito do presente estudo; e consumo humano e/ou doméstico; lavagem de automóveis; e irrigação de jardins públicos e/ou hortas, adaptados da obra de Gomes et al. (2021).

Posteriormente, os códigos atribuídos a cada uso declarado foram classificados em categorias de “risco potencial” e “sem risco potencial”, sendo classificados no primeiro grupo as finalidades associadas a maior probabilidade de impacto à saúde do consumidor em caso de contaminação microbiológica, como consumo humano e/ou doméstico, lavar as mãos e rosto e dessedentação animal. Por fim, realizou-se a comparação entre os resultados dos testes microbiológicos e os usos declarados pela população, sendo classificados como usos inseguros todos os usos do grupo classificado como de risco potencial associados a nascentes que apresentaram resultado positivo no teste confirmativo para *E. coli*.

Resultados e Discussão

Inicialmente, esperava-se que somente a Nascente da Felicidade apresentaria contaminação fecal, uma vez que apenas ela se encontra em um bairro historicamente marcado pela vulnerabilidade social, que não teve um projeto de saneamento básico que acompanhasse o princípio da ocupação do território. Essa ausência de infraestrutura de coleta e tratamento de esgoto levou e ainda leva parte da população a lançar efluentes domésticos in natura no córrego que corta o bairro Jardim Felicidade, ou à construção de fossas sépticas sem critérios técnicos pelos próprios moradores (Veiga e Dutra, 2021), o que favorece a contaminação do lençol freático e, consequentemente, das nascentes da região. Contudo, os resultados dos testes confirmativos das análises microbiológicas realizadas indicaram a presença de coliformes fecais em três das quatro nascentes estudadas, incluindo a Nascente da Felicidade. Considerando que todas as campanhas de coleta tiveram resultados idênticos, conforme detalhado na Tabela 01, apenas a Bica da Petrolina, localizada no bairro Sagrada Família, apresentou resultado negativo para *E. coli* em todas as coletas.

Nascente	Bairro	Resultado do teste para coliformes totais e fecais
Felicidade	Jardim Felicidade (Região Norte de Belo Horizonte)	Positivo
Praça Laplace	Santa Lúcia (Região Centro-Sul de Belo Horizonte)	Positivo
Bica da Petrolina	Sagrada Família (Região Leste de Belo Horizonte)	Negativo
E.M. Santos Dumont	Santa Efigênia (Região Leste de Belo Horizonte)	Positivo

Tabela 01: Síntese do resultado das análises microbiológicas
Fonte: Ferreira (2025)

A ausência de coliformes fecais na água da Bica da Petrolina não causou surpresa, uma vez que estudos anteriores de Gomes et al. (2021) verificaram em conversa com moradores da região que análises da qualidade sanitária da fonte são frequentemente realizadas pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), ainda que essas pessoas não tenham acesso aos laudos resultantes. Ademais, o referido estudo não identificou relatos de enfermidades associadas ao consumo da água, o que se mostrou coerente com as constatações do presente trabalho.

No que se refere ao diagnóstico junto à população, foram entrevistados 62 voluntários, sendo 15 associados à Nascente da Felicidade, 15 à Bica da Petrolina, 21 à Nascente da Escola Municipal Santos Dumont e 11 à Nascente da Praça Laplace, no período compreendido entre 29/05/2025 e 31/07/2025. Nessa amostra, a maioria dos respondentes (59,68%) declarou residir na região circundante à nascente de referência, e 35,5% afirmaram já ter utilizado a água da nascente para algum fim. A questão que indagava o respondente a respeito de quais usos foram feitos da água foi respondida por 22 pessoas, e a análise temática por frequência das respostas, conforme orienta o método de Bardin (2016), permitiu a identificação de oito tipologias de uso, aos quais foram atribuídos os seguintes códigos: pesquisa acadêmica; lavagem de espaços; lavar as mãos e rosto; dessedentação animal; utilização no trabalho; consumo humano e/ou doméstico; lavagem de automóveis; e irrigação de jardins públicos e/ou hortas.

Considerando a possibilidade de exposição direta e o potencial de transmissão de enfermidades em caso de contaminação fecal, os códigos "Consumo humano e/ou doméstico"; "Lavar as mãos e rosto" e "Dessedentação animal" foram categorizados como "Usos com risco potencial" e os demais (Pesquisa acadêmica; Lavagem de automóveis; Irrigação de jardins públicos e/ou hortas; Lavagem de espaços; e Utilização no trabalho) como “Usos sem risco potencial”. Em seguida, foram verificadas o número de ocorrências de cada código nas respostas atribuídas a cada nascente e o resultado consta na Tabela 02.

	Tipo de uso	Total de ocorrências	Principais nascentes envolvidas
Usos com risco potencial	Consumo humano e/ou doméstico	17	Bica da Petrolina (15), Nascente da Felicidade (2)
	Lavar mãos e rosto	1	Nascente da Felicidade
	Dessedentação animal	1	Nascente da Praça Laplace
Usos sem risco potencial	**Tipo de uso**	**Total de ocorrências**	**Nascente associada**
	Pesquisa acadêmica	1	Nascente da Felicidade
	Lavagem de automóveis	3	Nascente da Felicidade
	Irrigação de jardins públicos e/ou hortas	2	Nascente da Felicidade
	Lavagem de espaços	1	Nascente da Felicidade
	Utilização no trabalho	1	Bica da Petrolina

Tabela 02: Número de ocorrências dos códigos por nascente
Fonte: Ferreira (2025)

De forma complementar, foi elaborada a representação esquemática apresentada na Figura 01, com o objetivo de explicitar os resultados da pesquisa e torná-los visualmente mais acessíveis. Além disso, foi elaborada a Tabela 03, onde constam os usos inseguros detectados, ou seja, todas as finalidades declaradas que são incompatíveis com a qualidade da água da nascente associada.

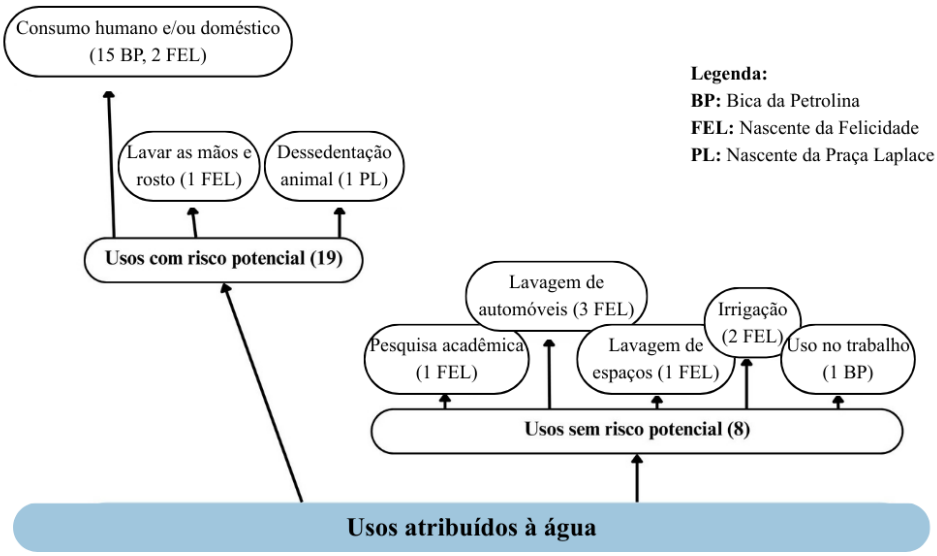


Figura 01: Representação esquemática dos resultados obtidos
Fonte: Ferreira (2025)

	Tipo de uso	Total de ocorrências	Nascente associada	Motivo
Usos inseguros	Consumo humano e/ou doméstico	2	Nascente da Felicidade	Teste positivo para presença de coliformes fecais.
	Lavar mãos e rosto	1	Nascente da Felicidade	
	Dessedentação animal	1	Nascente da Praça Laplace	

Tabela 03: Tabela-resumo dos usos inseguros detectados
Fonte: Ferreira (2025)

Diante disso, observa-se claramente que o principal uso atribuído à água das nascentes estudadas é o consumo humano e/ou doméstico, o que reafirma o fato de que as nascentes urbanas são fontes alternativas de água para finalidades nobres. Cabe destacar que os demais usos não foram automaticamente classificados como seguros, pois são necessárias análises complementares, conforme orienta a Portaria GM/MS nº 888/2021, antes de se fazer tal afirmação.

Tais constatações tornam explícita a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade da água das nascentes de Belo Horizonte, seguida da divulgação massiva dos resultados obtidos em ações de educação ambiental, uma vez que seu uso direto pela população, sem informações confiáveis sobre a qualidade, pode levar a usos inseguros e à possibilidade de surtos de doenças de veiculação hídrica, como doenças diarreicas e gastroenterites.

Considerações Finais

A comparação entre os resultados da análise microbiológica, destacados na Tabela 01, e os usos atribuídos à água por aqueles que relataram utilizá-la, esquematizados na Figura 01, evidenciaram a ocorrência de usos com risco potencial associados a nascentes que apresentaram resultado positivo para *E. coli*, configurando situações de uso inseguro e indicando ameaças claras à saúde pública. Isso ocorreu nos casos da Nascente da Felicidade, em que foram identificados os usos "Consumo humano e/ou doméstico" e "Lavar as mãos e rosto", e da Nascente da Praça Laplace, em que o uso "Dessedentação animal" foi declarado. Esse fato expõe a importância da realização de ações de educação ambiental nessas localidades, principalmente no entorno da Nascente da Felicidade, em que foi observada uma maior variedade de usos ditos inseguros.

As finalidades associadas à Bica da Petrolina pelos entrevistados são coerentes com o resultado dos testes microbiológicos, contudo, para atestar a segurança destes são necessárias análises complementares, como a testagem para substâncias químicas que representam risco à saúde e cianotoxinas, e outras, conforme orienta a Portaria GM/MS nº 888/2021.

Por fim, no caso da Nascente da Escola Municipal Santos Dumont, não há considerações a fazer sobre a segurança dos usos, uma vez que nenhum entrevistado declarou utilizá-la. Entretanto, diante do resultado das análises microbiológicas, recomenda-se que a água não seja destinada, em nenhuma circunstância, ao consumo humano ou animal, ou a quaisquer outras finalidades nobres.

Cabe destacar que os dados obtidos com o presente estudo podem servir de base para a proposição de intervenções futuras nos bairros de referência, uma vez que possibilitam o desenvolvimento de estratégias personalizadas de promoção da saúde pública conforme a realidade de cada bairro. Além disso, esses achados reforçam a importância do monitoramento da qualidade microbiológica de fontes alternativas de abastecimento e da divulgação massiva dos resultados à população em ações de educação ambiental, de modo a promover o uso seguro da água, combater doenças de veiculação hídrica e contribuir com o avanço no cumprimento dos ODS 3 e 6.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, especialmente ao Departamento de Ciências Biológicas, pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

BARDIN, L. Análise de Conteúdo. Almedina, Brasil: Edições 70, LDA, 2016.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acesso em 26 ago 2025.

GOMES, C. S. et al. Nascentes naturais em áreas urbanas: usos e funções socioambientais em Belo Horizonte, MG. Geo UERJ, Rio de Janeiro, n. 39, p. e41059, 2021. DOI: 10.12957/geouerj.2021.41059. Disponível em: https://www.e-publicacoes.uerj.br/geouerj/article/view/41059. Acesso em: 30 ago. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf. Acesso em: 26 ago. 2025.

INSTITUTO TRATA BRASIL. A vida sem saneamento: para quem falta e onde mora essa população? Disponível em: https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2023/11/VERSAO-FINAL-PRIVACAO-DO-SANEAMENTO.pdf. Acesso em 26 ago 2025.

LAKATOS, E. M; MARCONI, M. A. Técnicas de Pesquisa: Planejamento e execução de pesquisas; amostragens e técnicas de pesquisa; elaboração, análise e interpretação. 7. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2015.

MARINHA DO BRASIL. Dia Mundial da Água conscientiza sobre a preservação desse recurso fundamental para a vida humana. Agência Marinha de Notícias, 22 mar. 2022. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/noticias/dia-mundial-da-agua-conscientiza-sobre-preservacao-desse-recurso-fundamental-para-vida. Acesso em: 21 fev. 2026.

MINISTÉRIO DAS CIDADES (Brasil). Resultados SINISA 2025. Brasília: Ministério das Cidades, 23 dez. 2025; atualizado em 03 fev. 2026. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa/resultados-sinisa/resultados-sinisa-2025. Acesso em: 21 fev. 2026.

VEIGA, A. N. S. e DUTRA, J. L. C. Conhecendo a história do bairro Jardim Felicidade em Belo Horizonte por meio das vivências de uma idosa em processo de alfabetização: relato de uma experiência. Pedagogia em Ação, v.17, n.3 (2 sem. 2021). Disponível em: https://periodicos.pucminas.br/pedagogiacao/article/view/27103/18778.

QUALIDADE BACTERIOLÓGICA E FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA DE BEBEDOUROS DO CAMPUS GLÓRIA - UFU

1 José Lucas Dias Primo, 2 Milla Alves Baffi, 3 Sueli Moura Bertolino
1 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: jlucas.dias@ufu.br; 2 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: milla.baffi@ufu.br; 3 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: suelibertolino@ufu.br

Palavras-chave: Qualidade da água; Tubos múltiplos; Monitoramento.

Introdução

Apesar dos avanços globais no abastecimento, mais de 2 bilhões de pessoas ainda não têm acesso à água potável gerida de forma segura, evidenciando a persistência de riscos à saúde pública em escala mundial (OMS; UNICEF, 2025). Diante disso, é de suma importância que as pessoas tenham acesso a esse recurso hídrico de qualidade para suas necessidades diárias, o que também não é uma realidade para todos os brasileiros, já que cerca de 35 milhões não possuem acesso a água potável (TRATA BRASIL, 2025). No entanto, esse cenário difere da realidade de Uberlândia, visto que 98,05% da cidade é atendida com serviço de abastecimento de água tratada, em contraste com a média de 83,1% do país conforme os resultados SINISA 2025.

O saneamento básico constitui um determinante fundamental da saúde pública, estando diretamente relacionado à qualidade de vida e ao desenvolvimento socioeconômico. Esse conjunto de serviços abrange o abastecimento de água potável, o esgotamento sanitário, a gestão de resíduos sólidos e a drenagem urbana, cuja integração é essencial para a promoção de ambientes saudáveis. A ausência ou deficiência desses serviços está associada ao aumento da incidência de doenças de veiculação hídrica, como infecções gastrointestinais e parasitoses, além de favorecer a proliferação de vetores. Nesse contexto, o acesso à água tratada assume papel central, sendo considerado um dos principais fatores para a redução da morbidade, especialmente em populações vulneráveis (UNICEF; OMS, 2024). Ademais, investimentos em saneamento básico resultam na diminuição dos gastos com saúde pública e na geração de benefícios econômicos, evidenciando sua relevância estratégica para o desenvolvimento sustentável.

No Brasil, a Portaria do Ministério da Saúde GM/MS Nº 888/2021 define o padrão de potabilidade da água para consumo humano, estabelecendo os limites máximos e mínimos para substâncias físicas, químicas e biológicas que garantam sua segurança. Conforme esta legislação, a água potável é aquela que atende aos padrões de potabilidade estabelecidos em seus anexos e que não ofereça riscos à saúde, de forma que seu uso deve ser entendido como fator contribuinte no controle de doenças.

Assim, para determinar a potabilidade da água, são necessárias análises físico-químicas e microbiológicas que norteiam a padronização dos estudos, especialmente considerando que águas contaminadas por esgotos sanitários ou dejetos de animais atuam como importantes veículos de disseminação de microrganismos patogênicos (APHA, 2023). Nesse contexto, destaca-se a *Escherichia coli* como principal indicador de contaminação fecal, uma vez que sua presença está diretamente associada à detecção de matéria de origem fecal na água, visto que, ela habita o intestino de animais de sangue quente (PICHEL et al., 2023). Dessa forma, para que ela seja considerada potável, exige-se a ausência de *E. coli* em 100 mL de amostra, tanto no sistema de distribuição quanto nos pontos de consumo (BRASIL, 2021).

De acordo com Pichel et al. (2023), o monitoramento contínuo da qualidade da água é fundamental para garantir a segurança do consumo humano, uma vez que permite não apenas avaliar a eficiência dos métodos de tratamento, mas também identificar falhas no sistema e possíveis recontaminações associadas aos reservatórios e à rede de distribuição. Em seu estudo, os autores avaliaram diferentes estratégias de monitoramento em ambientes de uso coletivo, destacando a relevância da análise de indicadores microbiológicos, como *Escherichia coli*, como ferramenta essencial para a detecção de contaminação fecal e a prevenção de doenças de veiculação hídrica.

Nesse contexto, visando enfrentar esse desafio global de saúde pública, o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (ODS 6), proposto pelas Nações Unidas, tem como finalidade assegurar o acesso universal à água potável segura e ao saneamento básico. Para isso, o indicador 6.1.1 adota o monitoramento de microrganismos de origem fecal como parâmetro para avaliar a proporção da população que dispõe de água em conformidade com os padrões de potabilidade (UNITED NATIONS, 2015), uma preocupação que se estende a instituições de grande importância social, como a Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Neste cenário, por sua relevância como uma das principais instituições de ensino do Triângulo Mineiro, a UFU demanda atenção quanto à qualidade da água nos pontos de consumo do Campus Glória, local de funcionamento de sete cursos de graduação e com grande fluxo de pessoas, sendo essencial avaliar a sua qualidade por meio de parâmetros físico-químicos e bacteriológico, conforme a Portaria GM/MS N° 888/2021.

Material e Métodos

O estudo foi realizado em três edifícios do campus Glória, da UFU, localizada em Uberlândia, MG. Foram coletadas amostras de água de 17 bebedouros deste Campus, distribuídos da seguinte forma: bloco 1CCG (bebedouros 1 a 7), bloco 1BCG (bebedouros 8 a 13) e bloco 1DCG (bebedouros 14 a 17), para a realização de análises físico-químicas e bacteriológicas. O monitoramento durou 12 meses, sendo cada mês dedicado para as análises dos bebedouros de um bloco por vez, no total foram feitas 4 campanhas de amostragem.

As análises bacteriológicas foram feitas utilizando a técnica do Número Mais Provável (NMP), que é comumente denominada Teste Padrão de Tubos Múltiplos. Esse método é empregado para identificar bactérias pertencentes ao grupo coliforme por meio de um processo em três fases: testes presuntivo, confirmativo e completo (APHA, 2023).

No teste presuntivo, as amostras foram diluídas em tubos com caldo lactosado e incubadas a 36 °C por 48 horas. Após esse período, avaliou-se a produção de gás e turbidez nos tubos, indicativos da presença de bactérias fermentadoras de lactose. O teste confirmativo é dividido em dois tipos, um para coliformes totais e outro para coliformes termotolerantes, ambos foram realizados a partir das amostras positivas no teste presuntivo. Para coliformes totais, utilizou-se caldo Verde Bile Brilhante 2% (VBB) com incubação a 36 °C por 48 horas; para coliformes termotolerantes, utilizou-se caldo EC (Escherichia coli broth) com incubação a 45 °C por 24 horas. Em ambos, a presença de gás e turbidez indicaria resultado positivo, e o Número Mais Provável (NMP/100 mL) foi calculado conforme as normas da APHA (2023). De acordo com a legislação brasileira (BRASIL, 2021), o valor máximo permitido para coliformes totais e *E. coli* em água no ponto de consumo é ausência em 100 mL (NMP = 0).

No teste completo as amostras positivas no teste confirmativo com caldo EC seriam cultivadas em placas com meio EMB (Ágar Eosina Azul de Metileno) a 45 °C por 24 horas para identificar colônias de *E. coli*, que se caracterizam por apresentar coloração verde metálica.

Nos casos em que ocorreram resultados positivos no teste presuntivo, mas resultados negativos no teste confirmativo, foi feita a coloração de Gram para ratificar que as bactérias presentes nas amostras são gram positivas. A coloração de Gram é uma técnica de coloração diferencial utilizada para classificar bactérias em dois grandes grupos. O método envolve a aplicação de cristal violeta, lugol, álcool (descorante) e fucsina. Bactérias Gram-positivas retêm o complexo cristal violeta-lugol, corando-se em roxo ou azul, enquanto as Gram-negativas perdem essa coloração após o descorante e adquirem a cor rosa ou vermelha da fucsina. Tal distinção ocorre em função de diferenças nas características das paredes celulares bacterianas, relacionadas à espessura, composição, densidade, porosidade e estabilidade estrutural (MADIGAN et al., 2022, cap. 2, seç. 2.5).

Os parâmetros físico-químicos analisados foram: potencial hidrogeniônico (pH), medido com pHmetro Digital PHB-550; condutividade e sólidos dissolvidos totais (SDT), mensurados com Multiparâmetro HANNA Modelo HI9829; turbidez, avaliada com Turbidímetro AP2000; e cloro livre residual, determinado com Cloro Tester ISO7393/2. Os intervalos de referência de qualidade da água para consumo humano foram adotados conforme a Portaria GM/MS Nº 888/2021.

Resultados e Discussão

Em relação ao bloco 1CCG, para o 1º mês, os testes presuntivos deram resultados negativos para o térreo, 1º e 3º andar. Porém, deram positivo para o 2º andar (ponto 4, figura 01). Assim, foram realizados os testes confirmativos com os meios VBB e EC. Em ambos, as amostras do ponto 4 deram resultados negativos (figuras 02 e 03). Dessa forma, o NMP encontrado foi de 0, indicando a ausência de coliformes termotolerantes e bactérias gram-negativas. Logo, conclui-se que a presença de turbidez no teste presuntivo pode ser devida a presença de bactérias fermentadoras de lactose do tipo gram-positivas. A fim de confirmar esse resultado, a amostra positiva do teste presuntivo foi submetida à coloração de Gram, a qual revelou a presença de cocos gram-positivos (figura 04).

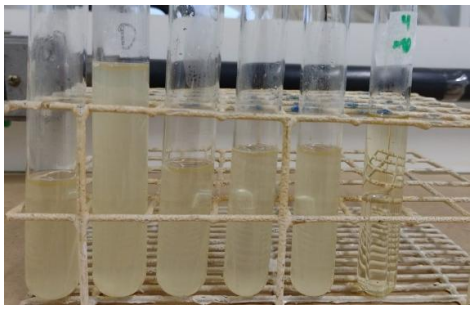


Figura 01: Teste presuntivo positivo do ponto 4, com formação de gás e turbidez.
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)



Figuras 02 e 03: Teste confirmativo negativo do ponto 4, indicando ausência de coliformes totais e termotolerantes.
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

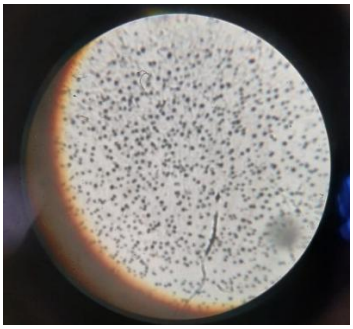


Figura 04: Bactérias Gram-positivas (cor roxa) vistas pelo microscópio óptico na objetiva de 100x (ponto 4).
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Da mesma forma, para o 4º mês, o teste presuntivo foi novamente positivo para o 2º andar, mas em outro bebedouro (ponto 5); além disso, no bloco 1 BCG, no 8° mês, o ponto 10 também apresentou detecção no teste presuntivo. Assim, procedeu-se aos testes confirmativos com os meios VBB e EC, os quais foram negativos, perfil análogo ao já demonstrado nas figuras 2 e 3. Foi realizado também o teste de coloração diferencial, cujo achado foi semelhante ao do ponto 4. Em todos os outros pontos nestes dois blocos o teste presuntivo teve resultado negativo, sendo assim, o NMP encontrado foi de 0, indicando que a amostra de água analisada se encontra dentro do Padrão de Potabilidade determinado pela Portaria MS nº 888/2021 em relação ao parâmetro microbiológico para estes dois blocos.

A análise bacteriológica da água dos bebedouros do Bloco 1DCG apresentou ausência de coliformes totais e *E. coli* em todas as amostras (NMP = 0), durante o período avaliado. Dessa forma, os resultados demonstraram que a água dos bebedouros deste bloco não apresentou contaminação (Figura 6), indicando que as condições de higiene e a integridade do sistema encontram-se de acordo com a legislação vigente (BRASIL, 2021).

Com base nestes dados, conclui-se que as análises realizadas foram satisfatórias em relação à qualidade da água dos bebedouros dos três blocos. Apesar da presença de bactérias fermentadoras de lactose Gram positivas nos pontos 4, 5 e 10, em 100% das amostras analisadas observou-se ausência de coliformes totais e termotolerantes. Portanto, a presença dessas bactérias no teste presuntivo não interfere negativamente na qualidade da água fornecida. Em geral, bactérias fermentadoras de lactose gram-positivas (bactérias láticas dos gêneros *Lactobacillus* e *Leuconostoc*), não são patogênicas. Estas bactérias ácido láticas (BAL), também são encontradas no trato gastrointestinal, e podem apresentar-se na forma de cocos. No entanto, as BAL não são prejudiciais à saúde pois são encontradas em alimentos processados (Freire et al. 2021). Dessa forma, os dados coletados estão em conformidade com a Portaria vigente, demostrando uma boa qualidade da água para o parâmetro microbiológico.

Os parâmetros físico-químicos avaliados nas amostras de água coletadas nos blocos demonstraram, de modo geral, conformidade com os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Como evidenciado na tabela 01 os valores médios de pH variaram entre 7,2 e 7,6, com desvios padrão (DP) entre 0,48 e 0,57, indicando baixa dispersão dos dados e permanecendo dentro da faixa permitida pela legislação (6,0 a 9,5), demonstrando um pH neutro e agradável ao paladar. A turbidez apresentou médias entre 0,31 e 0,45 UNT, com desvios padrão de 0,22 a 0,35, valores muito abaixo do limite máximo permitido de 5 UNT, indicando boa transparência da água. Embora a Portaria de potabilidade da água não estabeleça um valor máximo permitido (VMP) para a condutividade, a literatura técnica apresenta uma relação empírica direta entre esse parâmetro e os sólidos dissolvidos totais (SDT), na qual o SDT corresponde a aproximadamente 70% do valor da condutividade elétrica (FELIPPE et al, 2019). A partir dessa relação e tomando como base o VMP de SDT estabelecido pela portaria (500 mg/L), foi possível calcular um valor de referência de 714 µS/cm para a condutividade, adotado neste estudo como limite máximo permitido para esse parâmetro. Nesse sentido, ambos os parâmetros se mantiveram em níveis compatíveis com águas de boa qualidade, com médias entre 68 e 97 µS/cm e entre 35 e 54 mg/L, respectivamente.

	pH		Cloro Residual (mg/L)		Turbidez (UNT)		Condutividade (µS/cm)		SDT (mg/L)	
Bloco	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
1BCG	7,2	0,48	0,23	0,16	0,45	0,23	97	25,6	51	11,9
1CCG	7,3	0,57	0,19	0,12	0,41	0,35	89	50,4	54	26,7
1DCG	7,6	0,50	0,16	0,04	0,31	0,22	68	31,5	35	15,5
Média	**7,4**	**0,54**	**0,19**	**0,13**	**0,39**	**0,29**	**85**	**39,9**	**47**	**20,5**

Tabela 01: Valores das médias e desvios padrão.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O único parâmetro que merece atenção é o cloro residual livre. As médias obtidas variaram entre 0,16 mg/L (1DCG) e 0,23 mg/L (1BCG), com desvios padrão entre 0,04 e 0,16. Segundo a Portaria GM/MS nº 888/2021, o valor mínimo de cloro residual livre em água tratada para consumo humano é de 0,2 mg/L, sendo recomendada a manutenção de concentrações entre 0,2 e 2,0 mg/L. Observa-se que os pontos 1CCG (0,19 mg/L) e 1DCG (0,16 mg/L) apresentaram médias ligeiramente abaixo do mínimo exigido. Após este resultado, foi feito contato com a Diretoria de Sustentabilidade do campus, que informou por e-mail que o monitoramento da concentração de cloro livre na água dos reservatórios é realizado diariamente, de segunda a sexta-feira, nos 3 blocos. Sendo assim, essa

redução na concentração pode ser explicada por meio de um mecanismo combinado de adsorção física e reação química na superfície do carvão presente nos filtros, isto é, ao passar pelo filtro dos bebedouros, parte do cloro residual fica retido (MENG *et al*., 2019). Além disso, os desvios padrão indicam que em algumas medições o valor atingiu o mínimo normativo mesmo após passar pelo filtro, por conseguinte, esse parâmetro também se encontra dentro dos padrões para potabilidade segundo a legislação vigente.

Considerações Finais

Após 12 meses de monitoramento, o presente estudo demonstrou resultados satisfatórios com relação à qualidade da água dos bebedouros do Campus Glória. Os valores encontrados de pH, turbidez, condutividade, cloro residual e sdt encontram-se em conformidade com o estabelecido pelo Padrão de Potabilidade da Portaria GM/MS nº 888/2021, atestando, portanto, uma boa qualidade da água destes blocos para todos os parâmetros analisados. Entretanto, cabe ressaltar que os valores de cloro residual livre estavam um pouco abaixo dos valores estabelecidos pela Portaria devido à filtração. No que se refere às análises bacteriológicas, os resultados igualmente estão em conformidade com os valores máximos permitidos pela legislação. Todas as amostras apresentaram ausência de coliformes totais, e consequentemente de E. coli, indicando a inexistência de contaminação, e boa qualidade da água consumida nos bebedouros do Campus Glória. Para estudos futuros, recomenda-se analisar a concentração de cloro residual nas torneiras antes da passagem da água pelo filtro e outros parâmetros como metais traços e cor.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, à FAPEMIG e à UFU pelo apoio recebido para a realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 24. ed. Washington, DC: APHA Press, 2023. 1536 p. Organizadores: William C. Lipps, Ellen Burton Braun-Howland, Terry E. Baxter. ISBN 9780875532998.

BRASIL. Ministério da Saúde**. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017, e dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 7 maio 2021.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA): resultados SINISA 2025**. Brasília, DF: [s. n.], 2025. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa/resultados-sinisa/resultados-sinisa-2025. Acesso em: 1 fev. 2026.

FREIRE, Thayná Thamires et al. **Lactic acid bacteria its characteristics and importance: review**. Research, Society and Development, [S. l.], v. 10, n. 11, p. e513101119964, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i11.19964. Disponível em: https://rsdjournal.org/rsd/article/view/19964. Acesso em: 16 fev. 2026.

MADIGAN, Michael T. et al. The gram-positive and gram-negative cell walls. In: MADIGAN, Michael T. et al. **Brock biology of microorganisms**. 16. ed. Global ed. Harlow: Pearson, 2022. cap. 2, seç. 2.5.

MENG, F. et al. Removal of chlorine from drinking water using activated carbon filtration**. Water Research**, v. 157, p. 119–128, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.034. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135419302487. Acesso em: 31 mar. 2026.

PICHEL, N. et al**. Microbiological quality of drinking water in educational institutions: assessment using the multiple-tube fermentation technique**. Journal of Water and Health, v. 21, n. 2, p. 234–245, 2023. DOI: https://doi.org/10.2166/wh.2023.123. Acesso em: 31 mar. 2026.

TRATA BRASIL. Estudo sobre os avanços do marco legal do saneamento básico no Brasil de 2025 (SINISA, 2023). Estudo realizado para o Instituto Trata Brasil. São Paulo: GO Associados, ago. 2025. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/wpcontent/uploads/2025/08/ESTUDO_COMPLETO_Avancos_do_Marco_Legal_do_Saneamento_Basico_no_Brasil_2025_FINAL.pdf. Acesso em: 29 jan. 2026.

UNICEF. 1 em cada 4 pessoas em todo o mundo ainda não tem acesso à água potável. Nova Iorque, 26 ago. 2025. Disponível em: https://www.unicef.org/brazil/comunicados-de-imprensa/1-em-cada-4-pessoas-em-todo-o-mundo-ainda-nao-tem-acesso-agua-potavel. Acesso em: 18 jan. 2026.

UNITED NATIONS, 2015. **Sustainable Development Goals.** Disponível em: https://sdgs.un.org/goals. Acesso em: 31 mar. 2026.

CONTAMINAÇÃO POR POLUENTES ORGÂNICOS EM PEIXES DO RIO POTI (CEARÁ): IMPLICAÇÕES PARA O RISCO À SAÚDE HUMANA

1 Ana Clara Rosendo de Sousa, 2 Janaína Lopes Leitinho, 3 Rivelino Martins Cavalcante, 4 Luísa Gardênia Alves Tome Farias

1 Universidade Federal do Ceará - campus Crateús, Ceará, Brasil. E mail: rosendoana2018@gmail.com; 2 Universidade Federal do Ceará - campus Crateús, Ceará, Brasil. E-mail: janaina@crateus.ufc.br; 3 Universidade Federal do Ceará - campus LABOMAR, Ceará, Brasil. E-mail: rivelino@ufc.br; 4 Universidade Federal do Ceará - campus Crateús, Ceará, Brasil.. E-mail: luisa@crateus.ufc.br.

Palavras-chave: Poluentes orgânicos; Rio Poti; Risco de câncer.

Introdução

O Rio Poti tem sua nascente no estado do Ceará, formada pela confluência dos riachos Santa Maria e Algodões, sobre rochas cristalinas pré-cambrianas, na localidade de Algodões, próxima ao município de Quiterianópolis. A partir desse ponto, o rio percorre aproximadamente 105 km até alcançar o município de Crateús (Damasceno et al., 2008). Ao longo de seu percurso, atravessa diferentes distritos e, após passar pela região do Boqueirão do Poti, segue em direção ao estado do Piauí, onde integra a bacia do rio Longá.

Em parte de sua extensão no Ceará, o rio é influenciado por condições climáticas semiáridas, caracterizadas por elevadas temperaturas e períodos prolongados de estiagem, especialmente no segundo semestre do ano. Nesse período, a redução do nível de água leva à formação de lagoas isoladas ao longo da calha do rio, que passam a concentrar diferentes usos e atividades humanas. Essas áreas tornam-se pontos de intensa pressão antrópica, incluindo supressão da vegetação ciliar para ocupação urbana e atividades agrícolas, lançamento de efluentes domésticos e ocorrência de queimadas.

As alterações ambientais associadas a essas atividades favorecem a introdução de contaminantes emergentes (CE) e poluentes orgânicos persistentes (POPs) no ambiente aquático. Os POPs constituem um grupo de compostos sintéticos e potencialmente tóxicos, como pesticidas organoclorados (OCPs) e bifenilas policloradas (PCBs), caracterizados por elevada persistência ambiental, capacidade de transporte a longas distâncias e tendência à bioacumulação nos tecidos dos organismos (Kumar et al., 2022).

A proximidade de áreas agrícolas com as margens do rio, associada à disponibilidade de solos férteis e à facilidade de acesso à água para irrigação, favorece o uso intensivo de insumos agrícolas e práticas como queimadas e supressão da vegetação nativa. Essas atividades contribuem para o transporte de contaminantes para o corpo hídrico, podendo comprometer a qualidade ambiental e afetar os organismos aquáticos.

Uma vez presentes no ambiente aquático, esses contaminantes podem ser incorporados à cadeia alimentar, acumulando-se nos tecidos dos organismos e ampliando seus efeitos ao longo dos diferentes níveis tróficos. A bioacumulação e a biomagnificação desses compostos representam um risco potencial tanto para a fauna aquática quanto para populações humanas que utilizam esses organismos como fonte alimentar. Nesse contexto, destaca-se que a região de Crateús apresenta elevados índices de mortalidade por doenças cancerígenas, conforme apontado pelo Boletim Epidemiológico do Ceará (2022).

Diante desse cenário, este estudo teve como objetivo comparar os níveis de contaminação por poluentes orgânicos em peixes coletados em pontos localizados dentro e fora da Área de Proteção Ambiental (APA) do Boqueirão do Poti, no Ceará, bem como avaliar o risco cancerígeno associado ao consumo desses organismos, fornecendo subsídios para estratégias de monitoramento ambiental e gestão da qualidade dos recursos hídricos na região.

Materiais e Métodos

Área de estudo

A seleção dos pontos de coleta considerou critérios técnicos e estratégicos, visando avaliar o impacto de atividades humanas sobre a contaminação por agrotóxicos. Foram definidos dois locais no Rio Poti, um dentro da Área de Proteção Ambiental (APA) Boqueirão do Poti, no distrito de Oiticica (5°02'33"S 41°05'04"W), e outro em sua zona de entorno, no distrito de Ibiapaba (5°02'52"S 40°55'17"W), com intensa atividade agrícola.

Coleta das amostras

Foram coletados 47 peixes de 11 espécies distintas, representando diferentes nichos ecológicos e alimentares. Os espécimes apresentaram peso entre 29 e 368 g e comprimento entre 115 e 290 mm. O tecido muscular foi selecionado por ser o principal consumido pela população e por refletir de forma confiável a bioacumulação de contaminantes. As amostras foram armazenadas sob refrigeração e enviadas ao Laboratório de Contaminantes Orgânicos (LACOr), da UFC/LABOMAR, para análise cromatográfica.

Preparação das amostras

As amostras de tecido muscular dos peixes foram preparadas seguindo o método QuEChERS (Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged, Safe) desenvolvido em 2003 por Anastassiades e colaboradores, adaptado pelo LACOr, com base em protocolos

avaliados pelo programa europeu QUASIMEME (Quality Assurance of Information in Marine Environmental Monitoring). Essa metodologia foi escolhida por sua eficácia na extração de resíduos químicos, especialmente compostos orgânicos como pesticidas, e por fornecer resultados consistentes em análises ambientais e biológicas.

Análise cromatográfica

As amostras foram analisadas por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC MS/ECD/NPD), com coluna Agilent J&W DB-5. A quantificação foi baseada em curvas analíticas com padrões internos (PCB-103 e nitrobenzeno-d5). Foram identificados pesticidas organoclorados (OCPs), PCBs, PBDEs e piretróides (PPs), alguns com potencial cancerígeno ou efeitos endócrinos.

Avaliação de risco à saúde

• Taxa de ingestão de peixe: Determinada por meio de questionários aplicados aos moradores dos distritos de Oiticica e Ibiapaba, coletando dados sobre frequência e quantidade de consumo de peixes do Rio Poti.

• Risco cancerígeno: Avaliado por meio da Dose Média Diária ao Longo da Vida (LADD) e do Risco de Câncer (CR), utilizando os fatores de inclinação (CSFo) fornecidos pela USEPA. Considerou-se uma expectativa de vida de 76 anos e exposição contínua por 70 anos. Para estimar os impactos crônicos desses contaminantes, calcula-se inicialmente a dose média diária ao longo da vida (LADD) (Equação 1).

$$\boldsymbol{LADD = C * \frac{IR * EF * ED}{BW * Lt}} \quad (1)$$

Onde, C é a concentração do contaminante (mg/kg); IR é a taxa de ingestão (kg/dia) usando as mesmas estimativas de ingestão anteriores; EF é a frequência (dias/ano); BW (kg) é o peso de um adulto (70 kg); ED (anos) é a exposição crônica (70 anos); Lt a medida da expectativa de vida de um indivíduo (76 anos).

$$CR = LADD * CSFo \quad (2)$$

Em que, LADD é a dose média diária ao longo da vida (mg/kg/dia) e o CSFo é uma medida da potência de carcinogenicidade, também chamada de fator de inclinação do câncer oral (mg/kg/dia) (Universidade de Wisconsin Usepa, 1989).

Resultados e Discussão

A Figura 1 (a-b) apresenta as concentrações, em ng/g, dos contaminantes detectados nos peixes coletados nos dois pontos de amostragem. As barras de erro evidenciam maior variabilidade para os contaminantes pertencentes à classe dos piretróides (PPs), indicando diferenças de concentração mesmo entre indivíduos da mesma espécie. Essa variação pode estar associada a fatores como idade dos organismos, características do habitat, hábitos alimentares e disponibilidade dos contaminantes no ambiente aquático.

A análise comparativa entre os distritos de Ibiapaba e Oiticica evidenciou diferenças nas concentrações das classes de contaminantes investigadas (PCBs, OCPs, PBDEs e PPs). Entre os compostos analisados, os piretróides (PPs) apresentaram as maiores concentrações em ambos os locais de coleta. No distrito de Ibiapaba, os valores médios alcançaram aproximadamente 12 ng/g, enquanto em Oiticica as concentrações médias foram próximas de 7 ng/g. Esse resultado sugere uma maior influência de fontes de contaminação por pesticidas na região de Ibiapaba, possivelmente associada à intensificação das atividades agrícolas no entorno.

Além dos PPs, os compostos pertencentes às classes OCPs e PBDEs também foram detectados em quantidades relevantes nos dois distritos analisados, indicando a presença de diferentes grupos de poluentes orgânicos persistentes no ambiente aquático do Rio Poti.

No caso dos PCBs, foram observadas concentrações semelhantes entre os dois pontos de coleta, com valores ligeiramente superiores no distrito de Ibiapaba. Considerando que esses compostos estão frequentemente associados a materiais industriais, como plastificantes e tintas, sua presença pode estar relacionada ao descarte inadequado de resíduos sólidos ao longo da calha do rio.

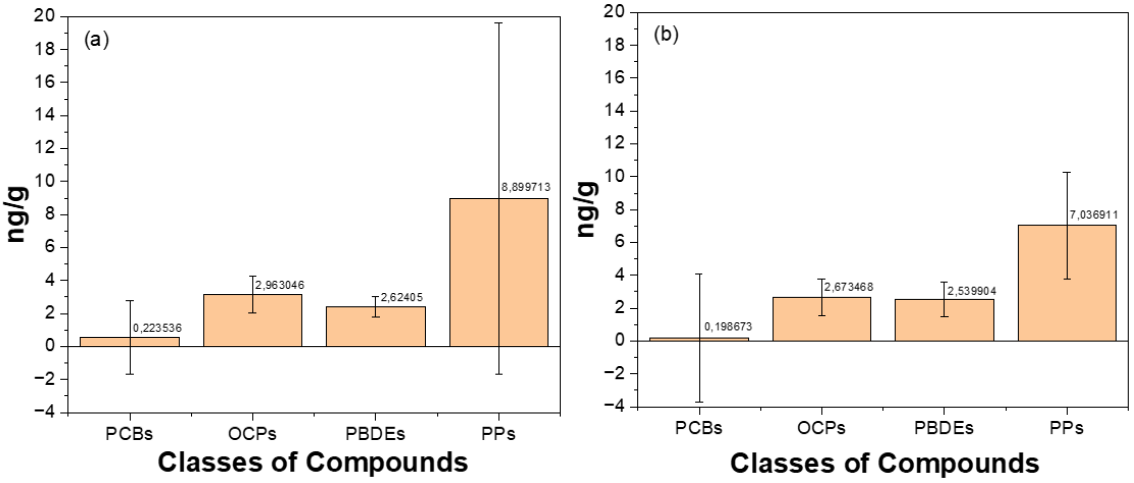


Figura 1. Concentração de PCBs, OCPs, PBDEs e PPs. a) Distrito de Ibiapaba- Crateús-Ce; b) Distrito de Oiticica-Crateús-Ce. Fonte: Autora, 2025

Avaliação de Risco de câncer

Para a avaliação dos riscos cancerígenos (RC) associados ao consumo de peixes do Rio Poti, foi utilizada a classificação proposta pela USEPA. De acordo com essa metodologia, valores de RC inferiores a 10^{-6} são considerados insignificantes, enquanto valores entre 10^{-6} e 10^{-4} são classificados como aceitáveis. Valores superiores a 10^{-4} indicam risco considerado inaceitável para a saúde humana. O cálculo do RC foi realizado a partir das doses orais de referência (CSFo) disponíveis na literatura e os resultados são apresentados na Figura 2 (a-b).

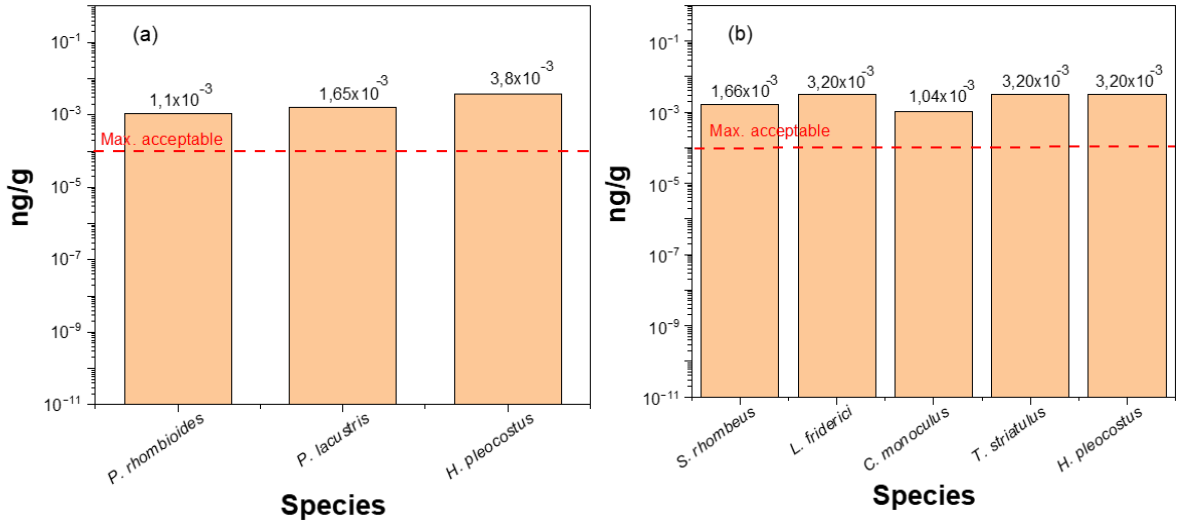


Figura 2. Risco cancerígeno relacionado ao consumo dos peixes. a) Distrito de Ibiapaba- Crateús-Ce; b) Distrito de Oiticica- Crateús-Ce. Fonte: Autora, 2025

Os valores de RC estimados para o distrito de Ibiapaba variaram de $2{,}78\times10^{-7}$ a $3{,}8\times10^{-3}$, enquanto no distrito de Oiticica os valores oscilaram entre $9{,}26\times10^{-6}$ e $3{,}68\times10^{-3}$. Entre as 15 substâncias avaliadas, três compostos apresentaram potencial carcinogênico relevante, sendo um pertencente à classe dos PCBs (PCB 52) e dois da classe dos OCPs (α-BHC e Heptachlor).

No distrito de Ibiapaba, as espécies que apresentaram valores classificados como inaceitáveis de risco cancerígeno foram branquinha, curimatã e bodó. Já no distrito de Oiticica, os valores mais elevados foram observados para as espécies piranha, piau, tucunaré, cangati e bodó.

Esses resultados indicam que, em ambos os distritos analisados, determinadas espécies de peixes consumidas pela população local podem representar risco à saúde devido à presença de contaminantes com potencial carcinogênico. A ocorrência de compostos como PCBs e OCPs reforça a preocupação com a contaminação ambiental da região, uma vez que esses poluentes apresentam elevada persistência no ambiente e tendência à bioacumulação ao longo da cadeia alimentar.

Considerações Finais

Os resultados obtidos indicam que o distrito de Ibiapaba, localizado fora da Área de Proteção Ambiental (APA) do Boqueirão do Poti e caracterizado por intensa atividade agrícola, apresentou as maiores concentrações de contaminantes nos peixes analisados. Esse resultado evidencia a influência das práticas agrícolas e de outras pressões antrópicas na contaminação dos recursos hídricos e da biota aquática do Rio Poti.

A avaliação do risco cancerígeno, baseada nos critérios estabelecidos pela USEPA, demonstrou que o consumo de determinadas espécies de peixes pode representar risco potencial à saúde humana, especialmente em cenários de exposição contínua. A presença de compostos como PCBs e OCPs reforça a preocupação com a persistência desses poluentes no ambiente e sua capacidade de bioacumulação ao longo da cadeia alimentar.

Dessa forma, os resultados destacam a importância do monitoramento contínuo da qualidade ambiental do Rio Poti, bem como da implementação de estratégias de gestão voltadas à proteção dos recursos hídricos e à segurança alimentar das populações que dependem desses organismos como fonte de alimento.

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

ANASTASSIADES, M. et al. Fast and easy multiresidue method employing acetonitrile extraction/partitioning and dispersive solid-phase extraction for the determination of pesticide residues in produce. Journal of AOAC International, v. 86, p. 412-431, 2003.

DAMASCENO, L. M. O. et al. Qualidade da água do rio Poti para consumo humano, na região de Teresina, PI. Rev. Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável v.3, n.3, p.116-130. Mossoró, 2008.

KUMAR, Rohitashw; QURESHI, Mahrukh; VISHWAKARMA, Dinesh Kumar; AL-ANSARI, Nadhir; KURIQI, Alban; ELBELTAGI, Ahmed; SARASWAT, Anuj. A review on emerging water contaminants and the application of sustainable removal technologies. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, v. 6, p. 100219, 2022.

SECRETARIA DA SAÚDE DO ESTADO DO CEARÁ. Boletim epidemiológico – Registro de câncer 2009-2022. Fortaleza: Sesa-CE, 20 set. 2022. [pdf]. Disponível em: acesso via site da Secretaria da Saúde do Ceará.

USEPA, 1989. Orientação de avaliação de risco para superfund. Em: Avaliação de Saúde Humana Manual Parte A, Final Interino, 1. Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), Washington, DC, EUA. EPA/540/1- 89/002.

USEPA, 2000. Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. Orientação para avaliação de dados de contaminantes químicos para uso em peixes, Avisos, Volume 1: Amostragem e Análise de Peixes, terceira edição. Estados Unidos.

USEPA, 2023. Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. Contaminantes de preocupação emergente, incluindo produtos farmacêuticos e de cuidados pessoais.https:// www.epa.gov/wqc/contaminantes-preocupação emergente-incluindo-produtos-farmacêuticos-eprodutos-de-cuidados-pessoais. Acesso em 05 de fev de 2025.

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS LIMNOLÓGICOS EM UM LAGO URBANO NO PARQUE MUNICIPAL CASCAVEL, GOIÂNIA - GO

1Gustavo Pina Brandão Costa, 2Jardel Freitas Castro, 3Nicole Cristina Melo Silva, 4Nora Katia Saavedra del Aguila Hoffmann

1 Universidade Federal de Goiás, e-mail: gustavo_pina@discente.ufg.br; 2 Universidade Federal de Goiás, e-mail: jardel_freitas@discente.ufg.br; 3 Universidade Federal de Goiás, e-mail: nicolecristina@discente.ufg.br; 4 Universidade Federal de Goiás, e-mail: kasaavedra@ufg.br

Palavras-chave: Qualidade da água; Limnologia; Eutrofização

Introdução

O crescimento urbano acelerado e, muitas vezes, desordenado tem provocado alterações significativas nos ecossistemas aquáticos, especialmente em ambientes inseridos em áreas urbanas. A ocupação irregular do solo, o lançamento de efluentes domésticos e o aporte de poluentes provenientes do escoamento superficial contribuem diretamente para a degradação da qualidade da água nesses ambientes (ESTEVES, 1998; VON SPERLING, 2014).

Lagos artificiais localizados em parques municipais desempenham funções ecológicas, paisagísticas e sociais relevantes, contribuindo para a manutenção da biodiversidade e para o uso recreacional pela população. No entanto, a presença de atividades antrópicas nas áreas adjacentes pode provocar alterações ambientais significativas, comprometendo o equilíbrio ecológico desses sistemas aquáticos (ARAÚJO et al., 2012).

A introdução excessiva de nutrientes no ambiente aquático pode desencadear o processo de eutrofização, caracterizado pelo aumento da produtividade primária e proliferação de algas e cianobactérias. Esse fenômeno está frequentemente associado ao enriquecimento por matéria orgânica e nutrientes, podendo causar redução do oxigênio dissolvido e impactos negativos na qualidade da água (APHA, 2017; ESTEVES, 1998).

Além disso, a presença de microrganismos indicadores, como coliformes totais e *Escherichia coli*, é amplamente utilizada como parâmetro para avaliação da contaminação fecal e dos riscos sanitários associados ao uso da água. Esses microrganismos são tradicionalmente empregados como indicadores microbiológicos por sua relação direta com a presença de matéria fecal em corpos hídricos (VASCONCELLOS; IGANCI; RIBEIRO, 2006; LEAL FERNANDES; VIEIRA GOIS, 2015).

De acordo com a legislação ambiental brasileira, especialmente a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357/2005, os corpos d'água devem atender a limites específicos de qualidade, estabelecendo parâmetros microbiológicos e físico-químicos adequados para diferentes usos da água. O monitoramento desses parâmetros é fundamental para avaliar a conformidade ambiental e identificar possíveis fontes de poluição (BRASIL, 2005).

Além dos parâmetros microbiológicos e físico-químicos, a análise da comunidade fitoplanctônica constitui importante ferramenta para avaliação da qualidade da água, uma vez que esses organismos respondem rapidamente às alterações ambientais e à disponibilidade de nutrientes. A presença e predominância de determinados grupos fitoplanctônicos podem indicar diferentes níveis tróficos e auxiliar na identificação de processos de eutrofização (BICUDO; MENEZES, 2017; REYNOLDS, 2006).

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar de forma integrada os parâmetros microbiológicos, físico-químicos e fitoplanctônicos do lago do Parque Municipal Cascavel, em Goiânia – GO, contribuindo para a compreensão das condições ambientais do sistema e fornecendo subsídios para ações de monitoramento e manejo ambiental.

Material e Métodos

O estudo foi realizado no lago localizado no Parque Municipal Cascavel, situado no município de Goiânia, estado de Goiás, em uma região caracterizada por elevada urbanização e influência direta de atividades antrópicas. O lago apresenta características típicas de ambientes lênticos urbanos, com possível influência de escoamento superficial proveniente de áreas impermeabilizadas e áreas adjacentes com ocupação urbana (Araújo et al., 2012).

Foram estabelecidos três pontos de coleta distribuídos ao longo do lago, selecionados com base em suas características geomorfológicas e na possibilidade de receber diferentes influências ambientais. As coletas foram realizadas na subsuperfície da água, utilizando frascos estéreis previamente higienizados e identificados. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em caixas térmicas contendo gelo reciclável, garantindo a preservação para ser realizadas as análises das características físico-químicas e microbiológicas, de acordo com a Tabela 1.

Parâmetros	Limite CONAMA n°357/2005
Condutividade	-
pH	Entre 6 e 9
Temperatura (°C)	< 40° C
Coliforme totais (NMP.100/mL)	1000
Escherichia coli (NMP.100/mL)	-

Tabela 1: Parâmetros analisados de acordos com os limites estabelecidos pela CONAMA n°357/2005. Fonte: Autores (2026)

A determinação de coliformes totais e *Escherichia coli* foi realizada pelo método do substrato cromogênico definido (Colilert), técnica amplamente utilizada para quantificação de microrganismos indicadores de contaminação fecal em amostras de água, com resultados confirmativos para presença de coliformes totais e *E. coli* em 24 horas pelo desenvolvimento de coloração amarela e observação de fluorescência, sem necessidade da adição de outros reagentes para confirmação. Foi realizada a incubação das amostras na estufa bacteriológica (marca Nova Técnica), em condições controladas de temperatura e posterior interpretação dos resultados por meio de tabelas padronizadas. Além disso, também foi utilizado o substrato enzimático colilert, marca Indexx, cartelas estéreis para quantificar coliformes totais e *E. coli*, marca Policontrol, junto da seladora quanti-tray modelo 2x, marca Indexx.

Os parâmetros físico-químicos avaliados incluíram pH, temperatura da água e condutividade elétrica. O pH foi determinado utilizando-se o medidor de pH de bancada da marca Simpla pH140, devidamente calibrado, enquanto a temperatura foi registrada no momento da coleta com auxílio de termômetro digital. A condutividade elétrica foi medida utilizando-se condutivímetro de bancada da marca Instrutherm, permitindo estimar a concentração de íons dissolvidos na água.

Para a análise fitoplanctônica, as amostras foram preservadas com solução de lugol acético, permitindo a fixação e conservação das células algais até o momento da análise. Posteriormente, as amostras foram examinadas no microscópio invertido, marca olympus, modelo CKX41, sendo realizada a identificação dos principais gêneros fitoplanctônicos com base em características morfológicas e em literatura especializada.

Resultados e Discussão

Os resultados microbiológicos (Tabela 2) detectaram a presença de concentrações elevadas de coliformes totais e *Escherichia coli* nos três pontos analisados, indicando possível contaminação fecal recente no ambiente estudado. Esses valores sugerem, possivelmente, a presença de fontes difusas de poluição, como lançamento irregular de esgoto doméstico e carreamento de matéria orgânica por meio do escoamento superficial, principalmente em períodos chuvosos, quando ocorre maior transporte de contaminantes para o corpo hídrico. A coleta foi realizada no dia 04 de março de 2026, período caracterizado por chuvas na cidade de Goiânia–GO. Entretanto, no dia da amostragem não houve precipitação, tendo ocorrido apenas no dia anterior, de modo que todo o procedimento foi conduzido em condições sem chuva. Dessa forma, o fato de a coleta ter ocorrido em um período chuvoso na região pode ter contribuído para a maior incidência de coliformes na água, cujos valores ultrapassaram o limite estabelecido pelo CONAMA (1000).

Local	Coliformes Totais (NMP/100 mL)	*E. coli* (NMP/100 mL)
Ponto 1	2247	547,5
Ponto 2	4352	410,6
Ponto 3	1956	235,9

Tabela 2: Parâmetros microbiológicos. Resultado dos coliformes totais e *E.coli* em cada ponto.
Fonte: Autores (2026)

Quando comparados aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas destinadas ao uso recreacional, os valores observados indicaram comprometimento da qualidade microbiológica da água, representando risco potencial à saúde pública. A presença de *Escherichia coli* reforça a hipótese de contaminação fecal recente, uma vez que esse microrganismo é considerado um indicador específico desse tipo de poluição.

Os parâmetros físico-químicos, analisados na Tabela 3, apresentaram variações moderadas entre os pontos de coleta. Os valores de pH apresentaram caráter alcalino, variando entre 8,04 e 8,63, condição que favorece o desenvolvimento de organismos fotossintetizantes, especialmente microalgas e cianobactérias. Esse comportamento pode estar associado à intensa atividade fotossintética e à presença de nutrientes disponíveis no ambiente.

Local	Condutividade (µS/cm)	pH	Temperatura (°C)
Ponto 1	94,58	8,63	23
Ponto 2	100,4	8,15	23,5
Ponto 3	103,2	8,04	25

Tabela 03: Parâmetros físico-químicos. Resultado da condutividade, pH e temperatura em cada ponto.
Fonte: Autores (2026)

A condutividade elétrica apresentou valores entre 94,58 e 103,2 µS/cm, indicando a presença de íons dissolvidos na água e sugerindo possível influência de aporte de nutrientes provenientes do ambiente urbano. Valores elevados de condutividade podem estar relacionados ao transporte de sais dissolvidos e matéria orgânica, refletindo o grau de influência antrópica no sistema aquático.

A temperatura da água variou entre 23 e 25 °C, valores característicos de ambientes tropicais, que favorecem a atividade metabólica dos organismos aquáticos e o desenvolvimento de comunidades biológicas. Em ambientes com temperaturas elevadas, há aumento da taxa metabólica e maior velocidade de processos biogeoquímicos, podendo contribuir para o aumento da produtividade biológica.

A análise fitoplanctônica revelou a presença predominante de organismos pertencentes aos grupos das diatomáceas, clorofíceas e cianofíceas. Entre os gêneros identificados destacam-se *Cyclotella*, *Nitzschia* e *Synedra* (diatomáceas), *Scenedesmus* e *Coelastrum* (clorofíceas) e *Lyngbya* (cianofíceas). A ocorrência desses grupos indica condições ambientais que variam entre mesotróficas e eutróficas, sendo comum em ambientes com disponibilidade moderada a elevada de nutrientes.

A presença de cianofíceas, especialmente do gênero *Lyngbya*, merece destaque, uma vez que esse grupo pode estar associado à ocorrência de florações algais em ambientes enriquecidos por nutrientes. Em condições favoráveis, algumas espécies desse grupo podem produzir substâncias potencialmente tóxicas, representando risco à fauna aquática e à saúde humana.

Os resultados obtidos neste estudo indicaram que o lago do Parque Cascavel apresenta características típicas de ambientes urbanos sujeitos à influência antrópica. A integração dos dados microbiológicos, físico-químicos e biológicos permitiram uma avaliação mais abrangente das condições ambientais, evidenciando a importância de monitoramentos contínuos para prevenção de impactos ambientais mais severos.

Considerações Finais

A avaliação integrada dos parâmetros microbiológicos, físico-químicos e fitoplanctônicos permitiram identificar alterações relevantes na qualidade da água do lago do Parque Municipal Cascavel. A presença de coliformes totais e *Escherichia coli* em concentrações elevadas evidencia a existência de possíveis fontes de contaminação fecal, reforçando a necessidade de ações voltadas ao controle e monitoramento das fontes poluidoras.

Os parâmetros físico-químicos indicaram condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento biológico, enquanto a composição fitoplanctônica revelou indícios de enriquecimento por nutrientes, caracterizando tendência ao processo de eutrofização. Esses resultados demonstram a importância da adoção de estratégias de manejo ambiental e da implementação de programas permanentes de monitoramento da qualidade da água.

Além disso, recomenda-se a realização de estudos complementares que incluam a análise de nutrientes, oxigênio dissolvido e transparência da água, permitindo uma avaliação mais detalhada do estado trófico do ambiente. A continuidade do monitoramento ao longo das estações do ano também se mostra fundamental para compreender a influência das condições climáticas, especialmente dos períodos chuvosos, sobre a qualidade da água.

Assim, os dados obtidos neste estudo contribuem para o entendimento das condições ambientais do lago e fornecem subsídios técnicos importantes para a gestão ambiental de ambientes aquáticos urbanos.

Referências

ARAÚJO, Cássio Bergamasco Ferreira de; LAGES, Virgínia Dias; AGUIAR, Vinícius Gomes de. **Degradação ambiental em área de preservação permanente: um estudo de caso no Parque Cascavel em Goiânia-GO**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 3., 2012, Goiânia. Anais... Goiânia: IBEAS, 2012.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23. ed. Washington, DC: APHA, 2017.

BICUDO, C. E. 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 (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 18 mar. 2005.

ESTEVES, Francisco de Assis. **Fundamentos de limnologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

LEAL FERNANDES, L.; VIEIRA GOIS, R. **Avaliação das principais metodologias aplicadas às análises microbiológicas de água para consumo humano voltadas para a detecção de coliformes totais e termotolerantes**. Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente, v. 6, n. 2, p. 49–64, 2015.

REYNOLDS, C. S. **The ecology of phytoplankton**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
RESENDE, Ubiratan Pereira de. **Qualidade de vida, meio ambiente urbano e especulação imobiliária: um estudo sobre a implantação do Parque Cascavel**. Goiânia: UFG, 2011.

VASCONCELLOS, F. C. S.; IGANCI, J. R. V.; RIBEIRO, G. A. **Qualidade microbiológica da água do rio São Lourenço, RS**. Arquivos do Instituto Biológico, São Paulo, v. 73, n. 2, p. 177-181, 2006.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

ANÁLISE DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DA ÁGUA DO AÇUDE EPITÁCIO PESSOA LOCALIZADO NO MUNICÍPIO DE BOQUEIRÃO - PB.

1Danúbio Leonardo Bernardino de Oliveira, 2Edmilson Dantas da Silva Filho, 3Bruna Isabelly Gouveia Montenegro

1 Instituto Federal da Paraíba - Campus Campina Grande, e-mail: danubio.oliveira@ifpb.edu.br; 2 Instituto Federal da Paraíba - Campus Campina Grande, e-mail: edmilson.silva@ifpb.edu.br; 3 Instituto Federal da Paraíba - Campus Campina Grande, e-mail: brunaisabellyy@icloud.com.

Palavras-chave: Açude; Análise; Parâmetros.

Resumo

Neste trabalho, foram realizadas análises físico-químicas da água do Açude Epitácio Pessoa, localizado em Boqueirão, Paraíba, ao longo de três meses consecutivos. O objetivo foi avaliar a qualidade da água para usos como consumo humano, irrigação, lazer e pesca. O açude é uma fonte vital em uma região semiárida, onde a escassez de água potável é um desafio constante. Foram analisados parâmetros como pH, turbidez, dureza, salinidade, cloretos, manganês, ferro e sólidos dissolvidos. Os resultados mostraram que, em sua maioria, os parâmetros estavam dentro dos limites permitidos pela legislação brasileira para a potabilidade da água. Contudo, o manganês apresentou valores superiores ao permitido, apesar disso, a água do açude apresentou condições adequadas para as finalidades de consumo, irrigação e lazer. Conclui-se que, embora a água do açude Epitácio Pessoa esteja, em geral, dentro dos padrões de qualidade, é essencial o monitoramento contínuo dos parâmetros, e a adoção de medidas para garantir o uso sustentável dos recursos hídricos.

Introdução

A água é um recurso essencial para a vida, desempenhando um papel crucial não apenas para a saúde e o bem-estar humano, mas também para o desenvolvimento socioeconômico e a preservação dos ecossistemas. Sua gestão sustentável é fundamental, especialmente em regiões onde a escassez de água afeta milhões de pessoas. Aproximadamente 97,5% da água disponível no planeta é salgada, tornando-a inadequada para consumo humano direto ou para irrigação agrícola. Dos 2,5% de água doce, a maior parte (69%) está congelada em geleiras e calotas polares, sendo de difícil acesso. Cerca de 30% estão armazenados em aquíferos como água subterrânea, enquanto apenas 1% é encontrada em rios e lagos, acessível para uso direto. Por isso, é essencial gerenciar esse recurso de maneira sustentável, considerando seus múltiplos usos para garantir sua disponibilidade para as necessidades humanas e ambientais (AZEVÊDO JUNIOR *et al*, 2023).

O Brasil possui um dos maiores patrimônios hídricos do mundo, o que pode se tornar uma significativa vantagem competitiva no cenário internacional, desde que os recursos sejam gerenciados de forma eficiente. Entretanto, a distribuição de água no país é marcada por desigualdades geográficas e populacionais. Embora a região amazônica concentre cerca de 74% da disponibilidade hídrica, essa área é habitada por menos de 5% da população nacional, resultando em um baixo índice de utilização. Nas demais regiões, a oferta de água apresenta um equilíbrio razoável com o consumo, exceto no semiárido nordestino, onde a escassez hídrica é uma realidade persistente, caracterizada por limitações quantitativas para atender às demandas da população e das atividades econômicas (ANA, 2007).

A qualidade da água a ser utilizada é essencial para garantir o equilíbrio ambiental e a segurança de seus múltiplos usos. Em atividades como a pesca, fonte comum de renda no açude Epitácio Pessoa da cidade de Boqueirão-PB, a manutenção de águas limpas e adequadas é crucial para a saúde dos ecossistemas aquáticos e a preservação das espécies. Contaminações químicas ou orgânicas podem comprometer a biodiversidade, afetar a reprodução e o crescimento das populações aquáticas e colocar em risco a segurança alimentar, visto que a pesca desempenha.

No caso de atividades o lazer, como natação e esportes aquáticos, a qualidade da água tem impacto direto na saúde pública. Águas poluídas podem transmitir doenças de origem hídrica, como infecções cutâneas, gastroenterites e outros problemas de saúde, tornando indispensável o cumprimento de normas sanitárias rigorosas e o tratamento necessário para garantir a segurança da população que utilizará de tal efluente (SES/SP, 2009).

Para a irrigação, a qualidade da água é um fator determinante na produtividade agrícola e na preservação do solo. Água com níveis elevados de salinidade ou contaminada por produtos químicos pode causar degradação do solo, reduzir o rendimento das culturas e até contaminar os alimentos, gerando riscos à saúde humana. Dessa forma, assegurar parâmetros adequados de qualidade hídrica é fundamental para preservar as múltiplas funções da água e garantir seu uso sustentável (NUNES SILVA *et al,* 2011).

A legislação vigente no Brasil para garantir a qualidade da água potável está estabelecida pela Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Essa norma especifica os procedimentos de controle e vigilância necessários para assegurar que a água destinada ao consumo humano atenda aos padrões de segurança e qualidade.

Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a qualidade da água utilizada em diferentes finalidades, como irrigação de alimentos, consumo humano, pesca e lazer, no Açude Epitácio Pessoa, no município de Boqueirão, Paraíba. Foram analisados diversos parâmetros físico-químicos, sendo eles: pH (potencial hidrogeniônico), alcalinidade (mg/L), cloretos

(mg/L), condutividade elétrica (µScm-1), salinidade, dureza total (mg/L), dureza de cálcio (mg), dureza de magnésio (mg/L), percentual de cinzas (% cz a 25 °C), sólidos totais dissolvidos (p.p.m), cor (uH), acidez carbônica (p.p.m), turbidez (NTU), concentração de manganês (mg/L) e ferro (mg/L).

Material e Métodos

Os procedimentos metodológicos deste trabalho foram desenvolvidos com o objetivo de avaliar a qualidade físico-química e potabilidade da água do reservatório do Açude Epitácio Pessoa, localizado no município de Boqueirão, no estado da Paraíba. A água analisada é utilizada por diversos meios pela população, como para irrigação de plantações, lazer e consumo direto, como a ingestão. Inicialmente, as amostras de água foram coletadas diretamente no açude, utilizando-se recipientes de garrafas PET de 2000 ml, previamente higienizados. As coletas foram realizadas num período de 3 (três) meses, com intervalos de um mês, totalizando três amostras de águas.

Após a coleta, as amostras foram transportadas ao laboratório de análise de águas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), localizado no campus de Campina Grande – PB, uma vez identificadas, foram submetidas aos procedimentos descritos no manual de análises físico-químicas de água do Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008).

Foram realizadas análises físico-químicas nas amostras, correspondentes aos meses de coleta, focando nos parâmetros de qualidade essenciais, tais como: pH (potencial hidrogeniônico), alcalinidade (mg/L), cloretos (mg/L), condutividade elétrica (µScm-1), salinidade (mg/L) , dureza total (mg/L), dureza de cálcio (mg/L), dureza de magnésio (mg/L), percentual de cinzas (% cz a 25 °C), sólidos totais dissolvidos (ppm), cor (uH), acidez carbônica (p.p.m.), turbidez (NTU), concentração de manganês (mg/L) e ferro (mg/L).

Os resultados obtidos foram registrados em planilhas específicas para cada parâmetro e comparados com os padrões de qualidade para consumo humano, com a finalidade de identificar possíveis variações sazonais e fatores que possam impactar a qualidade da água. Todos os procedimentos adotados seguiram rigorosamente as normas técnicas de coleta, transporte e análise de amostras, garantindo a precisão e confiabilidade dos dados. A metodologia aplicada assegurou uma avaliação criteriosa e detalhada da qualidade da água no reservatório estudado.

As amostras foram obtidas de uma fonte única de água e monitoradas durante três meses. A primeira coleta ocorreu no dia 27 de julho de 2024, a segunda no dia 26 de agosto de 2024 e a terceira no dia 25 de setembro de 2024, as amostras foram retiradas de um único ponto, para que houvesse a comparação dos parâmetros analisado no intervalo de tempo descrito. Para as coletas, foram utilizadas garrafas politereftalato de etileno (PET) de 2L e de 1L.

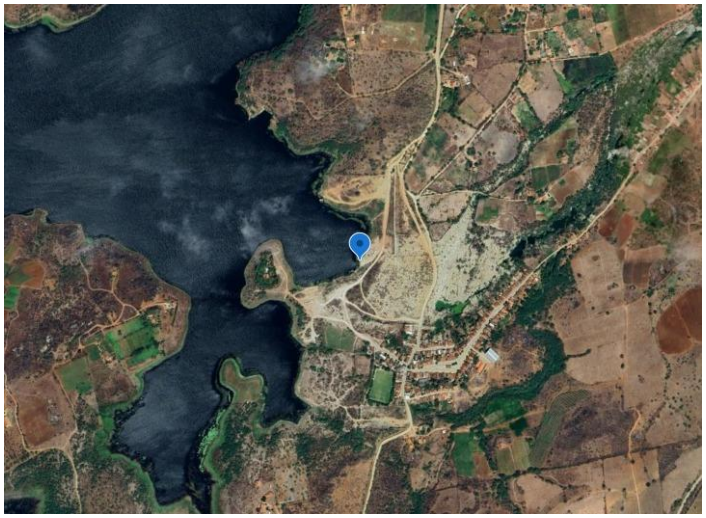


Figura 01: Ponto de coleta de amostras.
Fonte: Google Earth (2024)

Resultados e Discussão

Tabela 01: Resultado das análises físico-químicas.

Parâmetros	Unidade de Medida	1	2	3	V.M.P
pH	-	7,30	7,00	7,61	6,0 - 9,0
Sólidos Totais Dissolvidos	ppm	158,5	164,4	148,6	500
Dureza de cálcio	mg/L	50	50	52	*
Dureza de magnésio	mg/L	50	46	52	*
Dureza Total	mg/L	100	96	104	300
Condutividade Elétrica	uS/cm a 25°C	328,23	317,36	303,00	*

Turbidez	NTU	1,45	1,27	0,04	100
Cinzas	%	0,1665	0,1732	0,1598	*
Cor	uH	18,6	76,6	23	75
Cloreto	mg/L	48	45,5	47	250
Alcalinidade	mg/L	21	25	24	*

V.M.P - Valor Máximo Permitido.

Os valores de pH obtidos (7,30; 7,00; 7,61) situam-se dentro da faixa estabelecida (6,0–9,0), indicando caráter neutro a levemente alcalino das amostras. Esse comportamento é típico de águas com baixa influência de ácidos fortes ou bases concentradas, sugerindo equilíbrio entre espécies químicas dissolvidas, especialmente bicarbonatos. A leve variação entre as medições pode refletir diferenças pontuais na composição iônica ou trocas gasosas com o dióxido de carbono atmosférico. Do ponto de vista de potabilidade e usos gerais, os valores são adequados, não indicando riscos imediatos nem tendência à corrosividade acentuada ou incrustação excessiva.

Os valores de sólidos totais dissolvidos (158,5; 164,4; 148,6 ppm) estão significativamente abaixo do valor máximo permitido (500 ppm), o que indica baixa carga de sais dissolvidos. Esse resultado é indicativo de uma água relativamente "leve", com baixa mineralização, o que pode ser associado a fontes com menor interação com formações geológicas ricas em minerais solúveis. A baixa concentração de STD também sugere boa aceitabilidade sensorial, especialmente em termos de sabor, além de menor potencial de incrustações em sistemas hidráulicos.

A dureza associada ao cálcio apresentou valores de 50; 50; 52 mg/L, indicando uma contribuição moderada desse cátion para a dureza total da água. O cálcio é um dos principais responsáveis pela formação de incrustações, mas os níveis observados não são elevados a ponto de causar problemas operacionais significativos. Além disso, a presença de cálcio é benéfica sob o ponto de vista nutricional, quando considerada no consumo humano, desde que dentro de faixas adequadas, como observado.

Os valores de dureza de magnésio (50; 46; 52 mg/L) são próximos aos do cálcio, demonstrando uma contribuição equilibrada entre os dois principais cátions responsáveis pela dureza. O magnésio, assim como o cálcio, participa da formação de incrustações, mas em níveis moderados pode contribuir positivamente para a qualidade da água. A distribuição relativamente homogênea entre as amostras indica estabilidade na composição mineral da fonte analisada.

A dureza total variou entre 96 e 104 mg/L, mantendo-se bem abaixo do limite de 300 mg/L. Esses valores classificam a água como moderadamente dura, o que representa um equilíbrio interessante: não é excessivamente dura a ponto de causar incrustações severas, nem tão macia que favoreça processos corrosivos. Essa condição é geralmente desejável em sistemas de abastecimento, pois minimiza problemas tanto em tubulações quanto em equipamentos domésticos e industriais.

Os valores de condutividade elétrica (328,23; 317,36; 303,00 µS/cm) refletem a presença de íons dissolvidos na água, estando coerentes com os resultados de sólidos totais dissolvidos. A condutividade observada indica baixa a moderada mineralização, o que confirma a ausência de concentrações elevadas de sais. A pequena variação entre as amostras sugere consistência na composição química, sem evidências de contaminação pontual significativa.

Os valores de turbidez (1,45; 1,27; 0,04 NTU) são extremamente baixos e muito inferiores ao limite estabelecido (100 NTU), indicando alta transparência da água. A turbidez reduzida é um indicativo de baixa presença de partículas em suspensão, como argilas, matéria orgânica ou microrganismos. Esse resultado é positivo tanto do ponto de vista estético quanto sanitário, uma vez que turbidez elevada pode proteger microrganismos patogênicos da ação de desinfetantes.

Os valores de cinzas (0,1665%; 0,1732%; 0,1598%) correspondem à fração inorgânica residual após evaporação da água, refletindo o conteúdo mineral total. Esses resultados são consistentes com os baixos valores de sólidos dissolvidos e indicam baixa concentração de resíduos minerais. A uniformidade dos dados reforça a estabilidade da composição química da água analisada.

Os valores de cor (18,6; 76,6; 23 uH) apresentam variação significativa, com uma das amostras (76,6 uH) ligeiramente acima do valor de referência (75 uH). A cor elevada pode estar associada à presença de matéria orgânica dissolvida, como ácidos húmicos e fúlvicos, ou à presença de metais como ferro e manganês. Embora apenas uma amostra tenha ultrapassado o limite, isso pode indicar uma influência pontual de matéria orgânica ou alteração sazonal na fonte de água.

As concentrações de cloreto (48; 45,5; 47 mg/L) estão bem abaixo do limite máximo permitido (250 mg/L), indicando ausência de contaminação significativa por sais de origem antrópica, como esgotos ou intrusão salina. Os cloretos são bons indicadores de poluição, e os valores observados sugerem que a água mantém boa qualidade em relação a esse parâmetro, sem impacto relevante no sabor ou corrosividade.

Os valores de alcalinidade (21; 25; 24 mg/L) indicam baixa capacidade tampão da água, ou seja, limitada resistência a variações de pH. Isso sugere que, embora o pH atual esteja dentro dos padrões, ele pode sofrer alterações mais facilmente diante da introdução de substâncias ácidas ou básicas. A alcalinidade está principalmente associada à presença de bicarbonatos, e os valores observados indicam baixa concentração desses íons.

De forma geral, os resultados indicam que a água analisada apresenta boa qualidade físico-química, com a maioria dos parâmetros dentro dos limites estabelecidos. A baixa mineralização, associada a níveis moderados de dureza, sugere uma água equilibrada e adequada para consumo e uso geral. A única ressalva refere-se à variação observada na cor, que pode demandar monitoramento adicional para identificar possíveis fontes de matéria orgânica. No conjunto, os dados indicam ausência de contaminação significativa e estabilidade nas características analisadas.

Adicionalmente, é importante destacar que a estabilidade observada entre as três coletas indica que o corpo hídrico não sofreu alterações bruscas ao longo do período analisado. Esse comportamento sugere que, no intervalo estudado, não houve influência significativa de fatores externos, como descargas de poluentes, variações climáticas extremas ou mudanças no uso do entorno do reservatório. Essa constância reforça a confiabilidade dos resultados obtidos.

Outro aspecto relevante refere-se à interação entre os parâmetros analisados, especialmente entre sólidos dissolvidos, condutividade elétrica e dureza. A coerência entre esses resultados indica que a composição iônica da água está em equilíbrio, o que é característico de sistemas naturais pouco impactados por atividades antrópicas intensas. Essa relação também contribui para validar a consistência dos dados experimentais.

Do ponto de vista ambiental, a qualidade da água observada é favorável à manutenção da vida aquática, uma vez que parâmetros como pH, turbidez e concentração de sais estão dentro de faixas adequadas para o desenvolvimento de organismos. Isso é especialmente importante considerando o uso do reservatório para pesca, pois condições físico-químicas equilibradas favorecem a biodiversidade e a produtividade biológica.

Em relação aos usos antrópicos, como irrigação e lazer, os resultados também são satisfatórios. A baixa salinidade e os níveis controlados de cloretos reduzem o risco de degradação do solo agrícola, enquanto a baixa turbidez e ausência de contaminação significativa contribuem para a segurança em atividades recreativas. Dessa forma, a água atende a múltiplas finalidades sem apresentar restrições relevantes.

Por fim, ressalta-se a importância da continuidade do monitoramento da qualidade da água, especialmente considerando possíveis variações sazonais e mudanças no uso do solo na região. A realização periódica de análises permite identificar precocemente qualquer alteração nos parâmetros, garantindo a preservação do recurso hídrico e a segurança dos seus diversos usos ao longo do tempo.

Considerações Finais

De maneira geral, os resultados obtidos demonstram que a água analisada apresenta boa qualidade físico-química, com a maioria dos parâmetros dentro dos limites estabelecidos. O pH neutro a levemente alcalino, aliado à baixa concentração de sólidos totais dissolvidos, indica uma água equilibrada e com baixa mineralização, o que favorece tanto o consumo humano quanto o uso em sistemas de distribuição.

A dureza total, classificada como moderada, revela um equilíbrio importante entre os teores de cálcio e magnésio. Essa característica é positiva, pois evita tanto problemas de incrustação excessiva quanto efeitos corrosivos que podem ocorrer em águas muito macias. Dessa forma, a água apresenta condições adequadas para uso doméstico e industrial, sem comprometer significativamente equipamentos ou tubulações.

Os valores de condutividade elétrica e cinzas reforçam a baixa presença de sais dissolvidos, indicando estabilidade na composição química das amostras. Além disso, a baixa turbidez observada em todas as análises evidencia a ausência de partículas em suspensão, o que contribui para uma melhor qualidade estética e sanitária da água.

No que se refere aos íons dissolvidos, como cloretos e alcalinidade, os resultados mostram concentrações reduzidas, sem indícios de contaminação por ωηρ antrópicas ou intrusão salina. A baixa alcalinidade, embora indique menor capacidade tampão, não compromete a qualidade atual da água, mas sugere a necessidade de atenção quanto a possíveis variações de pH ao longo do tempo.

Entretanto, destaca-se a variação observada no parâmetro cor, com uma das amostras apresentando valor ligeiramente acima do limite recomendado. Esse fato pode estar associado à presença de matéria orgânica dissolvida ou a condições ambientais específicas no momento da coleta, indicando a importância de um acompanhamento mais detalhado desse parâmetro.

Por fim, conclui-se que a água analisada apresenta, de modo geral, características satisfatórias e compatíveis com os padrões de qualidade físico-química. Ainda assim, recomenda-se a continuidade do monitoramento, especialmente em relação à cor e à estabilidade dos parâmetros ao longo do tempo, garantindo assim a manutenção da qualidade e a segurança para os diferentes usos pretendidos.

Agradecimentos

Gostaríamos de expressar nossos sinceros agradecimentos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) – Campus Campina Grande, pelo suporte institucional oferecido ao longo da realização deste trabalho. A disponibilização da infraestrutura, incluindo laboratórios, equipamentos e insumos, foi essencial para a execução das atividades experimentais e para a obtenção dos resultados apresentados.

Manifestamos também nossa profunda gratidão ao grupo de pesquisa CATA – Ciências Agrárias e Tecnologia de Alimentos, pelo acompanhamento científico, incentivo constante e contribuições relevantes em todas as etapas do estudo. O apoio do grupo foi fundamental para o desenvolvimento técnico e acadêmico deste trabalho.

Aos técnicos de laboratório do IFPB, deixamos um agradecimento especial pela colaboração durante a realização das análises, pela disposição em auxiliar nas atividades práticas e pelo compartilhamento de conhecimentos que enriqueceram significativamente este processo. Reconhecemos, igualmente, a importância dos docentes envolvidos, cujas orientações e estímulo acadêmico foram indispensáveis para a condução desta pesquisa.

Por fim, agradecemos a todos os colegas e colaboradores que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste estudo. O apoio, a troca de experiências e o trabalho em equipe foram determinantes para a concretização desta pesquisa, tornando possível a obtenção dos resultados alcançados.

Referências Bibliográficas

DE AZEVÊDO JUNIOR, Célio Manso et al. **Roteirização das coletas de amostras de água para controle da qualidade de uma empresa pública de saneamento: aplicação do problema de roteamento de veículos (VRP) por meio da ferramenta VRPSolverEasy.** *Revista de Saneamento e Meio Ambiente*, São Paulo, v. 10, n. 3, p. 45-60, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Componente da série de relatórios sobre o estado e perspectivas do meio ambiente no Brasil.** Brasília, 2021. Disponível em: https://www.ceivap.org.br/estudos/Geo-Brasil-Recursos-Hidricos-Resumo-Executivo.pdf. Acesso em: 10 dez. 2024.

SÃO PAULO (Estado). **Centro de Vigilância Epidemiológica.** *Doenças transmitidas por água e alimentos: perguntas e respostas*. São Paulo, 2009. Disponível em: https://www.saude.sp.gov.br/resources/cve-centro-de-vigilancia-epidemiologica/areas-de-vigilancia/doencas-transmitidas-por-agua-e-alimentos/doc/2009/2009dta_pergunta_resposta.pdf. Acesso em: 10 dez. 2024.

NUNES SILVA, Ítalo et al. **Qualidade da água na irrigação.** *Agropecuária Científica no Semiárido*, v. 7, n. 3, p. 1-15, jul./set. 2011. Disponível em: http://150.165.111.246/ojs-patos/index.php/ACSA/index. Acesso em: 10 dez. 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 7 de maio de 2021. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.** *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acesso em: 10 dez. 2024.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ (IAL). ***Métodos físico-químicos para análise de alimentos*.** 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.

IDENTIFICAÇÃO DOS PRODUTOS DE TRANSFORMAÇÃO E MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DE COLCHICINA E NITAZOXANIDA POR UVC/H_2O_2

Victor Rodrigues Alves de Paula[1], Gabrielly Machado Santos[2], Eduardo Oliveira Marson[3], Lucas Gustavo da Costa[4], Raquel Wielens Becker[5], Carla Sirtori[6], Raquel Maria Ferreira de Sousa[7], Alam Gustavo Trovó[8]

1 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: victoralves2006@ufu.br; 2 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: gabrielly.santos@ufu.br; 3 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: dudumarson@hotmail.com; 4 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: lucasgustavodacosta@ufu.br; 5 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: raquelwbecker@gmail.com; 6 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: carla.sirtori@ufsm.br; 7 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: rsousa@ufu.br; 8 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: alamtrovo@ufu.br

Palavras-chave: processos oxidativos avançados; fármacos; intermediários.

Introdução

A presença de microcontaminantes orgânicos, especialmente fármacos, em ambientes aquáticos tem sido amplamente reportada e representa uma preocupação crescente devido à sua persistência, bioatividade e potencial de impacto sobre organismos aquáticos e ecossistemas (Lopes-Ferreira *et al*., 2022). Compostos como a colchicina (COL) e a nitazoxanida (NTZ) são frequentemente detectados em efluentes de estações de tratamento de água e esgoto em concentrações que variam de ng L^{-1} a µg L^{-1}, uma vez que os sistemas convencionais não são totalmente eficientes na sua remoção (Santos *et al*., 2025). Como consequência, esses contaminantes podem atingir corpos hídricos, onde permanecem sujeitos a processos naturais e induzidos, que podem levar à formação de produtos de transformação (PTs) com propriedades distintas do composto original. Dentre as tecnologias empregadas para a remoção desses compostos, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) destacam-se pela elevada eficiência na degradação de substâncias recalcitrantes, sobretudo devido à geração de espécies altamente reativas, como os radicais hidroxila ($HO^{\bullet}$) (Araújo *et al*., 2021). Esses processos promovem a transformação estrutural dos fármacos, levando à formação de PTs (Sharma *et al*., 2018). No entanto, a simples remoção do composto original não garante a eliminação do risco ambiental, uma vez que os PTs podem apresentar maior persistência, mobilidade ou toxicidade. Nesse contexto, a NTZ possui um anel tiazólico e grupo nitro, que favorecem reações de transferência eletrônica e hidroxilação, enquanto a COL apresenta uma estrutura tricíclica com grupos metoxila, sendo suscetível a reações de abstração de hidrogênio e desmetilação. Essas diferenças estruturais influenciam diretamente as rotas de degradação e os PTs gerados, tornando relevante a investigação conjunta desses compostos em sistemas oxidativos (Santos *et al*., 2025). A identificação e caracterização dos PTs são fundamentais para a compreensão dos mecanismos de degradação envolvidos. Técnicas analíticas de alta resolução, como a cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas de tempo de voo (UHPLC-QTOF MS), permitem a elucidação estrutural desses compostos, fornecendo subsídios para a proposição de vias reacionais e para a avaliação da eficiência dos processos aplicados (Frois *et al*., 2025). Este trabalho tem como objetivo investigar os PTs gerados durante a degradação da COL e da NTZ em sistema UVC/H_2O_2, bem como elucidar os mecanismos de degradação envolvidos, contribuindo para o entendimento das rotas de transformação de fármacos em ambientes aquáticos.

Material e Métodos

Os experimentos de fotodegradação foram feitos em reator de vidro âmbar (4,3 cm de profundidade e 15,5 cm de diâmetro), sob agitação magnética (180 rpm), equipado com duas lâmpadas UVC de baixa pressão (8 W cada), com emissão máxima em 254 nm. A irradiância do sistema (4,9 W m^{-2}) foi determinada utilizando um radiômetro (Apogee MU-100) equipado com sensor na faixa de 250-400 nm, posicionado a 1 cm das lâmpadas e no mesmo ângulo de incidência da radiação em relação ao meio reacional. As reações foram conduzidas com 500 mL de solução aquosa de COL e NTZ (1,5 mg L^{-1}; 3,75 µM e 4,9 µM, respectivamente), em pH 7,0 e na presença de 50 µM (1,70 mg/L) de peróxido de hidrogênio (H_2O_2). A identificação dos PTs foi realizada por UHPLC-QTOF MS. A separação cromatográfica foi feita em coluna de fase reversa C18, utilizando como fase móvel água com 0,1% de ácido fórmico e metanol, em modo gradiente. O volume de injeção foi de 5 µL e a vazão de 0,5 mL m. O espectrômetro de massas foi operado no modo de ionização positiva, com aquisição por dissociação induzida por colisão de banda larga (bbCID), permitindo a obtenção simultânea de espectros MS e MS/MS. Os dados foram adquiridos na faixa de m/z 50-1000, com taxa de varredura de 2 Hz. A identificação dos PTs baseou-se no aparecimento e desaparecimento de picos cromatográficos ao longo do tempo de tratamento. As fórmulas moleculares propostas para os íons (moleculares e fragmentos) foram atribuídas com erro máximo de ± 5 ppm, utilizando o software DataAnalysis 4.2, com apoio de ferramentas de composição elementar e equivalência de dupla ligação (EDL).

Resultados e Discussão

Quatro PTs foram identificados como resultantes da degradação da NTZ pelo processo H_2O_2/UVC: tizoxanida (TZN), NTZ-PT1, NTZ-PT2 e NTZ-PT3, com tempos de retenção de 9,0, 4,1, 5,8 e 3,7 min, respectivamente. Com base em análises de espectrometria de massas e perfis de fragmentação obtidos via bbCID, as estruturas químicas desses compostos foram propostas (Figura 1).

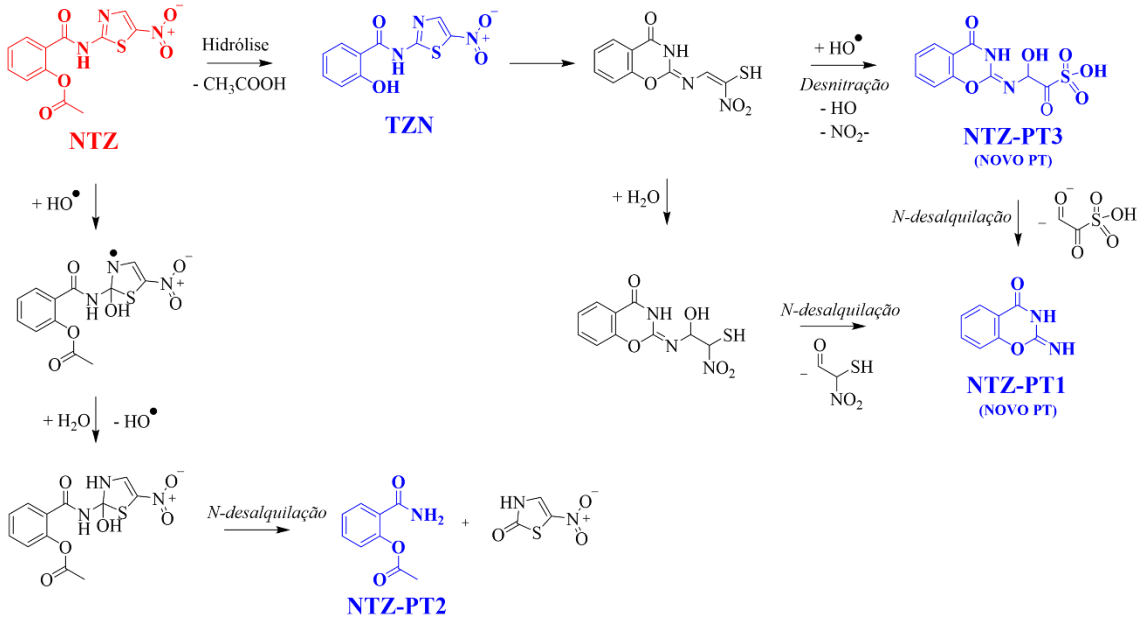


Figura 1: Estruturas químicas propostas para os produtos de transformação da nitazoxanida (NTZ) formados durante o processo H_2O_2/UVC, com base nos dados de espectrometria de massas e perfis de fragmentação.
Fonte: Adaptado de Santos et al. (2025).

A TZN (m/z 266,0230; fórmula molecular $C_{10}H_8N_3O_4S^+$) é um metabólito resultante da hidrólise da NTZ, processo amplamente descrito na literatura (Lira *et al*., 2025), no qual ocorre a clivagem do grupo acetil por ataque nucleofílico da água. A partir da TZN, foram propostas duas rotas reacionais distintas levando à formação de NTZ-PT1 e NTZ-PT3 (Figura 1). O NTZ-PT1 (m/z 163,0501; $C_8H_7N_2O_2^+$) pode ser gerado por ataque intramolecular do grupo hidroxila fenólico ao carbono do anel tiazólico, favorecido pelo caráter eletrofílico deste devido à presença do grupo nitro. Esse processo promove a abertura do anel tiazólico, formando um intermediário instável que pode seguir diferentes vias: (i) adição de água seguida de N-desalquilação, resultando em NTZ-PT1; ou (ii) ataque de radical hidroxila, promovendo desnitração e levando à formação de NTZ-PT3 (m/z 301,0127; $C_{10}H_9N_2O_7S^+$). Alternativamente, esse intermediário pode sofrer apenas N-desalquilação, também originando NTZ-PT1. Ressalta-se que NTZ-PT1 e NTZ-PT3 não foram previamente reportados na literatura, sendo aqui descritos pela primeira vez.

O NTZ-PT2 (m/z 180,0656; $C_9H_{10}NO_3^+$) é formado via hidroxilação do anel tiazólico mediada por radicais hidroxila, seguida da remoção da cadeia N-alquila, conforme já descrito na literatura (Frois *et al*., 2025).

O perfil temporal de degradação dos PTs (Figura 2) evidenciou dois comportamentos distintos: (i) TZN e NTZ-PT1 foram detectados desde o início do processo e apresentaram redução significativa ao longo do tratamento, sugerindo rápida formação seguida de degradação; (ii) NTZ-PT2 e NTZ-PT3 apresentaram aumento inicial na concentração até aproximadamente 10-15 min, seguido de posterior degradação. Ao final do tratamento, TZN, NTZ-PT1 e NTZ-PT2 não foram detectados, indicando elevada eficiência do processo. Por outro lado, o NTZ-PT3 apresentou maior persistência, com intensidade de sinal ainda significativa, sugerindo menor reatividade nas condições experimentais empregadas.

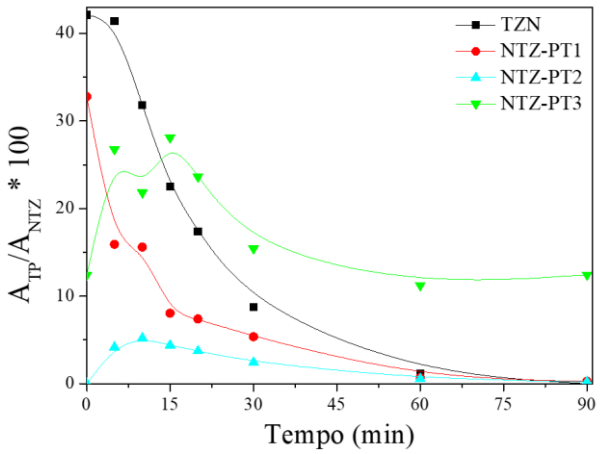


Figura 2: Perfis temporais de formação e degradação dos produtos de transformação da nitazoxanida (TZN, NTZ-PT1, NTZ-PT2 e NTZ-PT3) durante o tratamento pelo processo H_2O_2/UVC.
Fonte: Adaptado de Santos et al. (2025).

A degradação da COL pelo processo H_2O_2/UVC resultou na formação de quatro PTs (COL-PT1, COL-PT2, COL-PT3 e COL-PT4). Os quatro picos cromatográficos (tempos de retenção de 6,0, 6,1, 6,6 e 8,2 min) apresentaram o mesmo íon molecular (m/z 386,1604), indicando a formação de isômeros estruturais.

Com base nas análises de espectrometria de massas e nos perfis de fragmentação obtidos por bbCID, foram propostas possíveis estruturas químicas para esses isômeros (Figura 3). Os isômeros COL-PT1, COL-PT2 e COL-PT3 apresentaram tempos de retenção e espectros de massas muito semelhantes, impossibilitando sua distinção inequívoca. Em contraste, o COL-PT4 apresentou maior tempo de retenção e diferenças sutis no perfil de fragmentação. Esse comportamento pode ser atribuído à posição do grupo hidroxila, possivelmente em posição orto em relação a uma carbonila, o que reduz a polaridade da molécula em comparação com os demais isômeros, justificando o maior tempo de retenção observado.

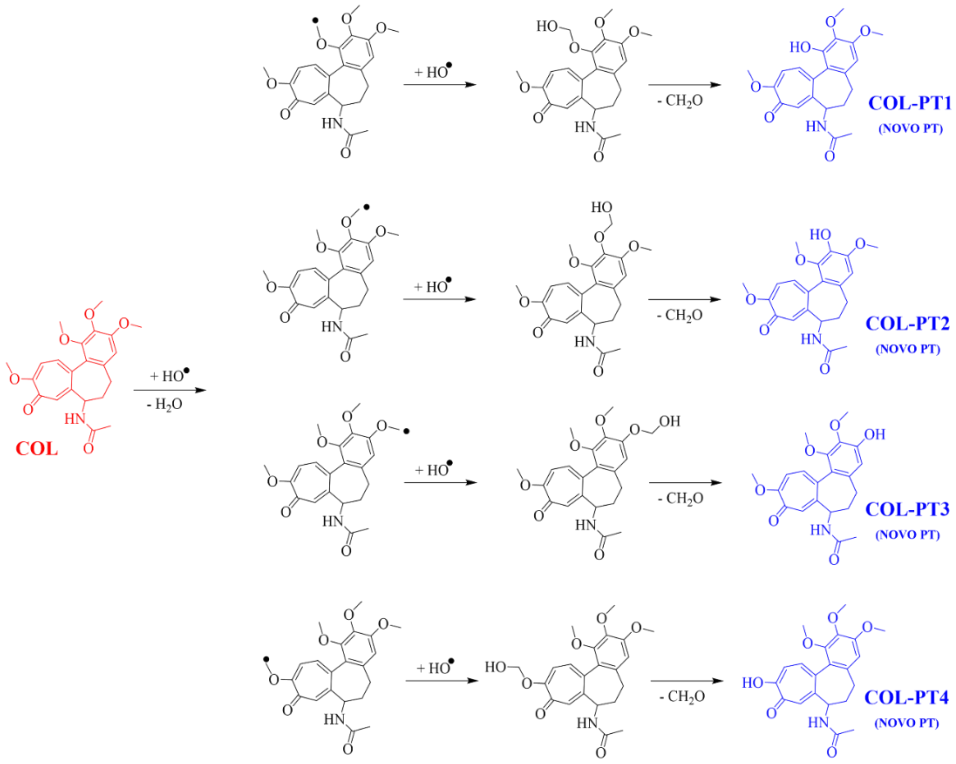


Figura 3: Estruturas químicas propostas para os produtos de transformação da colchicina (COL-PT1, COL-PT2, COL-PT3 e COL-PT4) obtidas a partir de análises de UHPLC-QTOF MS e perfis de fragmentação.
Fonte: Adaptado de Santos et al. (2025).

A formação dos COL-PTs pode ser explicada por um mecanismo iniciado pela abstração de hidrogênio mediada por radicais hidroxila. Nesse processo, a abstração de hidrogênio do grupo metoxi leva à formação de um radical α-alcóxi intermediário, que evolui por adição de um segundo radical hidroxila, gerando um hemiacetal. A subsequente eliminação de formaldeído resulta na formação do produto *O*-desmetilado correspondente.

Até onde se tem conhecimento, esses PTs não foram previamente reportados na literatura, sugerindo que os compostos derivados da COL identificados neste estudo representam uma nova via de degradação sob condições oxidativas.

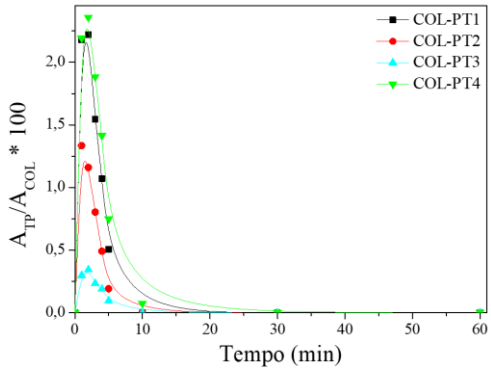


Figura 4: Perfis temporais de formação e degradação dos produtos de transformação da colchicina durante o processo H_2O_2/UVC, evidenciando rápida formação seguida de completa degradação.
Fonte: Adaptado de Santos et al. (2025).

O perfil temporal dos COL-PTs (Figura 4) evidencia formação rápida nos primeiros minutos de tratamento, seguida de completa degradação ao longo do processo. Todos os isômeros foram removidos após aproximadamente 10 minutos de exposição, indicando elevada reatividade e eficiência do sistema H_2O_2/UVC.

Considerações Finais

A degradação da COL e NTZ pelo processo UVC/H_2O_2 resultou na formação de diferentes PTs, evidenciando a influência das características estruturais de cada fármaco nas rotas de degradação.

Para a NTZ, foram identificados quatro PTs, sendo dois deles inéditos na literatura. Já para a COL, foram identificados quatro produtos isoméricos, os quais, até onde se tem conhecimento, também não foram previamente reportados, representando uma nova contribuição para o entendimento de transformação desses compostos em sistemas oxidativos.

Esses resultados reforçam a relevância da identificação e caracterização de PTs na avaliação de POAs, uma vez que a remoção do composto original não implica, necessariamente, na eliminação do risco ambiental. Nesse sentido, o presente estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre o comportamento de fármacos em ambientes aquáticos, fornecendo subsídios para futuras avaliações de impacto ambiental e para o aprimoramento de tecnologias de tratamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e à Rede de Laboratórios Multiusuários (RELAM-UFU) pelo suporte estrutural e analítico. Agradecem também às agências de fomento FAPEMIG, CAPES e CNPq pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

ARAÚJO, B. A.; SOUZA, J. E. S.; SARMENTO, K. K. F. Processos oxidativos avançados para remoção de contaminantes emergentes em água. Research, Society and Development, v. 10, p. 1–19, 2021.

FROIS, C. F. G.; BECKER, R. W.; LÜDTKE, D. S.; LIMA, E. C.; SIRTORI, C. Degradation of nitazoxanide by solar photo-Fenton: identification of transformation products. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, v. 462, p. 116228, 2025.

LOPES-FERREIRA, M.; QUADRA, G. R.; ROLAND, F. Environmental aspects of aquatic ecotoxicology. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 190, p. 110102, 2020.

SANTOS, G. M.; COSTA, L. G.; MARSON, E. O.; BESSA, M. A. S.; BECKER, R. W.; FROIS, C. F. G.; SIRTORI, C.; FERREIRA, A. S.; SOUSA, R. M. F.; BORGES NETO, W.; SANTOS, M. B.; CARVALHO, S. R.; TROVÓ, A. G. Chemical and toxicological evaluation of micropollutants degradation in tertiary municipal wastewater by H_2O_2/UVC. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 13, p. 119829, 2025.

SHARMA, V. K.; TRIANA, A.; KIM, H. Oxidative degradation of pharmaceuticals: a review. Chemosphere, v. 196, p. 281–298, 2018.

ANÁLISE DO RISCO À SAÚDE HUMANA POR METAIS E NITRATO EM ÁGUA POTÁVEL: ESTUDO DE CASO EM CASCAVEL-PR

1,2 Angie Rocio Barrera Contreras, 2 Marcela Boroski, 3 Rafaella Costa Bonugli Santos

[1] Universidade Federal do Paraná (UFPR) e Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), e-mail: angierociobarreracontreras@gmail.com; [2] Universidade Federal da Integração Latino-Americana, e-mail: marcela.boroski@unila.edu.br; [3] Universidade Federal da Integração Latino-Americana, e-mail: rafaella.santos@unila.edu.br

Palavras-chave: Agrotóxicos; Substâncias inorgânicas; Qualidade da água.

Introdução

A qualidade da água potável tem sido cada vez mais afetada pelos resíduos gerados pelas atividades antrópicas, como o uso de agrotóxicos e fertilizantes, cujas formulações podem conter metais e compostos nitrogenados que contribuem para a presença de nitrato no ambiente. O acesso à água potável de qualidade e as condições adequadas de saneamento impactam diretamente a saúde pública (PAHO, 2017).

A presença de contaminantes como metais pesados representa risco significativo, pois podem causar efeitos tóxicos mesmo em baixas concentrações. O chumbo, por exemplo, é um metal persistente que se bioacumula no organismo, podendo afetar o desenvolvimento cognitivo infantil e provocar disfunções cardiovasculares, renais e reprodutivas em adultos (EPA, 2025). Diversos estudos têm demonstrado que os metais podem alcançar corpos d'água por diferentes processos, como o deslocamento de partículas do solo, dispersão pelo vento, incêndios florestais, erupções vulcânicas, além de atividades antrópicas, como mineração e agricultura (EPA, 2025; WHO, 2017).

Por outro lado, o nitrato, é um indicador clássico de contaminação antrópica proveniente de atividades agrícolas e efluentes. Embora ocorra naturalmente, concentrações que excedem os limites regulatórios podem representar riscos à saúde pública em cenários específicos. Sobre condições de baixa acidez gástrica, o nitrato pode ser reduzido a nitrito, o qual está associado à metaemoglobinemia infantil e a potenciais distúrbios gastrointestinais (ALAM *et al*., 2021; EPA, 2025; REZAEI et al., 2018).

Apesar dos avanços regulatórios, ainda existem lacunas nos sistemas de vigilância da qualidade da água, que nem sempre atendem plenamente ao indicador 6.3 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, relacionado à melhora da qualidade da água, minimizando a liberação de produtos químicos (PAHO, 2017). No Brasil, o monitoramento é regulamentado pela Portaria GM/MS n.º 888/2021 e operacionalizado pelo Programa Nacional de Vigilância da Qualidade da Água (Vigiagua), com dados disponibilizados no SISAGUA (BRASIL, 2025). Embora os limites nacionais sejam semelhantes aos estabelecidos pela OMS e da União Europeia, o aumento do uso de novos compostos químicos reforça a necessidade de revisões periódicas desses valores para garantir a proteção ambiental e da saúde humana.

Nesse contexto, mesmo quando os contaminantes são detectados em concentrações abaixo dos limites estabelecidos nas normas nacionais (Portaria GM/MS n.º 888/2021) e internacionais (OMS e União Europeia Diretiva 2020/2184), sua ocorrência na água potável continua sendo preocupante. Isso se deve ao fato de que a água é consumida diariamente e, portanto, a exposição contínua, mesmo em concentrações consideradas seguras, pode representar riscos à saúde quando se considera o efeito cumulativo dessas substâncias.

Assim, pela possibilidade de exposição crônica, torna-se necessário utilizar ferramenta que permita avaliar os potenciais riscos associados à ingestão desses contaminantes. Nesse sentido, a EPA, US Environmental Protection Agency (EPA, 2001) propôs métodos, como o cálculo da Ingesta Crônica Diária (CDI), do Quociente de Perigo (HQ) e do Índice de Perigo Total (THI). A CDI estima a quantidade de contaminante ingerida diariamente por uma pessoa ao longo do tempo, podendo, em concentrações elevadas, acumular-se no organismo e causar efeitos crônicos à saúde. O HQ indica o risco associado à exposição individual a um contaminante, sendo que valores ≥ 1 sugerem potencial risco à saúde. Já o THI corresponde à soma dos riscos de diferentes contaminantes presentes simultaneamente na água, permitindo avaliar o perigo combinado dessas substâncias em relação ao risco não carcinogênico.

Diante da escassez de estudos sobre o risco cumulativo de metais e nitrato em água potável, este trabalho analisa dados do SISAGUA do município de Cascavel-PR referentes aos anos 2015 e 2019. A escolha desse município deve-se ao fato de estar entre os maiores consumidores de agrotóxicos do Paraná (ADAPAR, 2024), o que pode favorecer a presença desses contaminantes na água. Os resultados permitem avaliar a adequação dos limites legais e contribuem para discussões sobre sua atualização, em consonância com as metas dos ODS relacionadas à água e saneamento.

Materiais e Métodos

O estudo foi desenvolvido a partir dos dados do SISAGUA referentes ao município de Cascavel-PR, os quais foram obtidos do conjunto de informações sobre vigilância na janela de demais parâmetros, que incluem substâncias inorgânicas, agrotóxicos, parâmetros organolépticos e substâncias orgânicas. A partir desse conjunto, foram filtradas as informações relacionadas às substâncias inorgânicas, com foco nos metais Sb, As, Ba, Cd, Pb, Cu, Cr e Hg e nitrato.

As informações analisadas correspondem às análises realizadas nos anos de 2015 e 2019, de 41 pontos de coleta entre a zona urbana e rural (Figura 1), sendo importante destacar que são amostras independentes, ou seja, não se trata das mesmas coletas.

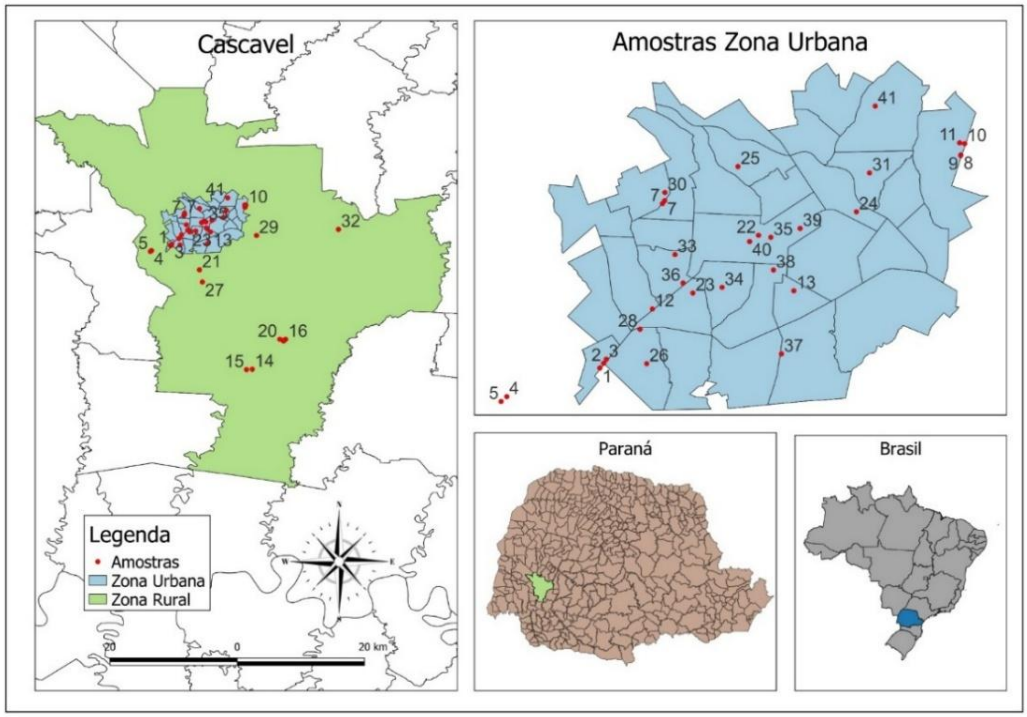


Figura 1: Localização aproximada das amostras no município de Cascavel-PR

Com base nesses dados, e conforme a guia da avaliação do risco da EPA (2001), foi estimado o valor da Ingesta Diária Crônica (CDI) para diferentes grupos etários da população (bebês, crianças, adolescentes, adultos e idosos), por meio da Equação (1):

$$CDI = \frac{C\ x\ IR\ x\ F\ xE\ D}{BW\ x\ AT} \quad (1)$$

onde *CDI* é a ingesta diária crônica (mg/kg-dia), *C* a concentração do composto químico de interesse na água (mg/L), *IR* a taxa de ingestão de água (L/dia), *F a* frequência da exposição (dia/ano), *ED* a duração média da exposição (ano), *BW* o peso corpóreo médio do indivíduo durante a exposição (kg), AT o período de exposição médio durante a exposição não carcinogênica (dias).

Assim, para as análises do CDI, foram tomados como dados de referência os valores da Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros usados para calcular os valores de Ingesta Diária Crônica (CDI)

Parâmetro	Unidade	Bebês (<1)	Crianças (1-11)	Adolescentes (12-18)	Adulto (>18)	Idoso (>60)
IR	L/dia	0,75	1	2	2,5	2
F	dia/ano	365	365	365	365	365
ED	ano	1	8	16	40	70
BW	kg	5	25	50	70	70
AT	dias	365	2920	5840	14600	25550
C	mg/L	Dados SISAGUA				

Fonte: Rezaei *et al.* (2018), Alam *et al.* (2021), IBGE (2025)

Em seguida, calculou-se o Quociente de Perigo (HQ) não carcinogênico para cada metal, utilizando os valores de dose de referência (RfD) estabelecidos pela EPA (2025). Esses valores são apresentados na Tabela 2 e foram aplicados conforme à Equação (2):

$$HQ = \frac{CDI}{RfD} \quad (2)$$

onde *HQ* é o quociente de perigo, *CDI* a ingesta diária crônica (mg/kg-dia) e *RfD* a dose de referência (mg/kg-dia).

Por fim, foi determinado o Índice de Perigo Total (THI) não carcinogênico, visando avaliar o risco cumulativo à saúde decorrente da exposição simultânea a múltiplos metais, conforme a Equação (3):

$$THI = \sum HQi \quad (3)$$

Com base nesses dados, tabelas e gráficos de barras no Excel® (versão 2509) foram elaborados para observar e avaliar o risco exercido pela presença de metais e nitrato na água potável sobre a população, conforme as equações da EPA (2001).

Tabela 2: Valores de RfD implementados no cálculo do quociente de perigo. NES: Não existe nível de exposição seguro, A-NMIT: Avaliado por níveis máximos de ingesta tolerável, NE: Não estabelecido

Parâmetro	RfD (mg/kg-dia)	Parâmetro	RfD (mg/kg-dia)
Sb	4×10^{-4}	**Cu**	A-NMIT
As	6×10^{-5}	**Cr**	9×10^{-4}
Ba	2×10^{-1}	**Hg**	NE
Cd	5×10^{-4}	**Nitrato**	1,6
Pb	NES	-	-

Fonte: EPA (2025)

Resultados

A análise inicial dos dados disponíveis no SISAGUA revelou a presença dos metais Sb, As, Ba, Cd, Pb, Cu, Cr e Hg, além de nitrato, nos diferentes pontos de amostragem. Destacam-se os pontos 21 e 27, nos quais todos os contaminantes foram detectados. Apesar disso, as concentrações observadas permaneceram abaixo dos limites estabelecidos pela legislação brasileira, pela OMS e pela EU. No entanto, foram identificadas divergências entre os valores de referência adotados por essas entidades. No caso do Sb, a OMS estabelece um limite permissivo (0,02 mg/L) em comparação ao Brasil e à UE (0,005 mg/L). Para o Ba, a UE não tem especificado um valor, enquanto a OMS estipula 1,3 mg/L e o Brasil 0,7 mg/L.

Essas diferenças entre os limites regulatórios evidenciam a ausência de uniformidade entre as entidades reguladoras, frequentemente associada a fatores técnicos, econômicos e às metodologias disponíveis no momento de definição desses valores. Além disso, muitos desses limites foram estabelecidos em períodos em que as metodologias analíticas apresentavam menor sensibilidade em comparação às técnicas atualmente disponíveis. Considerando essas diferenças normativas, torna-se necessário avaliar os riscos potenciais à saúde por meio de indicadores como CDI, HQ e THI, os quais permitem uma análise mais abrangente da exposição aos contaminantes.

Entretanto, ao realizar o cálculo do HQ, algumas limitações foram encontradas devido à ausência de valores de RfD para o Pb, Cu e Hg. No caso do Pb, por exemplo, não existe um limiar seguro de ingestão, uma vez que há evidências de que mesmo concentrações muito baixas podem causar atraso no desenvolvimento físico e mental de crianças, além de problemas renais e de pressão arterial em adultos. Para o Hg, ainda não há avaliação pelo IRIS, mas existem dados que indicam danos ao sistema nervoso e renal (EPA, 2025).

Situação semelhante ocorre com o Cu, que, apesar de ser um nutriente essencial usado na função cerebral (regulação de neurotransmissores), nos tecidos moles, nos ossos (sínteses de colágeno) e no metabolismo de nutrientes, não é avaliado por meio do RfD, mas sim por Níveis Máximos de Ingesta Tolerável (ULs, na sua sigla em inglês) (NIH, 2022). Assim, não foram avaliados os valores de HQ para estes metais, nem foram tomados em consideração nas análises do THI, mas foram calculados os CDI e uma análise sobre a presença deles nas localizações com maior risco para a saúde.

Entre os metais avaliados quanto ao risco não carcinogênico, a ordem de risco indicada pelos valores de HQ foi: As > Cr > Sb > Cd > Ba. O As foi detectado em 13 pontos de amostragem, apresentando valores de HQ superiores a 1 em todas as faixas etárias analisadas, com exceção dos pontos 21 e 27, onde esse valor foi observado apenas para a faixa etária de bebês.

O Cr foi identificado em 14 pontos, com valores de HQ acima do limite de referência para bebês, indicando potencial risco não carcinogênico para essa faixa etária. O Sb foi detectado nos pontos 21 e 27, apresentando valores de HQ superiores a 1 apenas para bebês, enquanto as demais faixas etárias permaneceram dentro de níveis considerados aceitáveis.

Para o Cd, os valores de CDI não apresentaram variações expressivas entre os pontos avaliados. Embora os valores para bebês tenham sido relativamente mais elevados em comparação às demais faixas etárias, todos permaneceram abaixo do limite de referência (HQ < 1). Situação semelhante foi observada para o Ba, cujos valores de CDI e HQ permaneceram baixos em todas as faixas etárias, ainda que os bebês tenham apresentado valores relativamente mais elevados.

Por outro lado, o nitrato, por sua forte associação com atividades antrópicas, foi detectado em 100% dos pontos avaliados. Em relação à CDI, os valores médios permaneceram relativamente baixos para todas as faixas etárias. No entanto, a distribuição apresentou alguns valores atípicos, especialmente na faixa etária de bebês, o que resultou em valores relativamente mais elevados para esse grupo. Ainda assim, na análise de HQ nenhum dos valores ultrapassou o limite de referência.

A Figura 2 apresenta os valores do THI, calculado a partir da soma dos quocientes de perigo dos contaminantes avaliados, considerando que esses compostos ocorrem simultaneamente na água. Dos 41 pontos analisados, 25 apresentaram valores superiores a 1 para a faixa etária dos bebês, 11 deles apresentaram os maiores valores de THI para todas as faixas etárias, representando um risco não carcinogênico para a saúde.

Este cenário é preocupante, uma vez que mais de 50% dos locais analisados apresentaram valores de THI superiores ao limite de referência. Adicionalmente, em várias dessas localizações também foi observada a presença de Pb e Hg, o que pode intensificar os riscos à saúde, considerando que esses metais são reconhecidos por seus efeitos tóxicos mesmo em baixas concentrações.

Com base nos resultados, observa-se que a faixa etária mais vulnerável é a dos bebês, uma vez que o risco é potencializado tanto pela possibilidade de transferência de substâncias de mãe para o filho, quanto por estarem em pleno desenvolvimento, como por serem propensos a afetações cruzadas por contato e ingestão direta de objetos contaminados.

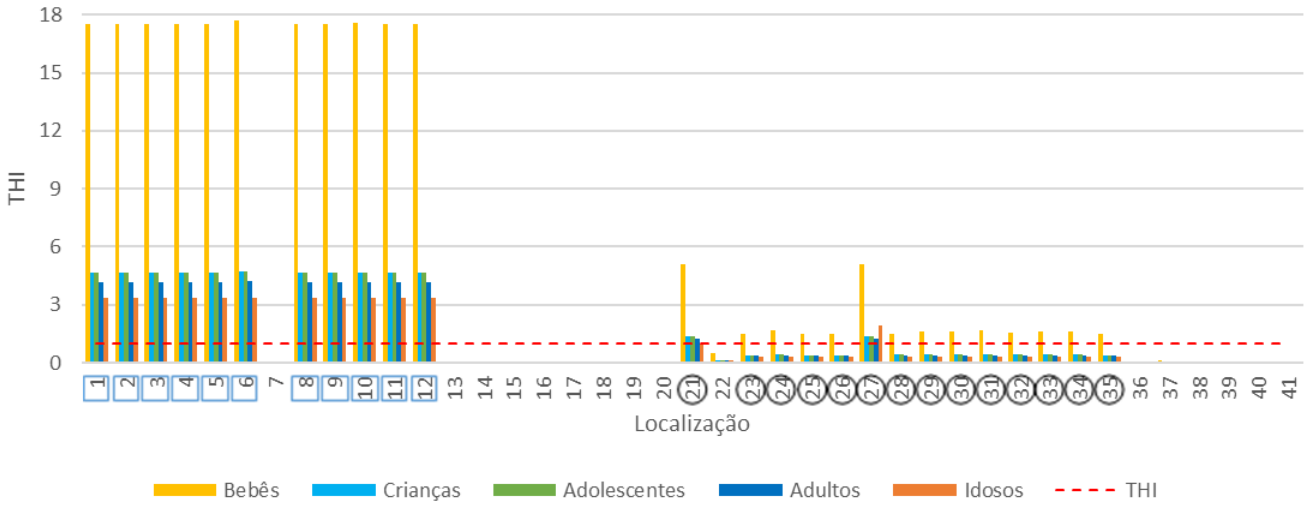


Figura 2: Valores do índice de perigo total. Localizações com quadrado azul indicam a presença de Hg e círculo preto indicam a presença de Hg e Pb

Considerações Finais

O presente estudo revela um cenário de saúde pública altamente relevante e complexo na cidade de Cascavel-PR. Embora todos os valores encontrados para a presença de metais e nitrato nas diferentes localizações estivessem abaixo dos níveis máximos estabelecidos pela OMS, UE e pela Legislação Brasileira, a exposição crônica à água potável contendo esses elementos representa um risco não carcinogênico relevante para a saúde.

Esse resultado é evidenciado pelo fato de que 25 dos 41 pontos analisados apresentaram valores de HQ e THI superiores a 1. Diante desse cenário, torna-se necessário fortalecer políticas públicas voltadas à redução desses compostos nas fontes de água, incluindo a fiscalização de atividades potencialmente geradoras de lixiviados.

Embora tenha sido possível avaliar o risco que representa a presença de metais e nitrato na água potável, seria ideal ter uma série histórica de dados (ano a ano) das concentrações dos contaminantes, além de uma comparação dos resultados com outros municípios do Paraná, o que forneceria um contexto regional mais robusto.

Como perspectiva futura e forma de complemento ao presente trabalho, recomenda-se a expansão da avaliação de risco. Isso poderia incluir a análise do Índice de Risco de Câncer (CR) e a implementação da metodologia de Benchmark dose (BMD), ambas essenciais para um diagnóstico toxicológico e de saúde pública mais preciso e completo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à bolsa PROBIU/PPGIES e a Fundação Araucária/SETI (EDITAL N.º 191/2021/PRPPG/UNILA).

Referências Bibliográficas

ADAPAR-AGÊNCIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA DO PARANÁ. Gerência de Sanidade Ambiental. Curitiba, 2025.

ALAM, I. et al. Health risk assessment in different age-group due to nitrate, fluoride, nitrite and geo-chemical parameters in drinking water in Ahmadpur East, Punjab, Pakistan. Human and Ecological Risk Assesements: An International Journal, 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (SISAGUA). Controle mensal-demais parâmetros. Brasília: Ministério da Saúde, 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS N° 888, de 4 de maio de 2021.

EPA, Environmental Protection Agency. Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume III-Part A, Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment. Washington, DC: EPA, 2001.

EPA, Environmental Protection Agency. IRIS Assessments. United States Environmental Protection Agency, 2025.

UNIÃO EUROPEIA. Parlamento Europeu; Conselho da União Europeia. Diretiva (UE) 2020/2184 do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de dezembro de 2020 relativa à qualidade das águas destinadas ao consumo humano. Diário Oficial da União Europeia, Luxemburgo, p. 1-62, 2020.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo demográfico 2022: principais resultados. Rio de Janeiro: IBGE, 2025.

NIH-NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH. Copper. Office of Dietary Supplements, 2022.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Guidelines for Drinkinkg-Water: Fourth Edition Incorporating the first and second addenda. Geneva: WHO, 2022.

PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION (PAHO). Water and Sanitation. Washington, DC: PAHO, 2017.

REZAEI, H. et al. Health-risk assessment related to the fluoride, nitrate, and nitrite in the drinking water in the Sanandaj, Kurdistan Country, Iran. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2018.
WHO-World Health Organization. Guidelines for Drinking-Water Quality. WHO, 2017.

INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS AMBIENTAIS NO COMPORTAMENTO DE DICLOFENACO EM MICROPLÁSTICO DE POLIETILENO

1 Marcello Henrique Ruffini de Oliveira, 2 Pedro Toledo Netto
1 UFPR, e-mail: marcelloruffinioliveira@hotmail.com; 2 UFPR, e-mail: pedro.toledo@ufpr.br

Palavras-chave: Sorção; Contaminantes emergentes; Química Ambiental.

Introdução

A presença de contaminantes emergentes (CEs) em corpos hídricos tem sido cada vez mais relatada, devido aos seus potenciais riscos à saúde humana, à biota aquática e ao meio ambiente. Esses poluentes englobam uma ampla variedade de compostos, como produtos de higiene pessoal, pesticidas, fármacos e microplásticos.

Entre os fármacos de interesse ambiental, destaca-se o diclofenaco (DCF), que é um medicamento anti-inflamatório não esteroidal amplamente utilizado no tratamento de dores e inflamações. Estudos sugerem que o contato prolongado com o DCF pode gerar efeitos prejudiciais a vida aquática, como a interferência em funções bioquímicas, danos em tecidos, alterações citológicas e diversas outras problemáticas (Lonappan *et al*., 2016). Além disso, estimativas indicam que o consumo mundial desse fármaco ultrapassou 2400 toneladas anuais por volta de 2019, com maior concentração de uso na Ásia (40%) e na Europa (29%), evidenciando a relevância dessas regiões no cenário global de utilização e, consequentemente, como importantes fontes potenciais de contaminação ambiental (Nkoom *et al*., 2019).

Os microplásticos (MP) são definidos como partículas que são menores que 5 mm de tamanho e podem surgir a partir da fragmentação de plásticos maiores, fibras sintéticas e diversos outros derivados (Meena *et al*., 2024). O MP de polietileno (PE) é um dos mais encontrados em matrizes ambientais, o que está muito relacionado com a produção de PE e PP em grande escala para diferentes tipos de produtos, sendo o polietileno de baixa densidade (PEBD) um dos polímeros mais relacionados com embalagens no geral, que acabam sendo responsáveis pela geração de MP (Dümichen *et al*., 2015).

Uma das características dos microplásticos é a capacidade de fixação dos CEs na sua superfície, que ocorre a partir de interações físicas como ligações de hidrogênio e força de van der Waals (Poursat *et al*., 2024). A sorção de CEs tende a intensificar os danos ambientais, visto que, além dos efeitos físicos decorrentes da ingestão do MP pelos animais, observa-se uma exposição aos efeitos fisiológicos causados pelos CEs, como alterações hormonais e determinados distúrbios (Montagner *et al*., 2021). Diferentes propriedades físicas e químicas do MP podem influenciar a adsorção de contaminantes, como tamanho da partícula, envelhecimento, cristalinidade etc. Além disso, fatores ambientais como pH, temperatura e força iônica também podem interferir na fixação de poluentes (Fu *et al*., 2021).

Percebe-se pela revisão bibliográfica, que existem pesquisas que estudam a sorção dos diferentes tipos de MPs, porém poucas referências possuem enfoque ao comportamento e os parâmetros ambientais que influenciam a relação entre o MP de PE e o DCF. Deste modo, o objetivo desse estudo foi avaliar o comportamento de sorção do diclofenaco em microplástico de PEBD, considerando a razão solo/solução e a solubilidade do fármaco.

Material e Métodos

A condição cromatográfica adotada neste estudo consistiu na utilização do sistema Agilent 1260 Infinity II LC com detector UV e coluna Agilent Eclipse XDB-C18 (4,6 mm × 150 mm × 5 µm). A fase móvel foi composta por 35% de acetonitrila e 65% de água ultrapura (V/V), acidificados com 0,7 mol L^{-1} de ácido acético, com volume de injeção de 20 µL, temperatura do forno de 30 °C e tempo de corrida de 8 minutos.

Realizaram-se análises por espectroscopia Raman da amostra comercial de MP de PEBD. A espectroscopia Raman foi utilizada de maneira complementar à análise por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FT-IR) para confirmação da composição química do material. Empregou-se a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para análise das amostras de PEBD, permitindo a observação de características como tamanho das partículas, rugosidade e presença de fissuras que podem influenciar no comportamento de sorção, por meio da avaliação das propriedades morfológicas e microestruturais da superfície dos microplásticos.

Visando determinar a massa ideal de MP para as condições experimentais adotadas, foram conduzidos ensaios de sorção em 60 mL de água ultrapura utilizando diferentes massas de PEBD (20, 40, 60, 120 e 240 mg), além de um ensaio controle, permitindo uma avaliação mais representativa do processo. Os experimentos foram conduzidos em triplicata (n = 3). Inicialmente, as amostras foram submetidas a banho de ultrassom por 10 minutos, visando evitar a agregação das partículas, seguido da adição de 1,01 mL da solução de DCF (400 mg L^{-1}). Na sequência, foram levadas à incubadora *shaker*, mantida a 25 ºC e agitação de 150 rpm. Alíquotas de 1 mL foram retiradas em três tempos distintos (0h, 24h e 72h), filtradas (PTFE, 0,45 µm, 25 mm) e analisadas por HPLC-UV.

Com o objetivo de avaliar a influência do pH na sorção do DCF em MPs de PEBD, foram realizados experimentos em triplicata (n = 3) nos valores de pH 2, 4 e 6. Para cada condição, conduziram-se ensaios contendo DCF (6,6 mg L^{-1}) em água ultrapura na presença de PEBD (60 mg) e ensaios controle contendo apenas DCF na mesma concentração, sem o PEBD. As soluções

foram preparadas por adição de 1,01 mL de DCF (400 mg L^{-1}) a 60 mL de água ultrapura, seguida de ajuste de pH com HCl 0,1 mol L^{-1} (6,1 mL para pH 2 e 61 µL para pH 4) ou NaOH 0,001 mol L^{-1} (61 µL para pH 6). As etapas subsequentes de incubação, coleta, filtração e análise foram conduzidas conforme descrito anteriormente, com exceção da coleta no tempo de 72 h.

A fim de investigar a influência do pH na solubilidade do DCF, foram conduzidos experimentos nos valores de pH 2, 4, 6 e 8, em meio aquoso e metanólico. Para cada condição de pH, foi conduzido um ensaio contendo DCF (6,6 mg L^{-1}) em água ultrapura e outro contendo DCF (6,6 mg L^{-1}) em metanol. Esse procedimento foi adotado com o objetivo de investigar a ocorrência de precipitação do DCF em meio aquoso. Durante o experimento, adicionaram-se 60 mL de água ultrapura a quatro frascos Erlenmeyer e 60 mL de metanol a outros quatro frascos. Posteriormente, adicionou-se 1,01 mL da solução de DCF (400 mg L^{-1}), sendo que para cada condição de pH, foi adicionado um volume específico de solução ácida ou básica, de acordo com as medições realizadas em pHmetro, seguido de homogeneização das soluções. As etapas de incubação, filtração e análise seguiram o procedimento adotado nos demais experimentos, diferenciando-se pela realização de coleta apenas no tempo inicial (0 h).

Resultados e Discussão

Segundo Feng, Zheng e Liu (2023), os principais deslocamentos Raman do PEBD são 1062, 1129, 1295, 1440, 1460, 2846 e 2881 cm^{-1}. Essas bandas estão relacionadas às vibrações de estiramento das ligações C–C (1062 e 1129 cm^{-1}), bem como às vibrações de torção (*twisting*), balanço (*wagging*) e às vibrações do grupo CH_2. O espectro teórico do PEBD reportado na literatura e o espectro Raman obtido experimentalmente para a amostra comercial são apresentados na Figura 01. O espectro Raman associado ao PEBD segue os mesmos padrões vibracionais observados na literatura.

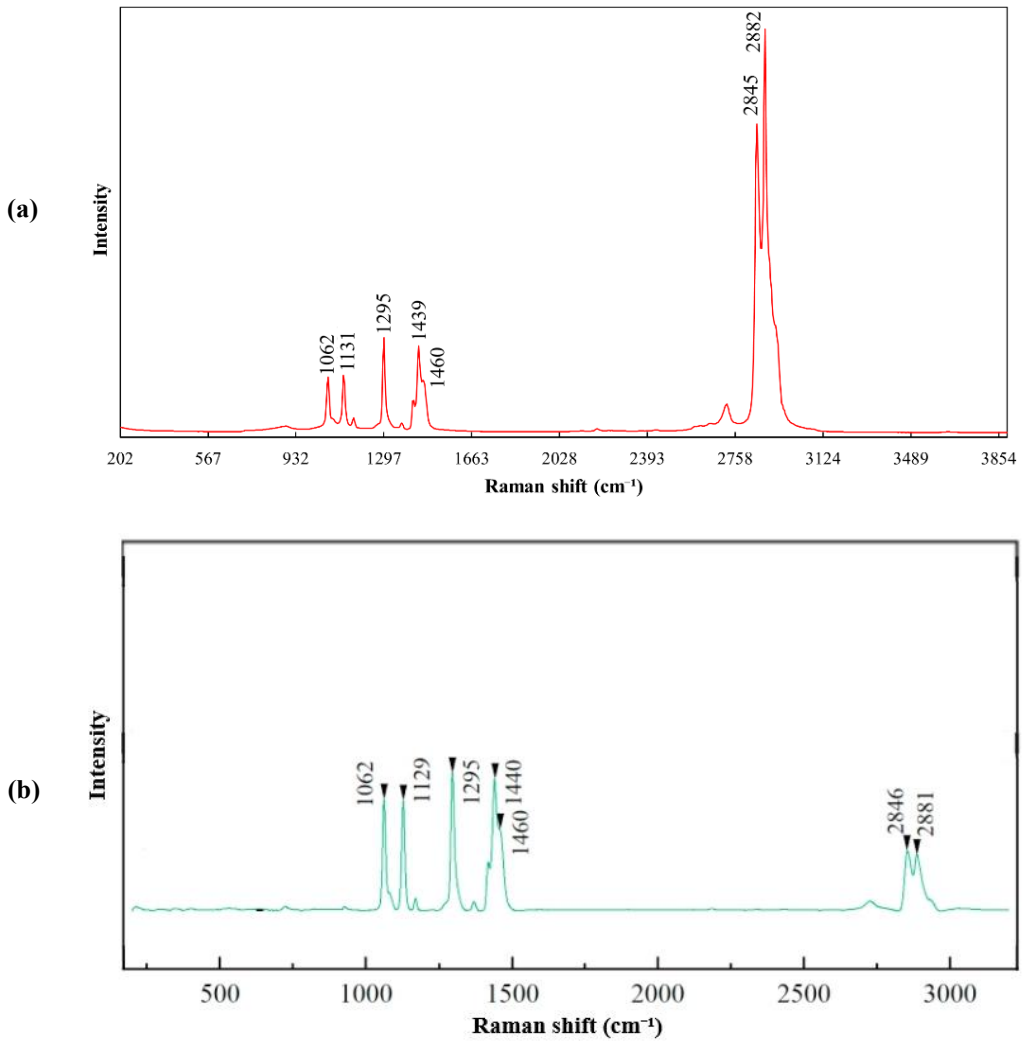


Figura 01: Comparação entre espectros Raman: (a) PEBD experimental; (b) dados da literatura.
Fonte: (a) O autor (2026); (b) Adaptado Feng, Zheng e Liu (2023)

As imagens obtidas por MEV associadas ao PEBD apresentadas na Figura 02 demonstram uma heterogeneidade quanto ao tamanho das partículas, além da presença de superfícies rugosas. Em termos de morfologia, as partículas não apresentam formato esférico, evidenciando também variação em suas formas.

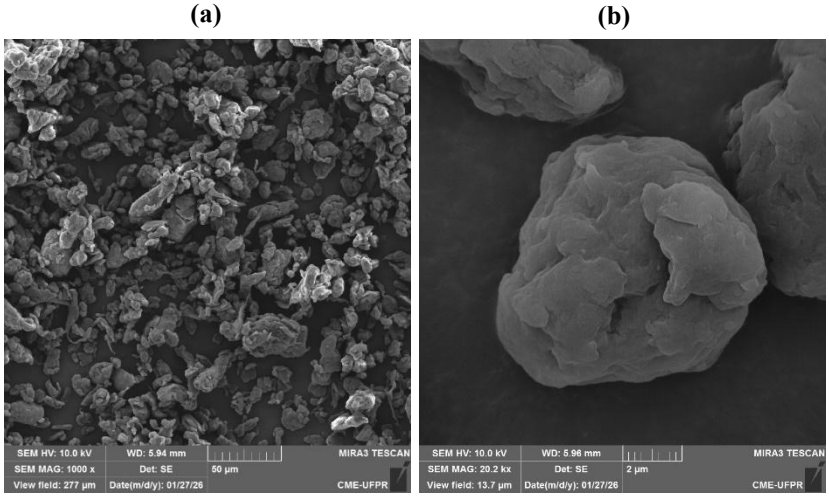


Figura 02: Imagens de MEV dos microplásticos: (a) PEBD (1000 x) e (b) PEBD (20000 x)
Fonte: O autor (2026)

A Figura 03 apresenta o gráfico da capacidade de adsorção (q) em função das massas de PEBD, que permite identificar uma faixa de massa mais adequada para a realização dos experimentos. Observa-se que menores massas apresentam maiores valores de q, devido à maior disponibilidade de DCF por unidade de massa de adsorvente. Nesse contexto, a faixa entre 40 e 60 mg de PEBD mostra-se mais adequada, pois mantém valores relativamente elevados de adsorção, ao mesmo tempo em que apresenta menor variabilidade experimental em comparação às menores massas, indicando maior confiabilidade dos resultados.

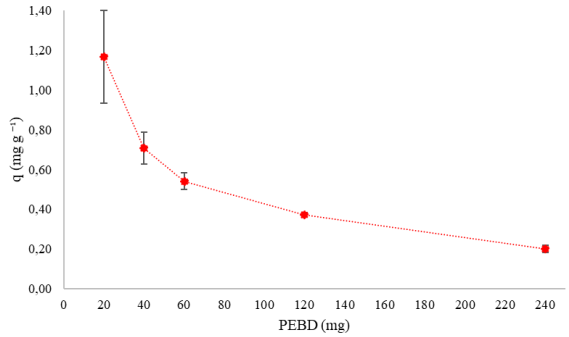


Figura 03: Influência da massa de PEBD na capacidade de adsorção (q).
Fonte: O autor (2026)

Observa-se na Figura 4 (a) uma queda significativa na concentração de DCF no tempo 0 h, mesmo na ausência de PEBD, levantando a hipótese de que a remoção esteja associada à precipitação do fármaco, e não à sorção. Para investigar essa questão, considerando que o pKa do diclofenaco sódico é aproximadamente 4,0, em pH inferior ao pKa espera-se que o DCF se encontre predominantemente na forma protonada, tornando-se menos solúvel em água. Essa condição pode favorecer sua precipitação, o que levaria à diminuição da concentração medida na solução, conforme observado na Figura 04 (b).

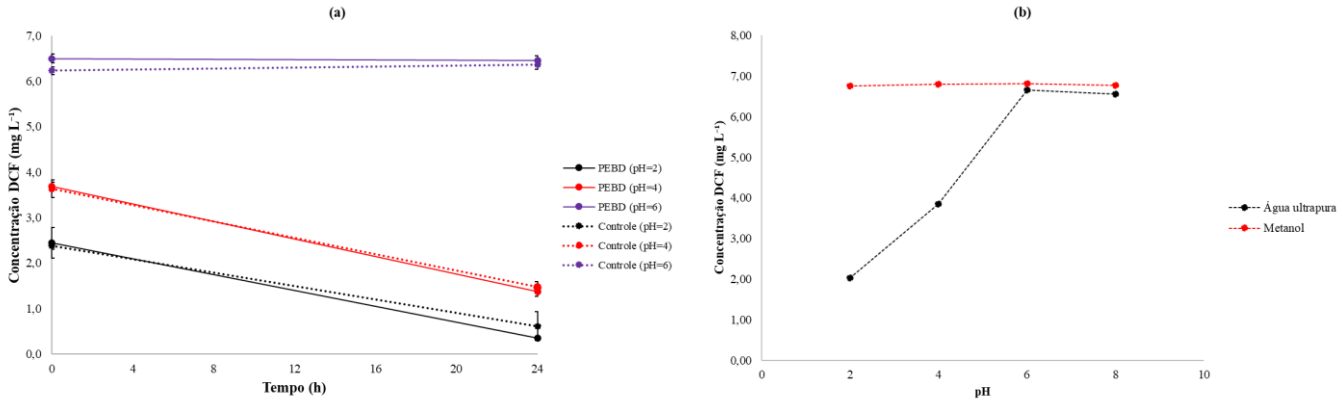


Figura 04: (a) Influência do pH na sorção e (b) Efeito do pH na concentração de DCF em meio aquoso e metanólico.
Fonte: O autor (2025)

Nesse contexto, a condução do experimento em metanol permitiu demonstrar que a redução da concentração observada em meio aquoso estava associada à precipitação do diclofenaco. Em meio metanólico, a concentração de DCF não apresentou diminuição, uma vez que o metanol é um solvente orgânico polar capaz de solubilizar compostos como o diclofenaco mesmo em condições mais ácidas.

Considerações Finais

Os resultados demonstraram que a interação entre DCF e PEBD é influenciada pelas condições físico-químicas do meio, especialmente pelo pH e pela razão sólido/solução. A maior capacidade de adsorção observada em menores massas de PEBD sugere maior disponibilidade de sítios ativos, enquanto a morfologia irregular e rugosa das partículas pode favorecer interações hidrofóbicas e forças de van der Waals, conforme descrito na literatura para sistemas envolvendo fármacos e microplásticos de polietileno. Os experimentos também evidenciaram que, em pH ácido, a redução da concentração de DCF ocorreu não apenas por adsorção, mas também pela precipitação do fármaco, devido à diminuição de sua solubilidade em valores de pH inferiores ao seu pKa (~4,0). Esse comportamento foi confirmado pelos experimentos em meio metanólico, nos quais não houve redução significativa da concentração de DCF. Estudos da literatura relatam comportamento semelhante para anti-inflamatórios não esteroidais em microplásticos. Dessa forma, os resultados indicam que a remoção aparente de diclofenaco em sistemas contendo microplásticos deve ser interpretada com cautela, considerando simultaneamente processos de adsorção e precipitação, evitando a superestimação do papel dos microplásticos como vetores ambientais de contaminantes emergentes. Como perspectivas futuras, destaca-se que estudos envolvendo a influência da força iônica já foram conduzidos, porém seus resultados ainda estão em fase de tratamento e, por esse motivo, não foram apresentados neste trabalho. Além disso, serão realizados estudos adicionais envolvendo temperatura, envelhecimento dos microplásticos e presença de matéria orgânica dissolvida, visando avaliar a influência desses parâmetros no comportamento e na sorção do diclofenaco em microplásticos de PEBD.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Fundação Araucária pela bolsa de iniciação científica e ao Laboratório de Biologia Celular e Ecotoxicologia (LABCECO) do Centro de Estudo do Mar da UFPR.

Referências Bibliográficas

DÜMICHEN, E. et al. Analysis of polyethylene microplastics in environmental samples, using a thermal decomposition method. *Water research*, Elsevier, v. 85, p. 451–457, 2015.

FENG, Z.; ZHENG, L.; LIU, J. Classification of household microplastics using a multi- model approach based on raman spectroscopy. *Chemosphere*, Elsevier, v. 325, p. 138312, 2023.

FU, L. et al. Adsorption behavior of organic pollutants on microplastics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Elsevier, v. 217, p. 112207, 2021.

LONAPPAN, L. et al. Diclofenac and its transformation products: environmental occurrence and toxicity-a review. *Environment International*, Elsevier, v. 96, p. 127–138, 2016.

MEENA, V. et al. Selected emerging contaminants in water: Global occurrence, existing treatment technologies, regulations and associated risk. *Journal of Hazardous Materials*, Elsevier, p. 136541, 2024.

MONTAGNER, C. C. et al. Microplásticos: ocorrência ambiental e desafios analíticos. *Química nova*, SciELO Brasil, v. 44, n. 10, p. 1328–1352, 2021.

NKOOM, M. et al. Bioconcentration, behavioral, and biochemical effects of the non-steroidal anti-inflammatory drug diclofenac in *Daphnia magna*. Environmental Science and Pollution Research, Springer, v. 26, n. 6, p. 5704–5712, 2019.

POURSAT, B. A. et al. Effect of ultra-high-density polyethylene microplastic on the sorption and biodegradation of organic micropollutants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Elsevier, v. 279, p. 116510, 2024.

FILMES DE BIOPOLÍMEROS: PRODUÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DE ADSORÇÃO DE GLIFOSATO

1Maria Eduarda Soler da Angela, 2Giovana Rocha de Oliveira, 3Marianna Jardim Santos, 4Giovanni Rampazzo Bald, 5Danielle Goveia, 6Suzan da Silva Lessa, 7Paulo Sergio Tonello

1 UNESP, e-mail: maria.soler@unesp.br; 2 UNESP, e-mail: giovana.r.oliveira@unesp.br; 3 UNESP, e-mail: marianna.jardim@unesp.br; 4 UNESP, e-mail: giovanni.rampazzo@unesp.br; 5 UNESP; e-mail: danielle.goveia@unesp.br; 6 UNESP, e-mail: suzan.lessa@unesp.br; 7 UNESP , e-mail: paulo.tonello@unesp.br

Palavras-chave: Remediação; Herbicida; Corpos Hídricos.

Introdução

Certamente, a agricultura brasileira tem se tornado cada vez mais dependente do uso de agrotóxicos. Entre 2003 e 2021, o Brasil registrou aumento expressivo no consumo desses compostos, consolidando-se como um dos maiores consumidores mundiais (CARNEIRO *et al.*, 2015; PAZ; REZENDE, 2023). Nesse contexto, o glifosato destacou-se como o agrotóxico mais comercializado no país, com aproximadamente 231 mil toneladas por ano em 2024 (IBAMA,2024), principalmente em razão de seu amplo uso e de seu baixo custo (OLIVEIRA, 2021; CARDOSO; HARTWIG, 2022). Além disso, sua elevada solubilidade em água amplia a preocupação com a contaminação de corpos hídricos (CARDOSO; HARTWIG, 2022).

Entre os agrotóxicos previstos na portaria de potabilidade da água no Brasil, o glifosato apresenta um dos maiores valores máximos permitidos, de 500 $\mu g L^{-1}$, valor superior aos limites estabelecidos em outras regiões, como a União Europeia e o Canadá (OLIVEIRA, 2021). Seus efeitos têm sido amplamente discutidos, tanto pelos potenciais impactos à saúde humana quanto pelos danos ambientais associados à contaminação do solo e da água (SAMSEL; SNEFF, 2013b; AMARANTE JUNIOR, 2002). Em ambientes aquáticos, sua presença pode comprometer a estrutura e o funcionamento das comunidades naturais, afetando especialmente organismos sensíveis, como os peixes (CARDOSO; HARTWIG, 2022).

Diante disso, torna-se fundamental desenvolver técnicas eficazes para a remediação de águas contaminadas. Entre as alternativas disponíveis, destacam-se processos biológicos, físicos e químicos, sendo a adsorção uma técnica promissora para a remoção de contaminantes em meio aquoso (BONACINA, 2020; YOCOYAMA, 2023). Nesse sentido, a quitosana apresenta elevado potencial devido à presença de cargas positivas, que favorecem sua interação com moléculas aniônicas, como o glifosato (AZEVEDO *et al.*, 2007). A nanocelulose, por sua vez, destaca-se por sua elevada resistência mecânica, além de ser biodegradável e não tóxica, contribuindo para a estabilidade estrutural dos filmes adsorventes (ORSI, 2022).

Este estudo propôs a produção, caracterização e aplicação de modelos cinéticos a filmes à base de quitosana e nanocelulose, com o objetivo de avaliar e comparar sua capacidade de adsorção de glifosato, investigando assim, seu potencial como materiais para remediação ambiental de águas contaminadas.

Material e métodos

A produção da nanocelulose foi realizada com base na metodologia proposta por Goveia *et al.* (2010), no Laboratório de Papel e Celulose da Unesp Itapeva. Para isso, foram preparadas suspensões em água deionizada contendo 1%, 2% e 3% de polpa celulósica, considerando o teor de umidade do material fornecido. Após pré-homogeneização, o material foi submetido à desfibrilação em moinho Super Masscolloider a 1.500 rpm, com sucessivos passes, até obtenção de uma suspensão com aspecto gelatinoso. Em seguida, a concentração em massa da solução de nanocelulose foi determinada por método gravimétrico, com secagem das amostras em estufa até massa constante, permitindo calcular a quantidade de nanocelulose presente na solução.

A quantificação do glifosato foi realizada com base na metodologia de Bhaskara e Nagaraja (2006), adaptada por Lessa (2023), por meio da construção de uma curva de calibração com soluções padrão em diferentes concentrações. Após a adição de ninidrina e molibdato de sódio, as amostras foram aquecidas em bloco digestor e posteriormente analisadas em espectrofotômetro Hach DR3900, no comprimento de onda de 570 nm.

Os filmes adsorventes foram produzidos em três composições: nanocelulose, quitosana e compósito de nanocelulose-quitosana. Os filmes de nanocelulose foram preparados conforme Orsi (2022), utilizando dispositivo com abertura circular e secagem em estufa até formação dos discos. Os filmes de quitosana foram obtidos a partir da dissolução do polímero em solução de ácido acético, seguida de secagem, tratamento com solução de NaOH e lavagem com água ultrapura, conforme a adaptação feita por Faria *et al.* (2020). Já os filmes compósitos foram preparados com base em adaptação de Listyarini *et al.* (2018), a partir da mistura de quitosana e nanocelulose, seguida de aquecimento, sonicação, secagem e tratamento alcalino. Após a produção, todos os filmes foram cortados nas dimensões adequadas para os ensaios posteriores.

A caracterização dos filmes foi realizada por espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), em modo ATR, utilizando espectrômetro Agilent Cary 630, na faixa de 4000 a 400 cm^{-1}. Também foi determinado o pH de carga zero (pH_{pcz}), com base na metodologia de Herrera (2021), utilizando soluções de NaCl 0,01 molL^{-1} com pH ajustado entre 2 e 12, nas quais foram adicionados discos dos filmes e mantidos sob agitação por 24 horas. O valor de pH_{pcz} foi obtido a partir da relação entre a variação de pH e o pH inicial das soluções.

A capacidade de adsorção de glifosato pelos filmes foi avaliada em duplicata, utilizando solução de glifosato a 10 mgL^{-1} e discos dos materiais adsorventes. Alíquotas foram coletadas em tempos pré-estabelecidos para determinação da concentração

residual do contaminante por espectrofotometría, conforme o procedimento analítico descrito anteriormente. Os dados experimentais obtidos foram ajustados aos modelos cinéticos de pseudoprimeira ordem, pseudossegunda ordem e Elovich, com o objetivo de descrever o comportamento de adsorção do glifosato pelos filmes produzidos.

Resultados e discussão

Os resultados de FTIR permitiram identificar os principais grupos funcionais presentes nos filmes de nanocelulose, quitosana e nanocelulose-quitosana, confirmando as características químicas esperadas para cada material (figura 01). No filme de nanocelulose, observaram-se bandas associadas principalmente aos grupos O–H, C–H, C–O–C e C=O, enquanto no filme de quitosana foram identificadas bandas atribuídas a O–H, C–H, C=O, C–N, NH_2 e C–O. Para o filme compósito, verificou-se a presença de bandas características tanto da nanocelulose quanto da quitosana, indicando a incorporação dos dois componentes na estrutura do material. Além disso, alterações na intensidade e no deslocamento de algumas bandas, especialmente nas regiões associadas aos grupos O-H (hidroxila) e C=O (carbonila), além dos grupos NH_2 (amina), sugerem a ocorrência de interações intermoleculares, como ligações de hidrogênio, entre os constituintes do compósito, o que indica boa compatibilidade entre os materiais.

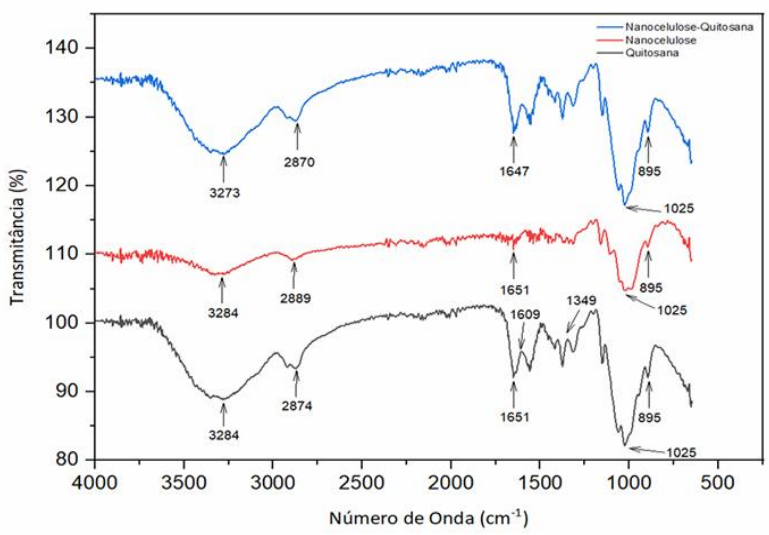


Figura 01: Espectro de absorção no infravermelho dos filmes.
Fonte: Autoria própria (2024).

Os valores de pH de carga zero obtidos foram de aproximadamente 4,86 para o filme de nanocelulose, 7,35 para o filme compósito e 7,42 para o filme de quitosana (figura 02). Esses resultados mostram que os filmes de quitosana e nanocelulose-quitosana apresentaram comportamento superficial semelhante. Considerando que os ensaios de adsorção foram conduzidos em pH 6, observa-se que os filmes de quitosana e compósito apresentaram superfície favorável à adsorção de espécies aniônicas, como o glifosato, enquanto o filme de nanocelulose, por apresentar pH_{pcz} inferior ao pH da solução, mostrou menor afinidade por esse composto. Esse comportamento ajuda a explicar o desempenho adsortivo inferior da nanocelulose em comparação aos demais materiais.

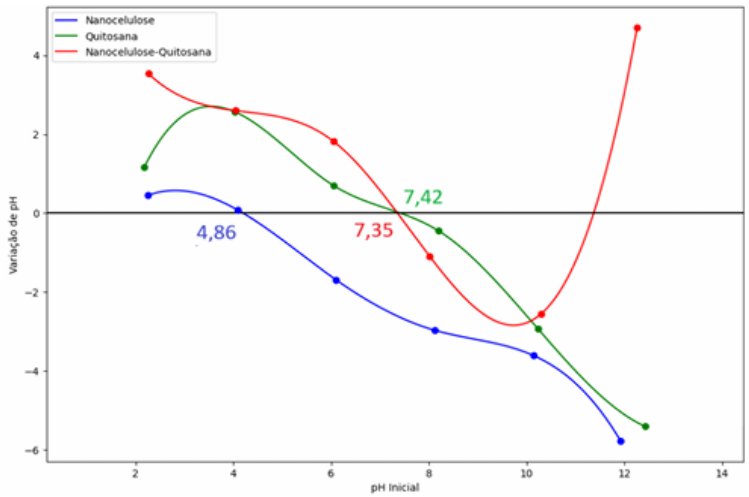


Figura 02: pH_{pcz} dos filmes estudados.
Fonte: Autoria própria (2024).

Os ensaios de adsorção mostraram que os filmes de quitosana e do compósito apresentaram maior capacidade de adsorção de glifosato do que o filme de nanocelulose, conforme observado na Figura 03. Em ambos os casos, o equilíbrio foi atingido com valores próximos entre si, enquanto a nanocelulose apresentou adsorção consideravelmente inferior. Esse comportamento é coerente com os resultados de pH de carga zero, que indicaram maior predileção dos filmes contendo quitosana para a adsorção do glifosato em pH 6.

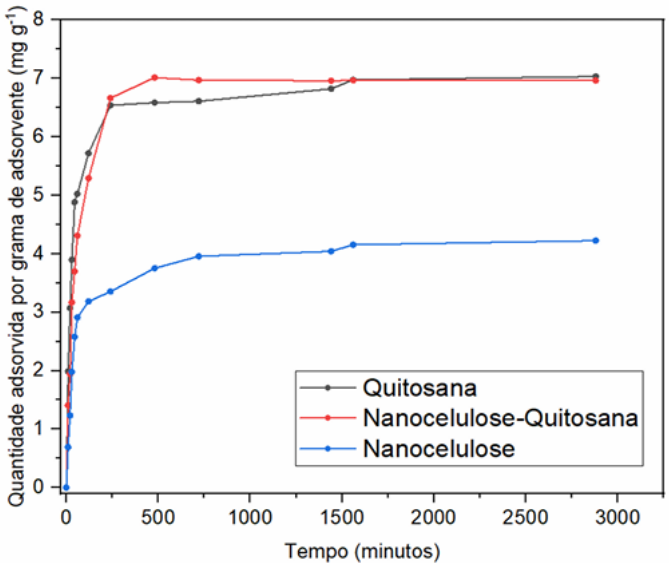


Figura 03: Adsorção de glifosato em cada filme (10 mg L^{-1} de glifosato, pH 6,0 e 25 °C).
Fonte: Autoria própria (2024).

A análise dos modelos cinéticos indicou que os valores da constante de taxa de adsorção foram semelhantes entre os filmes, porém a capacidade de adsorção no equilíbrio foi maior para os filmes de quitosana e do compósito (0,996 $mg \cdot g^{-1}$ e 0,992 $mg \cdot g^{-1}$,respectivamente) em comparação à nanocelulose (0,9535 $mg \cdot g^{-1}$), de acordo com o modelo de Pseudo Segunda ordem. Dos modelos avaliados, os de Pseudo Primeira e Pseudo Segunda ordem apresentaram os maiores coeficientes de determinação (R^2) e os menores valores de erro, mostrando o melhor ajuste aos dados experimentais (Tabela 01). Esse resultado sugere que o processo de adsorção apresentou características tanto de quimissorção e fisissorção, com participação de interações químicas e eletrostáticas entre o adsorvato e os grupos ativos presentes nos filmes.

De modo geral, os resultados obtidos indicam que a incorporação de quitosana ao material favoreceu o desempenho adsortivo, tanto pelo comportamento superficial mais adequado em pH 6 quanto pela presença de grupos funcionais capazes de interagir com o glifosato, como o grupo amina. Esse comportamento está de acordo com estudos da literatura que apontam o bom desempenho de materiais à base de quitosana e celulose em processos de adsorção, especialmente quando empregados em compósitos, como demonstrado em Oliveira *et al*. (2023).

Modelos		Quitosana	Nanocelulose	Compósito
Pseudo Primeira Ordem				
R^2	Coeficiente de determinação	0,98042	0,9688	0,9888
x^2	Qui-quadrado	0,1039	0,0667	0,0754
$q_e(mg \cdot g^{-1})$	Qtd. adsorvidas no equilíbrio	6,6426	3,8849	6,8871
$K_1(min^{-1})$	Taxa de adsorção	0,0283	0,0215	0,0167
Pseudo Segunda Ordem				
R^2	Coeficiente de determinação	0,99635	0,9835	0,9920
x^2	Qui-quadrado	0,0193	0,0352	0,0539
$q_e(mg \cdot g^{-1})$	Qtd. adsorvidas no equilíbrio	7,0016	4,1576	7,3253
$K_2(g \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1})$	Taxa de adsorção	0,0060	0,0068	0,0032
Equação de Elovich				
R^2	Coeficiente de determinação	0,75448	0,8011	0,8256
x^2	Qui-quadrado	0,0973	0,0377	0,1190
$\alpha(mg \cdot g^{-1} \cdot min^{-1})$	Taxa de adsorção inicial	2,2177	17,5001	11,2603
$\beta(mg \cdot g^{-1})$	Constante de dessorção	2,0188	2,7565	1,4185

Tabela 01: Valores das regressões dos modelos cinéticos aplicados aos filmes.
Fonte: Autoria própria (2024).

Considerações finais

Os resultados obtidos demonstraram que os filmes produzidos apresentaram potencial para a adsorção de glifosato em água, sendo que as melhores atuações foram observadas para o filme de quitosana e para o compósito nanocelulose-quitosana. A caracterização por FTIR confirmou a presença dos grupos funcionais esperados nos materiais e indicou interações entre os constituintes do compósito, enquanto os valores de pH de carga zero ajudaram a explicar a maior afinidade desses filmes pelo glifosato nas condições avaliadas. Além disso, os ensaios de adsorção e o ajuste dos modelos cinéticos reforçaram a superioridade dos materiais contendo quitosana em relação à nanocelulose pura. Como exposto, conclui-se que a incorporação de quitosana favoreceu o desempenho adsortivo dos filmes, evidenciando o potencial desses materiais para aplicação em processos de remediação de águas contaminadas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), ao Departamento de Engenharia Ambiental da Unesp - Sorocaba.

Referências bibliográficas

AMARANTE JÚNIOR, O. P. de; SANTOS, T. C. R. dos; BRITO, N. M.; RIBEIRO, M. L. Glifosato: propriedades, toxicidade, usos e legislação. Química Nova, v. 25, n. 4, p. 589-593, 2002.

AZEVEDO, V. V. C.; CHAVES, S. A.; BEZERRA, D. C.; FOOK, M. V.; COSTA, A. C. F. Quitina e quitosana: aplicações como biomateriais. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 2, n. 3, p. 27-34, 2007.

BHASKARA, B. L.; NAGARAJA, P. Direct sensitive spectrophotometric determination of glyphosate by using ninhydrin as a chromogenic reagent in formulations and environmental water samples. *Helvetica Chimica Acta*, n. 11, p. 2686-2693, 2006.

BONACINA, Débora Yamamoto. Principais técnicas de biorremediação de áreas contaminadas por glifosato na microrregião de Dourados MS. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (MBA)– Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

CARDOSO, T. e HARTWIG, C. de A. Glifosato e meio ambiente: um panorama das principais pesquisas relacionadas ao tema. Open Science Research III, v. 3, ano 2022.

CARNEIRO, F. F.; AUGUSTO, L. G. da S.; RIGOTTO, R. M.; FRIEDRICH, K.; BÚRIGO, A. C. Dossiê Abrasco: Um alerta sobre os impactos dos agrotóxicos na saúde. Rio de Janeiro: EPSJV; São Paulo: Expressão Popular, 2015.

FARIA, C.; FÁVERO, M.; CAETANO, M.; ROSA, A.H.; TONELLO, P.S. Application of chitosan film as a binding phase in the diffusive gradients in thin films technique (DGT) for measurement of metal ions in aqueous solution. Analytical and Bioanalytical Chemistry, v. 412, p. 703-714, 2020.

GOMES, Thiago Lourenço. Obtenção de micro e nanocelulose a partir de biomassa lignocelulósica de resíduo da casca do lngá-Cipó (Inga edulis Mart.) via tratamento químico. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos) Universidade Federal do Amazonas– UFAM, Itacoatiara, 2022.

KAUSHIK, A. *et al.* Iron oxide nanoparticles–chitosan composite based glucose biosensor. Biosensors and Bioelectronics, v. 24, p. 676–683, 2008.

LESSA, Suzan da Silva. Desenvolvimento de biopolímeros à base de nanocelulose com potencial para desintoxicação humana por glifosato. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos)– Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Araraquara, 2023.

LESSA, S. d. S. *et al.* Removal of glyphosate with nanocellulose for decontamination purposes in aquatic systems. Water, v. 16, n. 18, p. 1843, 2024.

LISTYARINI, A. *et al.* Chitosan/nanocellulose with natural dye as a new developed colorimetric film for ammonia detection. AIP Conference Proceedings, v. 2023, p. 020028-1–020028-6, 2018.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. R. Adsorção: Aspectos Teóricos e Aplicações Ambientais. Fortaleza: Impresa Universitária, 2014.

OLIVEIRA, D. M. Glifosato nas portarias de potabilidade da água dos dez países mais consumidores de agrotóxicos. Revista

interdisciplinar de estudos em saúde da UNIARP, v. 10, p. 43–51, 2021.

OLIVEIRA, G. R. *et al.* Biopolímero quitosana na adsorção de glifosato: uso no monitoramento ou remediação ambiental. HOLOS, v. 39, n. 5, e16367, 2023.

ORSI, Blenda Lopes. Estudo cinético e de adsorção de íons metálicos em nanofibrilas de celulose. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais)– Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Sorocaba, 2022.

PAZ, Juliana Vieira; REZENDE, Vanessa Theodoro. Agrotóxicos no Brasil: entre a produção e a segurança alimentar. Jornal da USP, 2023.

RAHMI, L. J. S. Preparation of chitosan composite film reinforced with cellulose isolated from oil palm empty fruit bunch and application in cadmium ions removal from aqueous solutions. Carbohydrate Polymers, v. 170, p. 226-233, 15 ago. 2017.

SAMSEL, A.; SENEFF, S. Glyphosate, pathways to modern diseases II: celiac sprue and gluten intolerance. Interdiscip. Toxicol., v. 6, n. 4, p. 159– 184, 2013b.

VALENCIA, Claudia Alexandra; BARBOSA FILHO, Olavo. Aplicação da adsorção em carvão ativado e outros materiais carbonosos no tratamento de águas contaminadas por pesticidas de uso agrícola. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

XU, X.; OUYANG, X.-K.; YANG, L.-Y. Adsorption of Pb(II) from aqueous solutions using crosslinked carboxylated chitosan/carboxylated nanocellulose hydrogel beads. Journal of Molecular Liquids, v. 322, p. 114523, 2021.

ABORDAGEM INTEGRADA PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA E CONFORMIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRAFICA DO RIO PIAUÍ EM SERGIPE

1 José Carlos Freitas de Sá Filho, 2 Maria Gabriely de Oliveira Rocha de Souza, 3 Samir Hipólito dos Santos, 4 Adnívia Santos Costa Monteiro

1 Universidade Federal de Sergipe, e-mail: carlos.freitassafilho@gmail.com; 2 Universidade Federal de Sergipe, e-mail: mariagabrielyors@gmail.com; 3 Universidade Federal de Sergipe, e-mail: samirhipolito@gmail.com; 4 Universidade Federal de Sergipe, e-mail: adnivia@academico.ufs.br

Palavras-chave: Monitoramento Ambiental; IQA; IET; Modelos Lineares Mistos

Introdução

A gestão integrada de recursos hídricos em bacias hidrográficas tropicais enfrenta desafios crescentes, impostos tanto pela intensificação do uso do solo quanto pela instabilidade climática global. No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos estabelece a bacia como unidade fundamental de planejamento, porém, a efetividade dessa gestão depende de um monitoramento sistemático que transcenda a simples coleta de dados, configurando-se como uma estratégia vital de vigilância em saúde pública (Cerezini; Hanai, 2017). A degradação da qualidade hídrica em mananciais estratégicos compromete não apenas a integridade dos ecossistemas, mas impõe riscos toxicológicos diretos às populações humanas (ANA, 2024).

Nesse cenário, o diagnóstico da dinâmica hidroquímica exige a integração de múltiplos indicadores. Metais potencialmente tóxicos (MPT) assumem papel crítico devido ao seu potencial de bioacumulação, enquanto o Índice de Qualidade da Água (IQA) e o Índice de Estado Trófico (IET) são termômetros da saúde ambiental. O IQA sintetiza parâmetros físico-químicos para classificar a aptidão para usos múltiplos, incluindo abastecimento após tratamento, enquanto o IET revela o nível de enriquecimento por nutrientes, processo que pode inviabilizar mananciais e encarecer o tratamento da água (Santos et al., 2018).

No estado de Sergipe, a Bacia do Rio Piauí apresenta vulnerabilidade intrínseca associada à variabilidade pluviométrica regional. A ocorrência de anomalias climáticas recentes, com chuvas atípicas que descaracterizam a sazonalidade histórica, altera os processos de diluição e transporte de poluentes (Santos *et al*., 2022). Esse cenário de imprevisibilidade evidencia que o monitoramento convencional deve evoluir para diagnósticos mais robustos, capazes de isolar o ruído espacial e identificar com rigor as variações interanuais e sazonais. Nesse contexto, o emprego de Modelos Lineares de Efeitos Mistos (LMM) e análise multivariada surge como estratégia necessária para processar a complexidade hídrica, visto que a estatística multivariada permite uma compreensão abrangente da variabilidade simultânea de propriedades e processos hidroquímicos (Moitinho *et al*., 2025).

Diante disso, este estudo teve como objetivo avaliar a variabilidade hidroquímica e a conformidade ambiental da Bacia do Rio Piauí nos anos de 2018 e 2022), com ênfase nos efeitos de anomalias pluviométricas sobre metais, IQA e IET, visando fornecer subsídios científicos ao aprimoramento da gestão hídrica regional.

Material e Métodos

Os dados de qualidade da água foram obtidos a partir do observatório SERHIDRO, mantido pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Sustentabilidade e Ações Climáticas de Sergipe (SEMAC), abrangendo os anos de 2018 e 2022 em 20 pontos de amostragem distribuídos pela Bacia do Rio Piauí (Tabela 1).

Tabela 2. Caracterização e localização geográfica dos pontos de monitoramento na Bacia do Rio Piauí, Sergipe.

Ponto	Município	Latitude	Longitude	Ponto	Município	Latitude	Longitude
P01	Estância	-11,2634	-37,4428	P11	Pedrinhas	-11,2163	-37,6411
P02	Boquim	-11,1014	-37,5878	P12	Arauá	-11,2695	-37,5975
P03	Arauá	-11,2585	-37,5570	P13	Estância	-11,2296	-37,3996
P04	Indiaroba	-11,4738	-37,4913	P14	Salgado	-11,0028	-37,4998
P05	Estância	-11,2067	-37,3396	P15	Salgado	-11,0587	-37,4952
P06	Santa Luzia do Itanhy	-11,3450	-37,5532	P16	Estância	-11,1391	-37,3940
P07	Santa Luzia do Itanhy	-11,3563	-37,4730	P17	Estância	-11,1732	-37,4312
P08	Umbaúba	-11,4015	-37,6217	P18	Lagarto	-10,9466	-37,7319
P09	Santa Luzia do Itanhy	-11,3581	-37,4751	P19	Lagarto	-10,9895	-37,7441
P10	Santa Luzia do Itanhy	-11,3462	-37,4506	P20	Itaporanga d'Ajuda	-11,0645	-37,3810

Fonte: Adaptado de SERHIDRO/SEMAC (2026).

A classificação sazonal, com período chuvoso entre março e agosto e período seco entre setembro e fevereiro, foi estabelecida com base no regime pluviométrico histórico regional (Santos *et al*. 2022). Essa definição foi validada por dados de precipitação mensal (mm) obtidos junto à Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe (EMDAGRO) para os respectivos anos.

As variáveis monitoradas compreenderam metais potencialmente tóxicos (Al, Fe, Mn, Zn e Cu), elementos indicadores de mineralização e dureza (Cálcio e Magnésio), além do IQA e do IET.

O tratamento estatístico foi realizado em ambiente R. A variabilidade temporal foi avaliada via Modelos Lineares de Efeitos Mistos (LMM), utilizando o algoritmo de Máxima Verossimilhança Restrita (REML). O Ano, a Sazonalidade e a Interação (Ano **x** Sazonalidade) foram definidos como efeitos fixos, enquanto o Ponto de Coleta foi incorporado como efeito aleatório no intercepto. A significância dos fatores foi extraída por meio de ANOVA Tipo III, com os graus de liberdade e p-valores ajustados pela aproximação de Satterthwaite. Para a estrutura multivariada, empregou-se a Análise de Componentes Principais (PCA) sobre matriz de correlação escalonada (Z-score) e a conformidade ambiental foi verificada de acordo com os limites da Resolução CONAMA nº 357/2005 (Classe 2). O modelo de linguagem Gemini (Google) foi utilizado para auxílio na programação em linguagem R (desenvolvimento de scripts estatísticos para Modelos Lineares Mistos e Análise de Componentes Principais) e na padronização estética de gráficos, na etapa de Tratamento de Dados e Análise Estatística.

Resultados e Discussão

Os modelos lineares mistos revelaram que o efeito da sazonalidade foi limitado, sendo significativo apenas para alumínio (p=0,045) e IET (p<0,001). Em contraste, o fator Ano apresentou influência marcante sobre manganês, zinco e, especialmente, cobre (F=1399,1; p<0,001), indicando variações interanuais mais expressivas que as sazonais (Tabela 2).

Tabela 3. Sazonalidade, ano e interação sobre variáveis hidroquímicas e índices de qualidade na bacia do rio Piauí, SE.

Metal	GL	Época		Ano		Interação	
		F	p	F	p	F	p
Aluminio	1	4,082	0,045 (*)	0,017	0,896 (ns)	< 0,001	0,997 (ns)
Ferro	1	0,636	0,427 (ns)	1,393	0,240 (ns)	0,001	0,982 (ns)
Manganês	1	2,872	0,092 (ns)	111,6	< 0,001 (***)	0,015	0,902 (ns)
Zinco	1	0,779	0,379 (ns)	4,409	0,037 (*)	1,098	0,296 (ns)
Cobre	1	0,239	0,626 (ns)	1399,1	< 0,001 (***)	0,191	0,663 (ns)
Cálcio	1	0,168	0,682 (ns)	0,055	0,8139 (ns)	0,838	0,362 (ns)
Magnésio	1	2,197	0,141 (ns)	2,764	0,099 (ns)	2,393	0,124 (ns)
IQA	1	0,917	0,339 (ns)	0,096	0,758 (ns)	0,086	0,770 (ns)
IET	1	12,92	< 0,001 (***)	3,638	0,059 (ns)	1,147	0,286 (ns)

F (Fisher); p (probabilidade) via ANOVA (Tipo III) com Satterthwaite para os graus de liberdade (GL). Significância: *** p<0,001; ** p<0,01; * p<0,05; ns (não significativo). Ponto de coleta incluído como efeito aleatório (dependência espacial).

Essa dinâmica reflete a instabilidade climática observada. Em 2022, chuvas atípicas no período seco (Figura 1) descaracterizaram a sazonalidade histórica, reduzindo o contraste hidroquímico entre as épocas. Isso justifica a predominância da variabilidade interanual sobre a sazonal para a maioria dos parâmetros. Em relação aos indicadores sintéticos, o IQA médio da bacia manteve-se em 48,1 (nível Aceitável), conforme parâmetros da ANA (2024). Contudo, o IET apresentou média de 58,4, evidenciando estados de Eutrofia a Supereutrofia (Santos *et al*., 2018) em pontos críticos como P18 (Rio Jacaré em Lagarto-SE) e P19 (Rio Piauí em Lagarto-SE). Tais resultados ratificam que a carga poluidora remanescente, proveniente de efluentes domésticos e atividades agrícolas, sobrepõe-se aos efeitos de diluição pluvial no ciclo estudado.

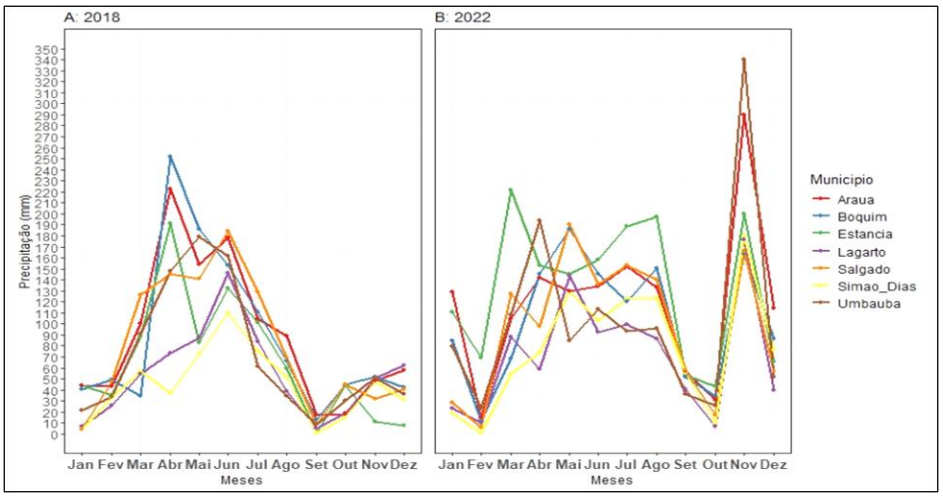


Figura 1. Sazonalidade Pluviométrica na Bacia do Rio Piauí. Ano com padrão típico (2018) e atípico (2022). Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados da EMDAGRO (2026)

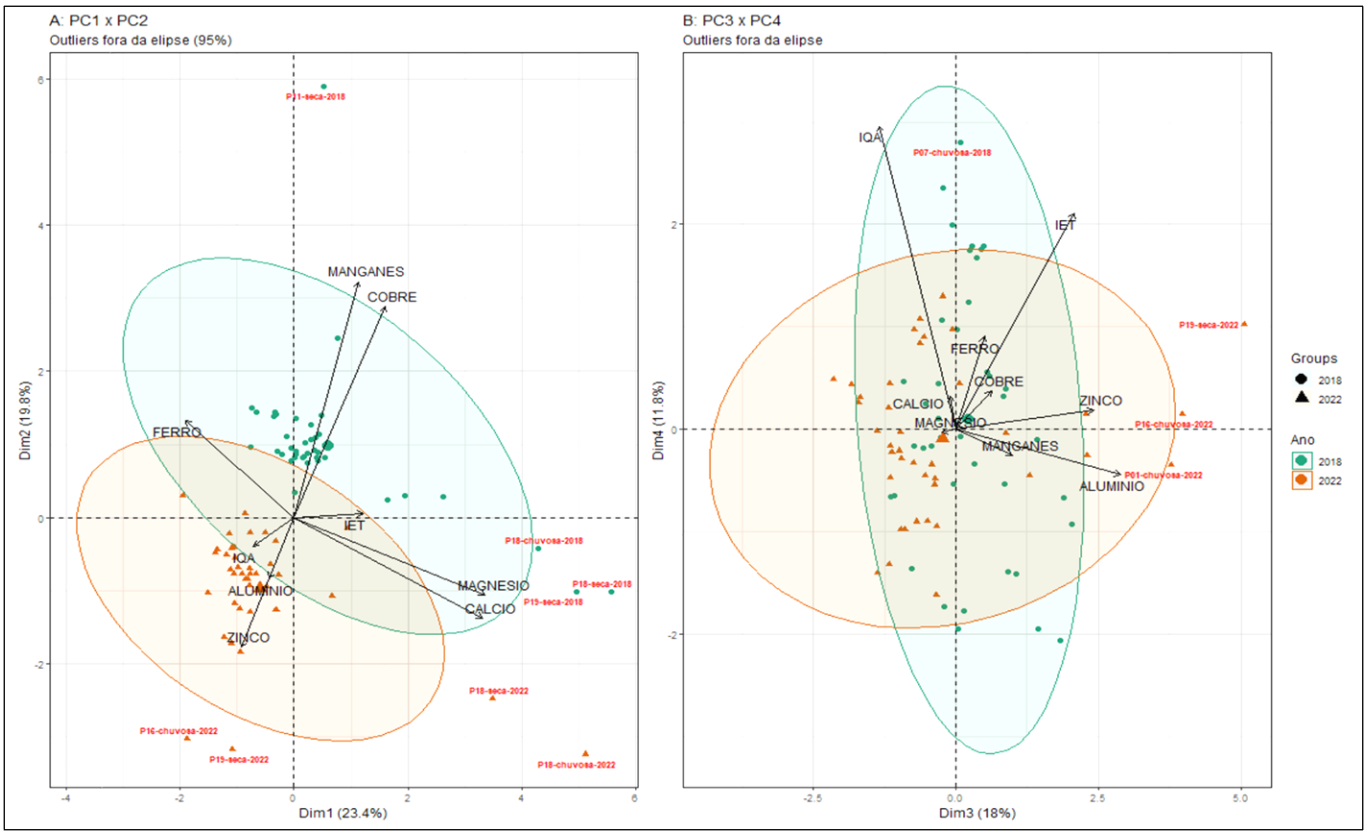


Figura 2. Analise de Componentes Principais (PCA) na Bacia do Rio Piauí, Sergipe, nos anos de 2018 e 2022.

A Análise de Componentes Principais (PCA) ratificou esses padrões, com os dois primeiros componentes (PC1 e PC2) explicando 43,1% da variância total (Figura 2). Observou-se uma transição na assinatura geoquímica: o ano de 2018 apresentou maior dispersão e associação a elementos de intemperismo natural (Mn, Cu, Fe), enquanto 2022 mostrou maior homogeneidade e relação com Zn, Al e IQA. Essa mudança sugere que, em 2022, houve maior influência de fontes antrópicas, visto que o Zinco é um traçador clássico de efluentes urbanos e o IQA refletiu o aporte de carga orgânica ou remobilização de sedimentos. Nos componentes secundários (PC3 × PC4), responsáveis por 30% adicionais da variabilidade, as interações entre IQA e IET evidenciam que a degradação hídrica na bacia resulta da sinergia entre o enriquecimento por nutrientes e o transporte de MPT via escoamento superficial, e não de fatores isolados. A aplicação de elipses de confiança (95%) permitiu identificar outliers multivariados que sinalizam condições ambientais atípicas. Os pontos P18 e P19 (rios Jacaré e Piauí, situados na cidade de Lagarto-SE) apresentaram comportamento extremo persistente, confirmando a pressão por efluentes domésticos e agroindustriais, o que corrobora os elevados valores de IET. Já a singularidade do P11 (Riacho Areias, em Pedrinhas-SE) na seca de 2018, marcada por picos de Manganês, indica vulnerabilidade severa a fontes pontuais em períodos de baixa vazão, onde a capacidade de autodepuração é minimizada. Ao confrontar os teores com os limites da Resolução CONAMA nº 357/2005 (Figura 3), verificou-se que Alumínio e Ferro apresentam não conformidades frequentes, sobretudo no período chuvoso. O Alumínio, cuja significância sazonal foi ratificada pelos modelos mistos ($p < 0,05$), ultrapassou o limite de 0,1 mg L^{-1} em pontos como P01 e P10, sugerindo o escoamento superficial em solos argilosos sob manejo agrícola intenso como principal vetor. Em contraste, o Cobre exibiu contaminação crítica em 2018 (quase 100% de inconformidade), seguida de redução drástica em 2022. Essa queda abrupta explica o elevado valor de F (1399,1) na ANOVA e sugere uma mudança nas fontes de emissão ou na dinâmica de retenção de sedimentos no leito entre os períodos analisados. A persistência desses pontos críticos de contaminação, mesmo frente à variabilidade climática, sinaliza uma falha na capacidade de suporte dos tributários menores em áreas de expansão urbana e agrícola. Esse cenário demanda que os instrumentos de gestão, como o enquadramento dos corpos d'agua, sejam revisados para considerar não apenas a média histórica, mas a resiliência química da bacia em eventos de extremos hidrológicos. A detecção de concentrações críticas de metais traço e o estado trófico avançado em pontos específicos sugerem a necessidade de zonas de amortecimento (buffer zones) e a restauração da mata ciliar como estratégias de infraestrutura verde. Em síntese, a identificação desses pontos críticos ambientais e a quebra da sazonalidade evidenciam que o monitoramento convencional deve evoluir para estratégias adaptativas, prevenindo que calendários fixos mascarem processos de degradação em cenários de eventos climáticos extremos (Cerezini; Hanai, 2017).

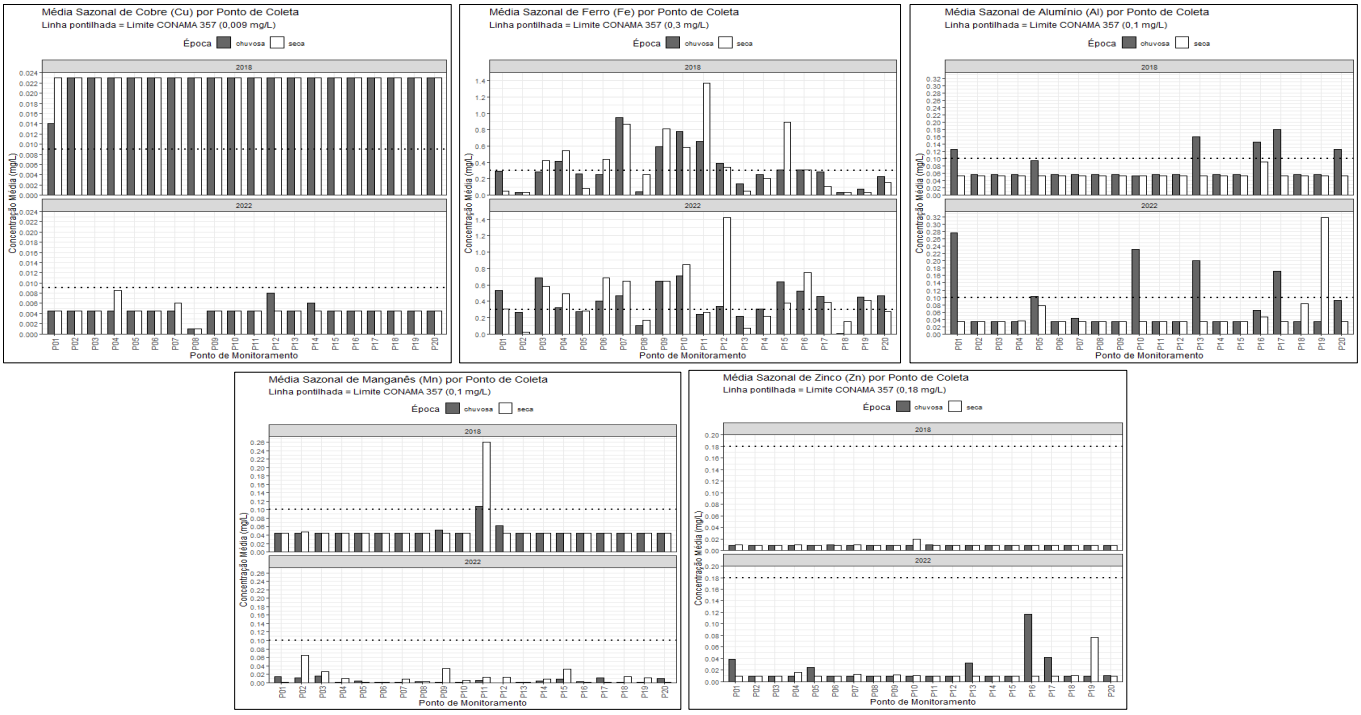


Figura 3. Médias sazonais de metais potencialmente tóxicos por ponto de coleta na bacia do rio Piauí (2018 e 2022) comparadas aos limites da Resolução CONAMA nº 357/2005 (linhas pontilhadas).

Considerações Finais

A abordagem integrada evidenciou que a variabilidade interanual se sobrepõe à sazonalidade clássica na qualidade da água da Bacia do Rio Piauí. A ocorrência de anomalias pluviométrica em 2022 reconfigurou o transporte de metais e nutrientes, alterando a dinâmica hidroquímica e mostrando que eventos extremos podem mascarar padrões de degradação ambiental. A ocorrência de não conformidades recorrentes, baixos valores de IQA e elevado IET reforça a necessidade de monitoramento adaptativo. A integração de modelos mistos e análise multivariada mostrou-se eficaz para subsidiar a gestão hídrica em bacias tropicais.

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

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2023**. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/relatorio-conjuntura-dos-recursos-hidricos-no-brasil-atualiza-informacoes-sobre-aguas-do-pais. Acesso em: 7 abr. 2026.

CEREZINI, M. T.; HANAI, F. Y. Gestão sustentável e integrada da água em bacias hidrográficas: 20 anos da lei das águas no Brasil. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 18, n. 64, p. 159–168, dez. 2017.

SERGIPE. **Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe (EMDAGRO)**. Pluviosidade em Sergipe. Aracaju: EMDAGRO, 2026. Disponível em: https://emdagro.se.gov.br/pluviosidade. Acesso em: 21 abr. 2026.

MOITINHO, D. E. R. et al. Análise estatística multivariada aplicada à hidrogeoquímica: uma revisão. **Revista Geociências Nordeste**, Caicó, v. 11, n. 1, p. 908-921, jan./jun. 2025.

SANTOS, R. C. L.; LIMA, A. S.; CAVALCANTI, E. B.; MELO, C. M.; MARQUES, M. N. Avaliação por IQA e IET da Bacia Costeira do Sapucaia em Sergipe. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 33-46, 2018.

SANTOS, E. F. N.; SOUSA, I. F.; LEITE, I. V. Regiões Homogêneas em Sergipe Agrupadas Através dos Índices Climáticos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, n. 4, p. 477- 489, 2022.

MICROPLÁSTICOS EM AMBIENTES AQUÁTICOS BRASILEIROS: DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA, LACUNAS METODOLÓGICAS E DESAFIOS DE PESQUISA

1 Ana Letícia Santos Abrão, 2 Heuler Hordones Chaves, 3 Mariana Pereira Maito

1 Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), e-mail: anaabrao.engenharia@gmail.com; 2 Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), e-mail: heulerchaves@hotmail.com; 3 Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), e-mail: mari03pmaito@gmail.com

Palavras-chave: Microplásticos; Ambientes aquáticos; Revisão sistemática.

Introdução

A contaminação por microplásticos em ambientes aquáticos tem emergido como uma das principais preocupações ambientais globais, especialmente devido à persistência desses materiais e à sua ampla distribuição em diferentes matrizes ambientais. Esses contaminantes, originados principalmente da degradação de plásticos maiores como o polietileno, atingem corpos hídricos superficiais, subterrâneos e sistemas de abastecimento, comprometendo a qualidade da água e potencialmente afetando a saúde humana e os ecossistemas aquáticos (Islam, 2024).

Estudos recentes demonstram que os microplásticos em água potável são predominantemente compostos de polietileno tereftalato (PET), polietileno (PE) e polipropileno (PP), frequentemente na forma de fragmentos e fibras (Zhu *et al*., 2024). A contaminação média em água de distribuição chega a 62,38 partículas/L e em água engarrafada a 38,45 partículas/L, estimando-se uma ingestão diária de 175 partículas por habitante (Sun *et al*., 2024).

Embora a produção científica internacional sobre microplásticos tenha crescido exponencialmente na última década, observa-se que, no contexto brasileiro, os estudos ainda são limitados, fragmentados e concentrados em regiões específicas. Além disso, a ausência de padronização metodológica dificulta a comparação entre os resultados e a construção de um panorama nacional consistente. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar criticamente a distribuição geográfica, as abordagens metodológicas e os padrões de reporte dos estudos sobre microplásticos em ambientes aquáticos brasileiros, identificando lacunas que comprometem o avanço do conhecimento científico e a formulação de políticas públicas.

Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido por meio de uma revisão sistemática da literatura, seguindo as diretrizes do protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), com o objetivo de identificar e analisar pesquisas relacionadas à ocorrência e caracterização de microplásticos em ambientes aquáticos. A busca foi realizada na base de dados Web of Science, utilizando combinações de palavras-chave: ("microplastic" AND "water" AND "analysis" AND "contamination"), com exclusão de termos associados a toxicidade e saúde humana, a fim de manter o foco ambiental.

Inicialmente, foram identificados 452 artigos em escala global, utilizados para caracterização do cenário internacional. Para o recorte nacional, foi incluído o termo "Brazil", resultando em 24 artigos, dos quais 15 atenderam aos critérios de elegibilidade após triagem por título, resumo e leitura completa. Foram incluídos estudos com dados qualitativos ou quantitativos sobre microplásticos em água, sedimentos ou sistemas aquáticos, envolvendo técnicas como filtração, microscopia e espectroscopia. Estudos de modelagem, revisões e análises exclusivamente toxicológicas foram excluídos. O fluxo de seleção é apresentado na Figura 01.

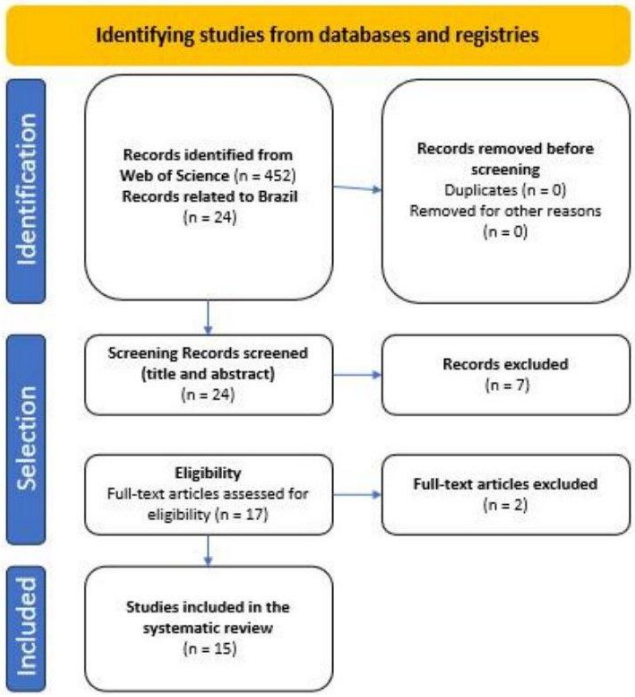


Figura 01: Fluxograma PRISMA de seleção dos artigos.
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Resultados e Discussão

Os resultados evidenciam um crescimento expressivo da produção científica sobre microplásticos em ambientes aquáticos brasileiros a partir de 2018, acompanhando a tendência global de intensificação das pesquisas sobre poluentes emergentes. No entanto, apesar do aumento no número de publicações, observa-se uma redução no impacto médio dos estudos ao longo do tempo: em 2014, os artigos recebiam em média 60 citações; em 2025, esse número caiu para menos de 5 (Figura 02). Esse padrão pode ser atribuído à diluição do impacto pela superprodução de artigos, ao curto tempo de maturação das publicações recentes e à priorização de quantidade em detrimento da qualidade científica (Bornmann; Daniel, 2008; Hicks *et al*., 2015).

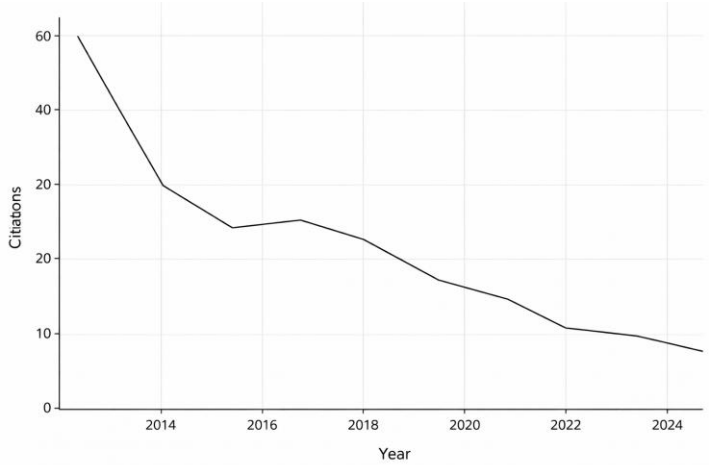


Figura 02: Average Citations per Year Globally (2014–2025).
Fonte: Bibliometrix (2025)

No cenário internacional, países como China, Estados Unidos, Índia e Itália lideram em número de publicações. A China destaca-se como principal polo de produção, tanto em volume de artigos quanto em colaborações internacionais. No Brasil, a distribuição geográfica das pesquisas revela forte concentração em regiões costeiras e estuarinas do Sudeste e Sul, enquanto grandes sistemas de água doce – rios interiores, reservatórios e fontes de abastecimento – permanecem sub-representados. Os 15 artigos elegíveis cobrem apenas 8 estados costeiros dos 26 estados e o Distrito Federal, evidenciando lacuna crítica no monitoramento ambiental nacional. Estudos em áreas como a Baía de Guanabara (RJ) e o Lago Guaíba (RS) registraram elevadas concentrações de microplásticos, com predominância de PE e PP associados a fontes urbanas e industriais (Olivatto *et al*., 2019; Bertoldi *et al*., 2021). A síntese dos estudos é apresentada na Tabela 01.

Em relação às características físicas, predominam fibras azuis e pretas com tamanhos entre 0,5 e 5 mm, indicando como principais fontes os efluentes domésticos, a lavagem de tecidos sintéticos, o descarte inadequado de resíduos e as atividades pesqueiras. Fatores climáticos e hidrológicos também condicionam a distribuição: períodos de seca favorecem a remobilização eólica das partículas, enquanto eventos de cheia promovem redistribuição e deposição em sedimentos (Garello *et al*., 2023). Do ponto de vista metodológico, os estudos apresentam elevada heterogeneidade em métodos de coleta, preparo de amostras, identificação de polímeros e unidades de quantificação, comprometendo a comparabilidade dos resultados e a consolidação de um banco de dados nacional consistente.

Autor	Área de Estudo	Matriz	Método	Concentração	Principais Polímeros
Olivatto *et al*. (2019)	Baía de Guanabara (RJ)	Água superficial	Microscopia óptica	1,4–21,3 part./m³	PE, PP
Bertoldi *et al.* (2021)	Lago Guaíba (RS)	Rede manta	Visual + µ-FTIR	11,9–61,2 itens/m³	PE, PP (98%)
Lorenzi *et al.* (2021)	Baía Babitonga (SC)	Água superficial	µ-FTIR	0,001–0,108 itens/m³	PE, PES, PP, PS
Vieira *et al*. (2021)	Paranaguá (PR)	Ostras	KOH + SEM-EDS	9,6 itens/150 mg	Fibras (78%)
Queiroz *et al.* (2022)	Plataforma Amazônica	Água	Microscopia + FTIR	1.500–12.967 itens/m³	PA, PU, ABS, PET
Pinheiro *et al.* (2022)	Rio Grande (RS)	Sedimento	Sep. dens. + FTIR	478,9 itens/kg	PE, PP, PET
Bertoldi *et al.* (2023)	Porto Alegre (RS)	Sedimento	Peneiramento + µFTIR	29,5–53,8 itens/mg	PET (57%)
Garello *et al.* (2023)	Rio Paraná	Sedimento	H_2O_2 + FTIR-ATR	39–373 itens/kg	Fibras PET, PE, PP
Souza *et al.* (2023)	Manaus (AM)	Água	Peneiramento + FTIR-ATR	0–0,40 g/L	Nylon, elastômeros
Paiva *et al.* (2024)	Rio Sorocaba (SP)	Brânquias peixes	KOH + Raman	3,9 MPs/peixe	PE, PET
Mendes *et al.* (2024)	Bragança (PA)	Água	FTIR e Raman	0,77–1,50 itens/m³	PE, HDPE, LDPE
Kreling *et al.* (2025)	Paranaguá (PR)	Sedimento	FTIR-ATR	0,15–1,42 MPs/m³	PP (42,5%), PE (37,5%)
Mariano *et al.* (2025)	Rio Tietê (SP)	Água e sedimento	µFTIR	Água: ≤14 MPs/m³	PET, HDPE, PES, PE
Menezes *et al.* (2025)	Rio Piraquê-Açu (ES)	Sed. e bivalves	NaOH + Raman	Total: 7.806 MPs	PP, PET, nylon
Ferreira; Lôbo-Hajdu (2025)	Bacia de Santos (SP)	Água	Microscopia óptica	10,6–43,17 MPs/L	Não identificado

Tabela 01: Caracterização dos estudos sobre microplásticos em água, sedimentos e organismos no Brasil. Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Considerações Finais

A análise realizada demonstra que, embora haja avanço na produção científica nacional sobre microplásticos em ambientes aquáticos, ainda existem lacunas significativas relacionadas à cobertura espacial, padronização metodológica e integração dos dados. A superação desses desafios é fundamental para o fortalecimento do monitoramento ambiental e para o desenvolvimento de políticas públicas eficazes voltadas à mitigação da poluição por plásticos. Recomenda-se a ampliação das pesquisas em regiões pouco estudadas, a adoção de protocolos padronizados e o fortalecimento de colaborações internacionais, visando alinhar a produção científica brasileira aos padrões globais e aumentar sua relevância no cenário internacional.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsas de estudo, bem como à Universidade Federal do Triângulo Mineiro pelo suporte institucional e pela infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

BERTOLDI, C. et al. Revealing microplastic dynamics: the impact of precipitation and depth in urban river ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 111231–111243. https://doi.org/10.1007/s11356-023-30241-0. 2023.

BERTOLDI, C. et al. First evidence of microplastic contamination in the freshwater of Lake Guaíba, Porto Alegre, Brazil. Science of the Total Environment, v. 759, p. 143503, 2021.

BORNMANN, L.; DANIEL, H.-D. What do citation counts measure? A review of studies on citing behavior. Journal of Documentation, v. 64, n. 1, p. 45–80, 2008.

FERREIRA, H. C.; LÔBO-HAJDU, G. Preliminary assessment of microplastic pollution in surface waters of the Santos Basin: abundance and diversity in the most important oil and gas exploration hub in Brazil. Ocean and Coastal Research, v. 73, 2025.

GARELLO, N. A. et al. Microplastics distribution in river side bars: the combined effects of water level and wind intensity. Science of the Total Environment, v. 897, p. 165406, 2023.

HICKS, D. et al. Bibliometrics: the Leiden Manifesto for research metrics. Nature, v. 520, n. 7548, p. 429–431, 2015.

ISLAM, M. Impact of bioplastics on environment from its production to end-of-life. Process Safety and Environmental Protection, v. 188, p. 151–166, 2024.

KRELING, A. P. et al. First evidence of high microplastic concentrations in estuarine litter windrows of a World Heritage Site: the Paranaguá estuarine complex, Brazil. Water, Air, & Soil Pollution, v. 236, p. 256, 2025.

LORENZI, L. et al. Spatio-seasonal microplastics distribution along a shallow coastal lagoon ecocline within a marine conservation unit. Marine Pollution Bulletin, v. 170, p. 112644, 2021.

MARIANO, G. et al. Microplastic contamination in the highly polluted Tietê River (São Paulo, Brazil): an unsustainable human–nature relationship. Environmental Monitoring and Assessment, v. 197, p. 387, 2025.

MENDES, D. S. et al. Microplastic distribution and risk assessment in estuarine systems influenced by traditional villages and artisanal fishery activities. Scientific Reports, v. 14, p. 1–12, 2024.

MENEZES, K. M. et al. Microplastic contamination in the mangroves of Piraquê-Açu and Piraquê-Mirim rivers, Brazil. Marine Pollution Bulletin, v. 214, p. 117696, 2025.

OLIVATTO, G. P. et al. Microplastic contamination in surface waters in Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil. Marine Pollution Bulletin, v. 139, p. 157–162, 2019.

PAIVA, F. C. et al. Evaluation of microplastic pollution in gills of freshwater fish in a Neotropical hydrographic basin, Brazil. Water, Air, & Soil Pollution, v. 235, p. 677, 2024.

PINHEIRO, L. M. et al. Salt marshes as the final watershed fate for meso- and microplastic contamination. Science of the Total Environment, v. 838, p. 156077, 2022.

QUEIROZ, A. F. S. et al. First assessment of microplastic and artificial microfiber contamination in surface waters of the Amazon Continental Shelf. Science of the Total Environment, v. 839, p. 156259, 2022.

SOUZA, G. R. et al. Longitudinal, vertical and temporal distribution of microplastics in an Amazonian stream. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 28, p. 1–8, 2023.

SUN, X. et al. Transport of microplastics in a typical drinking water supply system. Water, v. 16, n. 11, p. 1567, 2024.

VIEIRA, K. S. et al. Occurrence of microplastics and heavy metals accumulation in native oysters Crassostrea gasar in the Paranaguá estuarine system, Brazil. Marine Pollution Bulletin, v. 166, p. 112225, 2021.

ZHU, L. et al. Composition and global distribution of microplastics in drinking water. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v. 54, n. 24, p. 1875–1901, 2024.

BACILLUS SUBTILIS PARA REMEDIAÇÃO DE MEIOS AQUÁTICOS E POTENCIAL DE COMBATE À EUTROFIZAÇÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

1 Isabela Guimarães Lima, 2 Júlia Gonçalves Caixeta, 3 Ana Carolina Silva Ferreira Vilela, 4 João Victor Bispo da Cruz, 5 Mariah França Pereira, 6 Lucas Carvalho Basílio de Azevedo

1 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: isabela.lima@ufu.br; 2 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: julia.caix1@ufu.br; 3 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: anacarolina14@ufu.br; 4 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: joaovctr123.jv@ufu.br; 5 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: mariah.franca@ufu.br; 6 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: lucasazevedo@ufu.br;

Palavras-chave: biorremediação; eutrofização; *Bacillus subtilis*;

Introdução

A biorremediação é um processo que envolve o uso de organismos vivos para a restauração de meios contaminados, e também é um recurso de baixo custo e sustentabilidade. O uso principalmente de microrganismos como bactérias tem se mostrado eficiente para a remediação de corpos d'água eutrofizados em condições anóxicas. O excesso de nutrientes na água eutrofizada, como fósforo e nitrogênio, pode ser reduzido com auxílio desses microrganismos por sua capacidade de absorvê-los (Abd El-Rahim, 2025).

A *Bacillus subtilis* apresenta-se como uma bactéria versátil tecnologicamente por seu uso em áreas ambientais, médicas e alimentícias. Isolados dessa espécie podem apresentar uma alta capacidade na produção de biomassa, redução de substratos e adaptabilidade ambiental (Karichappan, 2014).

No entanto, há uma necessidade de analisar sua eficiência em biorremediação de águas eutrofizadas. Dessa forma, o objetivo desta revisão é avaliar o potencial uso de *b. subtilis* na remediação de corpos aquáticos e no controle da eutrofização. Os resultados desse estudo apresentam uma análise sistemática dos dados coletados conforme o método PRISMA 2020, combinando indicadores que podem ajudar a avaliar o modo como os experimentos foram produzidos, analisar se a bactéria funciona melhor em consórcio ou isolada e as taxas de remoção desses parâmetros em cada situação, além também da remediação de metais pesados.

Metodologia

A presente revisão sistemática foi conduzida com base nas diretrizes estabelecidas pelo método PRISMA 2020, reconhecido para a estruturação de revisões sistemáticas e transparência na seleção de estudos (Page et al., 2021). A busca de dados foi conduzida por um único autor, responsável por todas as etapas, desde a triagem inicial até a leitura sistemática e análise dos dados, sendo posteriormente revisada e validada pelos demais autores do trabalho.

A pesquisa teve início a partir do questionamento acerca do uso de microrganismos na remediação de corpos d'água, com foco na eficiência da bactéria *Bacillus subtilis*. As etapas seguidas para o desenvolvimento foram identificação, triagem, elegibilidade e inclusão.

Para identificação, as buscas foram realizadas nas bases de dados Scopus e SciELO. Em sequência, foram definidos critérios de inclusão e exclusão para a seleção dos artigos. As buscas foram realizadas em 29 de março de 2026, utilizando as seguintes palavras-chave: *bacillus subtilis*, *bacillus subtilis and remediation*, *bacillus subtilis and wastewater* e *bacillus subtilis and phosphorus*. Foram aplicados os seguintes filtros: idioma inglês, publicações a partir de 2020, acesso aberto, pertencentes às áreas de ciências ambientais, engenharia, química, microbiologia e agricultura, e restrição ao tipo de documento "artigo".

A aplicação desses critérios resultou em um total de 46 artigos para triagem inicial. Após a leitura dos títulos e resumos, 31 artigos foram selecionados para leitura parcial e potencial extração de dados. As principais justificativas para exclusão nesta etapa incluíram: ausência de análise de parâmetros relacionados à eutrofização, desvio do tema proposto, não utilização da bactéria *Bacillus subtilis* e foco em agentes antibacterianos. Na etapa de leitura completa dos textos, 24 artigos foram selecionados para a extração final de dados. As exclusões nessa fase ocorreram devido a fatores como meio experimental não aquoso, falta de informações sobre os parâmetros requisitados, inconsistência nos dados apresentados e restrição de acesso ao conteúdo completo, possivelmente decorrente de falhas nos filtros aplicados anteriormente (Figura 1).

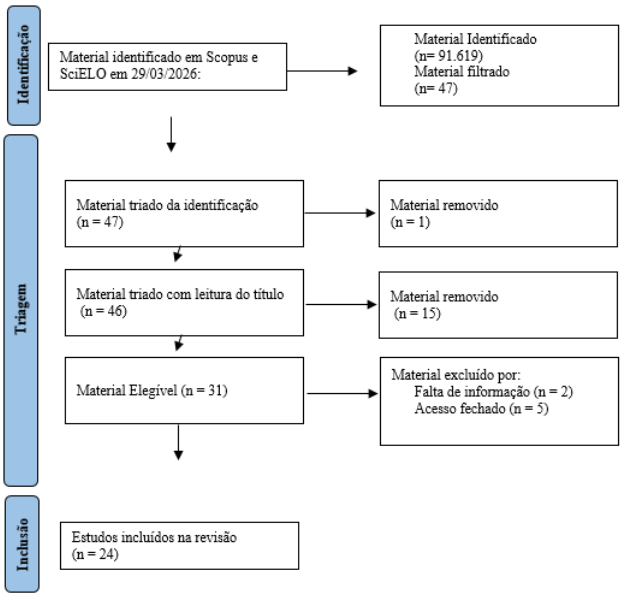


Figura 1: Processo de seleção dos estudos.
Fonte: Autoral (2026)

Os dados coletados nos artigos incluíram: tipo de água utilizada nos testes (sintética ou natural), parâmetros analisados (nitrogênio total, nitrito, nitrato, nitrogênio amoniacal, DBO, DQO e fósforo), variáveis associadas à eutrofização, uso da bactéria em consórcio ou isoladamente, se foi realizada remediação de metais pesados e outros compostos, além da eficiência no tratamento desses parâmetros.

Para a análise dos resultados, foram elaborados gráficos e tabelas, apresentando a distribuição quantitativa e percentual dos dados avaliados, possibilitando uma interpretação comparativa entre os estudos selecionados.

Resultados e Discussão

Dos 24 estudos analisados, 16 foram realizados com água de fontes naturais e 8 com água sintética. O uso de água natural é mais representativo de condições reais, como demonstrado por Bouhia et al. (2024), que avaliaram a aplicação de *Bacillus subtilis* em um lodo proveniente de um efluente de moinho de oliva. Estudos assim permitem uma representação que pode ser convertida para aplicações em larga escala e para a remediação em condições reais.

Em relação à forma de aplicação da bactéria, 15 estudos utilizaram *Bacillus subtilis* em consórcio com outros microrganismos, enquanto 9 estudos utilizaram a bactéria de forma isolada. Essa diferença permite comparar a eficiência da remoção dos parâmetros em cada condição.

Parâmetros

Nitrogênio total, nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato

Nos estudos com a bactéria isolada, 33,3% apresentaram remoção entre 90% e 95%, enquanto 66,6% apresentaram remoção abaixo de 80%. Nos estudos em consórcio, 45,45% apresentaram remoção acima de 95%, 9,09% entre 95% e 90%, 9,09% entre 90% e 80% e 36,36% abaixo de 80%.

Em Huang et al. (2025), foram realizados testes de remoção de nitrito em meio sintético e natural, que em condições ótimas, permitiram uma remoção entre 90% e 99% com a bactéria isolada. Fontalvo et al (2022) mostrou uma remoção de 92% de nitrato com a bactéria em consórcio e em um meio natural. Com essa comparação, observa-se alta eficiência em diferentes tipos de teste utilizando a *Bacillus subtilis*.

Fósforo

Nos estudos com a bactéria isolada, 50% apresentaram remoção acima de 95% e 50% abaixo de 80%. Nos estudos em consórcio, 33,3% apresentaram remoção acima de 95% e 66,6% apresentaram remoção abaixo de 80%.

Em Songkun et al. (2025), a remoção de fósforo com a bactéria isolada testada em um meio natural apresentou 97,36% de eficiência. Estudos de remoção de fósforo são essenciais, pois é um componente causador de eutrofização, principalmente em águas rasas (Holdt et al, 2025).

DBO e DQO

Entre os estudos avaliados, 3 analisaram apenas DBO, 7 analisaram apenas DQO e 5 analisaram ambos os parâmetros. Para DBO, nos estudos com a bactéria isolada, 50% apresentaram remoção entre 90% e 95%, enquanto os outros 50%

apresentaram remoção abaixo de 80%. Já nos estudos em consórcio, 66,6% apresentaram remoção entre 90% e 95% e 33,3% apresentaram remoção entre 80% e 90% (Gráfico 1).

Para DQO, nos estudos com a bactéria isolada, 25% apresentaram remoção acima de 95%, 25% entre 80% e 90% e 50% abaixo de 80%. Nos estudos em consórcio, 14,2% apresentaram remoção acima de 95%, 14,2% entre 90% e 95%, 42,86% entre 80% e 90% e 28,6% abaixo de 80% (Gráfico 2).

Para as duas análises de dados é possível notar uma alta eficiência pela maioria dos estudos apresentar mais de 80% de remoção desses parâmetros.

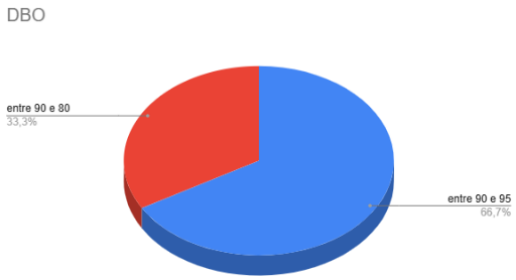


Gráfico 1: Estudos com dados de análise de DBO.
Fonte: Autoral (2026)

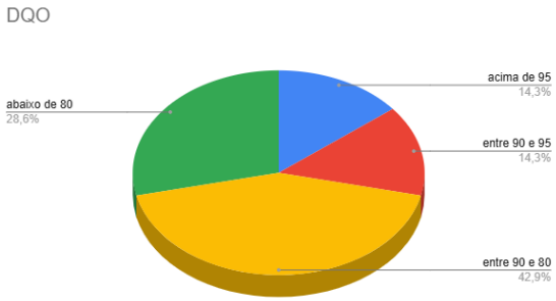


Gráfico 2: Estudos com dados de análise de DQO.
Fonte: Autoral (2026)

Como os microrganismos utilizam oxigênio dissolvido para realizar a decomposição de matéria orgânica, que são componentes presentes em águas eutrofizadas, a DBO pode ser usada como um parâmetro indicador de eutrofização em níveis altos. Com o tratamento dessa matéria orgânica, a DBO diminui, existindo assim as taxas de remoção de DBO. A DQO também é um indicativo de poluição por matéria orgânica, diferenciando-se da DBO por utilizar de agentes químicos e consumo de OD para realizar a oxidação desses componentes (Pham Phu, 2014).

Remediação de metais

Nos estudos com a bactéria isolada, 33,3% apresentaram remoção entre 90% e 95%, 16,6% entre 80% e 90% e 33,3% abaixo de 80%. Os estudos apresentaram também uma alta variedade de metais, como o cromo (IV) (remoção de 80,19%) (Padmaa et al., 2023), Térbio (III) (remoção de 50%) (Dong et al., 2022) e Cádmio (remoção de 62%) (Ding et al., 2021), enfatizando que a *Bacillus subtilis* apresenta funcionalidade tanto para combate de eutrofização quanto para a remediação de corpos d'água contaminados com metais.

Considerações Finais

A *Bacillus subtilis* apresentou principalmente alta eficiência na remoção de nitrogênio, bons resultados para remoção fósforo e redução significativa de DBO e DQO, além de eficiência também na remoção de metais pesados. Os consórcios microbianos geralmente foram mais eficientes, apesar da bactéria isolada apresentar bons resultados, a depender do meio utilizado e dos parâmetros medidos. Os parâmetros se relacionam com a eutrofização pois indicam a redução de nutrientes e matéria orgânica, contribuindo para o controle da eutrofização. Em termos de aplicabilidade, é interessante para tratamento de efluentes e sistemas aquícolas. Algumas limitações apresentaram-se como número reduzido de artigos em alguns parâmetros e diferença entre condições experimentais. Trabalhos futuros podem usar estudos em escala real, avaliação econômica, testes em diferentes consórcios e integração com outras tecnologias utilizando a bactéria. Assim, a *Bacillus subtilis* é uma alternativa promissora para remediação de águas e combate à eutrofização.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a FAPEMIG, CNPQ, a Universidade Federal de Uberlândia e ao Programa Empreendedorismo Ambiental pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ABD EL-RAHIM, Wafaa M.; MOAWAD, Hassan. The role of bioremediation in achieving environmental sustainability. In: ABD EL-RAHIM, Wafaa M. (ed.). *Bioremediation for Environmental Sustainability*. IntechOpen, 2025.

BOUHIA, Youness; HAFIDI, Mohamed; OUHDOUCH, Yedir; SOULAIMANI, Aziz; ZEROUAL, Youssef; LYAMLOULI, Karim. Microbial intervention improves pollutant removal and semi-liquid organo-mineral fertilizer production from olive mill wastewater sludge and rock phosphate. *Journal of Environmental Management*, v. 354, 120317, 2024.

DING, Jing; CHEN, Weiguang; ZHANG, Zilan; QIN, Fan; JIANG, Jing; HE, Anfei; SHENG, G. Daniel. Enhanced removal of cadmium from wastewater with coupled biochar and *Bacillus subtilis*. *Water Science and Technology*, v. 83, n. 9, p. 2075–2085, 2021.

DONG, Wei; WANG, Huimin; NING, Zhoushen; HU, Kaijian; LUO, Xianping. Bioadsorption of terbium(III) by spores of *Bacillus subtilis*. *Minerals*, v. 12, n. 7, p. 866, 2022.

HOLDT, K. Johann; GONSIORCZYK, Thomas; REIMER, Andreas; GESSNER, Mark O.; THIELE, Volker. Spatial patterns of sediment phosphorus contents and release in a deep clearwater lake undergoing rapid eutrophication. *Biogeochemistry*, v. 168, art. 83, 2025.

HUANG, Te-Yang; JU, Huei-Jen; HUANG, Mei-Ying; KUO, Qiao-Miao; SU, Wen-Ta. Optimal nitrite degradation by isolated *Bacillus subtilis* sp. N4 and applied for intensive aquaculture water quality management with immobilized strains. *Journal of Environmental Management*, v. 374, p. 123896, 2025.

KARICHAPPAN, Thirugnanasambandham; VENKATACHALAM, Sivakumar; JEGANATHAN, Prakash Maran. Analysis of efficiency of Bacillus subtilis to treat bagasse based paper and pulp industry wastewater: a novel approach. Journal of the Korean Chemical Society, v. 58, n. 2, p. 198–204, 2014.

PADMA, Seragadam; SRINIVAS, Badri; GHANTA, Kartik Chandra; DUTTA, Susmita. Bioremediation of Cr(VI) using indigenous bacterial strains isolated from a common industrial effluent treatment plant in Vishakhapatnam. *Water Science and Technology*, v. 88, n. 11, p. 2889–2900, 2023.

PAGE, Matthew J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v. 372, n. 71, 2021.

PHAM PHU, Song Toan. Research on the correlation between chlorophyll-a and organic matter BOD, COD, phosphorus, and total nitrogen in stagnant lake basins. In: KANEKO, N. et al. (eds.). *Sustainable living with environmental risks*. Tokyo: Springer, 2014. p. 177–191.

SONGKUN, Adisorn; SATAPANAJARU, Tunlawit; NOOMVONG, Phonchai; RUNG MUEANFA, Supawit; BOONNAROD, Dirada; MUANGKAEW, Kanitchanok; NONTHAMIT, Kantika; VIJUKSUNGSITH, Piyarat. Enhancing the efficiency of aquaculture wastewater treatment by a constructed wetland coupled with biochar immobilized with Bacillus spp. Desalination and Water Treatment, v. 324, p. 101502, 2025.

CLASSIFICAÇÃO HIDROQUÍMICA E EVOLUÇÃO TEMPORAL DO IMPACTO POR DRENAGEM ÁCIDA DE MINA EM UMA SÉRIE HISTÓRICA DE MONITORAMENTO NO SUL DE SANTA CATARINA

1 Albert Cardoso
1 Serviço Geológico do Brasil CPRM/SGB, albert.cardoso@sgb.gov.br

Palavras-chave: Drenagem ácida de mina; Background geoquímico; Mapa de calor

Introdução

A mineração de carvão no sul do Brasil, especificamente no estado de Santa Catarina, é uma atividade econômica de importância histórica (CARDOSO; FAN, 2024). Entretanto, a falta de fiscalização e práticas ambientais inadequadas ao longo de décadas resultaram em severos danos aos recursos naturais, sendo a geração da Drenagem Ácida de Mina (DAM) o problema ambiental mais crítico associado ao setor. A DAM é um fenômeno biogeoquímico complexo resultante da oxidação de minerais sulfetados, predominantemente a pirita, que ao serem expostos ao oxigênio e à água liberam acidez e altas concentrações de sulfato e metais dissolvidos nos corpos hídricos (SINGER; STUMM, 1970; NORDSTROM, 1982).

Na região carbonífera catarinense, as bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Tubarão e Urussanga concentram os maiores impactos. Estima-se que, apesar de mais de 20 anos de esforços de recuperação ambiental, pelo menos 1.241 km de cursos d'água ainda permanecem comprometidos pela DAM, inviabilizando o uso da água para consumo humano, agricultura e suporte à vida aquática. O monitoramento contínuo tem demonstrado que, embora algumas intervenções de remediação local sejam eficazes, a qualidade da água a jusante de áreas mineradas muitas vezes permanece degradada devido à poluição difusa e ao aporte de águas subterrâneas contaminadas (CARDOSO; FAN, 2021).

Para uma gestão ambiental eficiente, é fundamental a diferenciação entre as concentrações naturais de elementos químicos e as anomalias geradas por atividades antrópicas. A definição de valores de background geoquímico específicos para as unidades sedimentares da Bacia do Paraná, estabelecida por Cardoso et al. (2022), permitiu o preenchimento de uma lacuna científica, possibilitando o estabelecimento de metas de recuperação realistas e melhor identificação da severidade dos impactos. Além disso, o uso de grandes bases de dados de monitoramento dos recursos hídricos realizado pelo Serviço Geológico do Brasil tem permitido o desenvolvimento de modelos preditivos baseados em parâmetros de campo, como a condutividade elétrica, para estimar a carga de contaminantes e facilitar a comunicação dos resultados (CARDOSO et al., 2024).

Este trabalho tem como objetivo aplicar uma abordagem integrada para classificar e visualizar a evolução temporal do impacto hidroquímico associado à drenagem ácida de mina em estações de monitoramento dos recursos hídricos superficiais. A metodologia combina a identificação de amostras abaixo dos valores de background, a classificação das demais amostras por análise de cluster em categorias de baixo, moderado e alto impacto, e a representação dos resultados em mapa de calor categórico por campanha de amostragem. A abordagem busca fornecer uma ferramenta de apoio à gestão ambiental, permitindo identificar áreas críticas, acompanhar tendências temporais e comunicar de forma sintética os resultados do monitoramento hidroquímico.

Material e Métodos

Foram analisados 20 anos de dados de monitoramento da qualidade das águas superficiais da bacia do Rio Araranguá. O banco de dados compreendeu 2.483 amostras, coletadas entre 2004 e 2024 em 68 estações de monitoramento. Em campo, foram determinados pH e condutividade elétrica por meio de sonda multiparamétrica AP-800. As análises laboratoriais incluíram acidez por potenciometria, sulfato por gravimetria e metais/cátions totais — Fe, Al e Mn — por ICP-OES.

A classificação hidroquímica foi baseada nos parâmetros mais diretamente associados aos impactos da DAM na região, conforme discutido por Cardoso & Fan (2024): pH, condutividade elétrica, acidez, sulfato, ferro total, manganês total e alumínio total. Inicialmente, as amostras foram comparadas com valores de background regional definidos por Cardoso et al. (2022). Foram consideradas compatíveis com o background regional as amostras que apresentaram pH entre 5,4 e 8,1, condutividade elétrica inferior a 159,3 µS cm^{-1}, acidez inferior a 19,2 mg L^{-1}, sulfato inferior a 41,7 mg L^{-1}, Fe inferior a 3,27 mg L^{-1}, Mn inferior a 0,194 mg L^{-1} e Al inferior a 0,22 mg L^{-1}.

As amostras que excederam ao menos um desses limites foram submetidas à análise de agrupamento não supervisionada. Para isso, utilizou-se o algoritmo k-means, com definição prévia de três grupos, correspondentes às categorias relativas de baixo, moderado e alto impacto. Antes da clusterização, os sete parâmetros foram padronizados por escore-z, a fim de reduzir o efeito das diferentes unidades e amplitudes de variação entre as variáveis. A interpretação ambiental dos agrupamentos foi realizada com base nas estatísticas descritivas e na distribuição dos parâmetros em cada grupo, considerando como maior severidade as amostras com menor pH e maiores valores de condutividade elétrica, acidez, sulfato e metais.

Por fim, as amostras compatíveis com o background regional e os três grupos obtidos por clusterização foram integrados em uma classificação categórica única. A evolução temporal das condições hidroquímicas foi representada por meio de um mapa de calor, no qual as linhas correspondem às estações de monitoramento, as colunas às campanhas de amostragem e as cores às categorias de impacto: compatíveis com o background regional, baixo impacto, impacto moderado e alto impacto.

Resultados e Discussão

A Figura 1 apresenta o contraste entre as distribuições dos parâmetros hidroquímicos nas categorias, na qual os histogramas de linha mostram deslocamento progressivo das distribuições: o pH se desloca para valores mais baixos, enquanto condutividade elétrica, acidez, sulfato e metais se deslocam para valores mais elevados conforme aumenta a categoria de impacto.

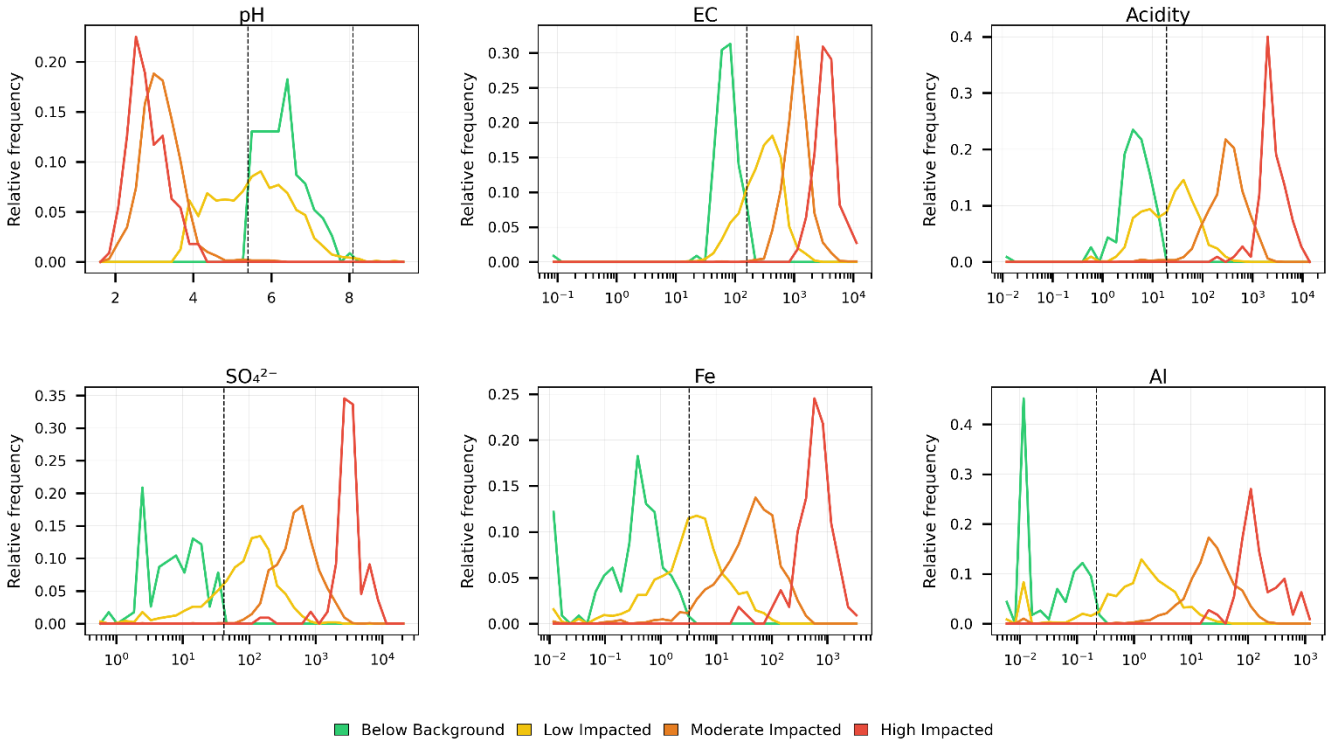


Figura 01: Distribuição relativa dos parâmetros hidroquímicos por categoria de impacto. As linhas tracejadas indicam os valores de background utilizados na classificação.

A classificação das amostras evidenciou que apenas uma pequena fração dos registros apresentou composição compatível com os valores de background regional. No conjunto classificado, 115 amostras, correspondentes a 4,6%, foram enquadradas como dentro dos valores de background regional "Below Background". Essas amostras apresentaram medianas de pH igual a 6,25, condutividade elétrica de 73,0 µS cm^{-1}, acidez de 4,60 mg L^{-1}, sulfato de 8,10 mg L^{-1}, Fe de 0,39 mg L^{-1}, Mn de 0,015 mg L^{-1} e Al de 0,017 mg L^{-1}. Esses valores são compatíveis com águas menos afetadas pelos processos geoquímicos associados à DAM e reforçam a utilidade do uso de valores de background regional como etapa inicial de triagem hidroquímica. Essa separação é conceitualmente importante porque evita que amostras com características naturais ou próximas ao background sejam artificialmente agrupadas com amostras impactadas por processos de acidificação e mobilização de metais.

As amostras classificadas como acima do background foram distribuídas em três categorias relativas de impacto, as quais apresentaram um gradiente hidroquímico bem definido. O grupo de baixo impacto concentrou 38,7% das amostras classificadas e apresentou medianas de pH 5,56, condutividade elétrica de 306,0 µS cm^{-1}, acidez de 25,58 mg L^{-1} e sulfato de 100,60 mg L^{-1}. Embora esse grupo represente a condição menos severa entre as amostras alteradas, seus valores já indicam desvio em relação ao background, assim, essa categoria pode ser interpretada como uma condição de impacto hidroquímico inicial ou relativamente atenuado.

A categoria de impacto moderado foi a mais frequente, representando 52,2% das amostras classificadas. Esse grupo apresentou uma mudança hidroquímica expressiva, com mediana de pH igual a 3,10, condutividade elétrica de 1140,0 µS cm^{-1}, acidez de 333,75 mg L^{-1}, sulfato de 535,84 mg L^{-1}, Fe de 45,25 mg L^{-1}, Mn de 2,915 mg L^{-1} e Al de 22,835 mg L^{-1}. A associação entre baixo pH, aumento de sulfato, acidez e metais é consistente com processos de oxidação de sulfetos e geração de drenagem ácida de mina.

A categoria de alto impacto, embora represente apenas 4,5% das amostras classificadas, apresentou as condições hidroquímicas mais severas. As medianas foram pH 2,80, condutividade elétrica de 3490,0 µS cm^{-1}, acidez de 2167,50 mg L^{-1}, sulfato de 3140,00 mg L^{-1}, Fe de 659,00 mg L^{-1}, Mn de 20,000 mg L^{-1} e Al de 125,000 mg L^{-1}. Essa categoria representa amostras com forte acidificação, elevada carga iônica e intensa mobilização de metais, sendo compatível com influência direta ou muito intensa de DAM.

A análise por estação indicou que 37 estações apresentaram predominância da categoria de impacto moderado, 28 apresentaram predominância de baixo impacto, 2 foram predominantemente classificadas como abaixo do background e apenas 1 estação apresentou predominância de alto impacto. Além disso, 12 estações apresentaram ao menos uma amostra classificada como alto impacto. Esse resultado sugere que a condição de alto impacto não é distribuída uniformemente em toda a rede de

monitoramento, mas ocorre de forma mais concentrada em subconjuntos específicos de estações. Entre essas, a estação AR024 se destacou por apresentar 36 amostras classificadas como alto impacto entre 38 registros classificados, correspondendo a 94,7% de suas amostras. Esse padrão indica persistência temporal de condições hidroquímicas severas nessa estação.

O mapa de calor (Figura 2) sintetiza a evolução temporal das categorias de impacto por estação e campanha. Essa visualização permite distinguir três padrões principais: estações predominantemente abaixo do background regional ou de baixo impacto; estações com persistência de impacto moderado; e estações com recorrência de alto impacto em diferentes campanhas. Uma comparação exploratória entre as campanhas iniciais 12–20 e as campanhas finais 41–49 mostrou redução da proporção de amostras classificadas como alto impacto, de 7,1% para 3,1%. Também é possível observar, de forma exploratória, estações individuais com mudanças no padrão categórico ao longo da série monitorada, sugerindo trajetórias distintas de melhora, persistência ou agravamento.

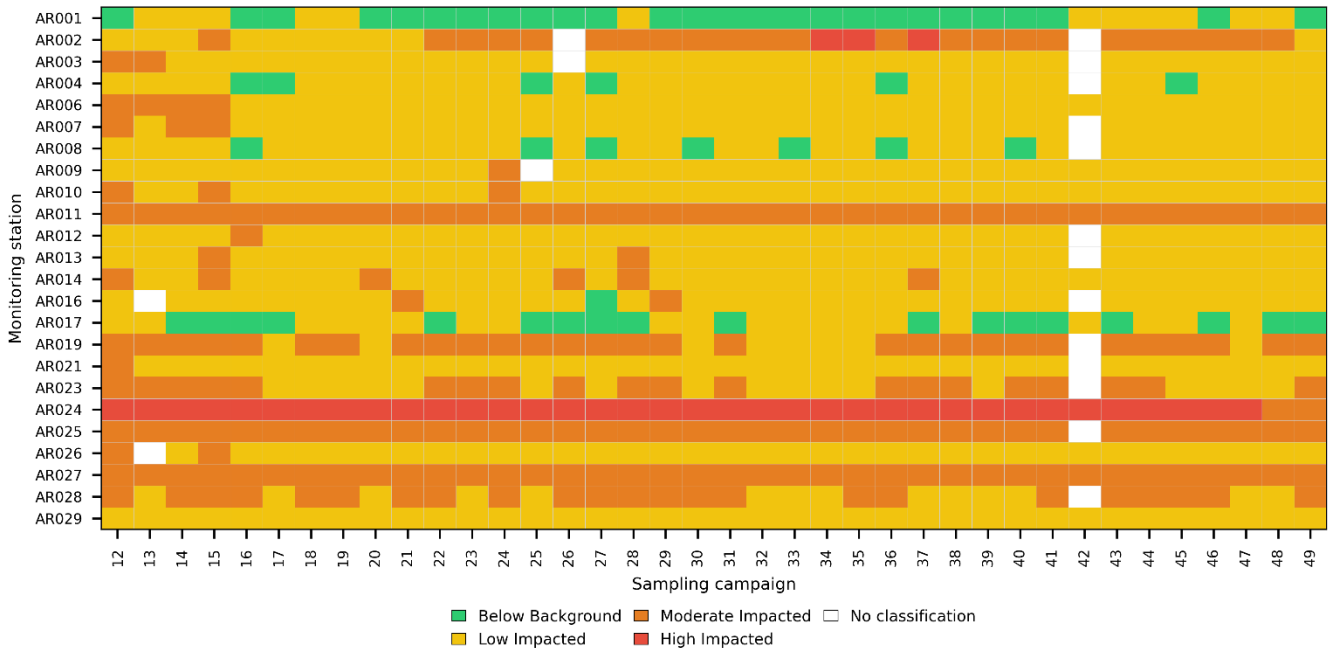


Figura 02: Mapa de calor da evolução temporal das categorias de impacto para as 24 primeiras estações da rede de monitoramento, até AR029.

A organização das amostras em categorias hidroquímicas permitiu evidenciar um gradiente consistente de impacto associado à DAM, marcado pela redução do pH e pelo aumento progressivo da condutividade elétrica, acidez, sulfato e metais. A análise temporal por estação indicou que o impacto não se distribui de forma homogênea na rede de monitoramento, mas se concentra em determinados pontos, alguns deles com recorrência de condições críticas ao longo das campanhas. Assim, os resultados reforçam a importância de avaliar a qualidade da água a partir de uma abordagem multivariada e temporal, capaz de distinguir tanto a intensidade do impacto quanto sua persistência nas estações monitoradas.

Considerações Finais

A combinação entre valores de background regional, análise de agrupamento e visualização temporal por mapa de calor permitiu organizar uma série histórica extensa de monitoramento em categorias hidroquímicas interpretáveis. A abordagem diferenciou amostras compatíveis com o background regional e condições de baixo, moderado e alto impacto, além de permitir a identificação de estações com persistência de condições críticas. Dessa forma, o procedimento proposto constitui uma ferramenta de apoio à gestão ambiental de áreas impactadas por mineração, contribuindo para sintetizar grandes volumes de dados, identificar estações prioritárias, acompanhar a evolução temporal da qualidade da água e comunicar os resultados de forma objetiva. Ressalta-se, entretanto, que a abordagem deve ser entendida como ferramenta de triagem e priorização, não substituindo avaliações hidrogeoquímicas detalhadas, análises de risco ou estudos específicos de fontes de contaminação.

Agradecimentos

O autor agradece ao Serviço Geológico do Brasil pelo apoio e suporte financeiro a esta pesquisa e aos colegas do Núcleo de Apoio de Criciúma pelas conversas e discussões sobre o tema.

Referências Bibliográficas

CARDOSO, A. T.; FAN, F. M. A first evaluation of water resource conditions after an environmental reclamation effort at a former degraded coal mining area in Southern Brazil. Environmental Monitoring and Assessment, v. 193, n. 10, 632, 2021.

CARDOSO, A. T.; FAN, F. M. Mining's legacy: Unraveling the impacts of acid mine drainage on the rivers and streams of the Santa Catarina coal region, Brazil. Geochimica Brasiliensis, v. 38, e-24002, 2024.

CARDOSO, A. T. et al. Surface water resources of Santa Catarina state's southern region – geochemical background of the coal mining territory. RBRH, Porto Alegre, v. 27, e41, 2022.

CARDOSO, A. T.; FAN, F. M.; VIERO, A. P. A decade-long journey shed light on chemical composition and field determination of acid mine drainage in Brazil. Environmental Monitoring and Assessment, v. 196, n. 123, 2024.

CARDOSO, A. T. et al. Dez anos de dados para gestão de águas impactadas pela mineração: uma abordagem baseada em monitoramento de campo. In: XXVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2025, Vitória. Anais... Porto Alegre: ABRHidro, 2025.

NORDSTROM, D. K. Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals. In: Acid Sulfate Weathering. [s.l: s.n.], 1982. p. 37–56.

SINGER, P. E.; STUMM, W. Acidic Mine Drainage: The Rate-Determining Step. Science, v. 167, p. 1121–1123, 1970.

O USO DA FERRAMENTA R-STUDIO PARA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS CHUVAS E DA QUALIDADE DA ÁGUA NO RESERVATÓRIO RIO GRANDE/SP

1 Jacqueline Isis Mancini, 2 Janine Bellincanta, 3 Fabiana de Oliveira Ferreira, 4 Geraldo de Freitas Maciel
1 Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), e-mail: ji.mancini@unesp.br; 2 UNESP, e-mail: janine.bellincanta@unesp.br; 3 Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), e-mail: f.ferreira07@unifesp.br; 4 UNESP, e-mail: geraldo.f.maciel@unesp.br

Palavras-chave: ferramenta R; avaliação hidrológica; reservatório.

Introdução

O Reservatório Rio Grande faz parte da sub-bacia Billings-Tamanduateí, localizada na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 6 no Estado de São Paulo, a qual corresponde integralmente à Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (CBH-AT, 2026). Tem grande relevância no contexto da Região Metropolitana de São Paulo, pois abastece os municípios de São Bernardo do Campo, Santo André e Diadema, totalizando uma população estimada (2025) de 2.026.781 habitantes (SABESP, 2025; IBGE, 2026). O Sistema Rio Grande compreende o reservatório do Braço do Rio Grande, onde encontra-se isolado da Represa Billings pelo dique da Via Anchieta. O Rio Grande recebe volumes do Braço do Rio Pequeno/Billings ocasionalmente por meio da Estação Elevatória do Rio Pequeno, e, por meio da Estação Elevatória do Rio Grande, permite a transposição de vazões adicionais para o reservatório de Taiaçupeba, componente do Sistema Produtor Alto Tietê (SPAT) (SP ÁGUAS, 2025).

Analisar como a precipitação tem ocorrido neste território é de extrema importância para identificar potenciais padrões de chuva, bem como, compreender como esta se propaga ou interfere em parâmetros associados à qualidade da água, permitindo assim ações previamente planejadas pelo poder público no âmbito da gestão dos recursos hídricos.

Nesse contexto, o presente estudo tem por objetivo avaliar, por meio da ferramenta R-Studio, o comportamento das chuvas na região do Reservatório Rio Grande e dos parâmetros relacionados à qualidade da água superficial, a fim de verificar se há alguma relação entre eles ou se é possível apenas prever tendências associadas.

Material e Métodos

Os dados associados à precipitação diária do Reservatório do Rio Grande foram extraídos da Plataforma da Agência SP Águas, do Sistema de Suporte à Decisão (SSD) Sistemas Produtores (“Mananciais em Números”) do período de 01 de janeiro de 2005 a 13 de dezembro de 2025, totalizando um pouco mais de 20 anos de dados tabulados. Quanto aos parâmetros para avaliar a qualidade da água do Reservatório do Rio Grande, foram considerados os dados disponíveis para pH, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, turbidez e temperatura do Sistema Integrado de Monitoramento de Qualidade das Águas (SIMQUA) da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) da Estação EF07 – Rio Grande. O SIMQUA teve início no ano de 1998 e possui estações automáticas em rios e reservatório do Estado de São Paulo, permitindo assim a avaliação da qualidade da água em tempo real e com medições diárias. Os dados de chuva diária (mm) foram tabulados e verificou-se 7.652 dados disponíveis com medição diária para todos os anos considerados (2005 a 2025). Os dados disponíveis no SIMQUA também totalizaram 7.652 medições diárias de qualidade da água do Reservatório do Rio Grande, entretanto, foram observadas lacunas de dados associados aos parâmetros: i) para pH, 1.079 medições não indicaram resultados para este parâmetro, o que equivale 14% do total de dados levantados; ii) para o parâmetro de Oxigênio Dissolvido, foram identificadas 1.205 lacunas, correspondendo a 16% do total de dados levantados; iii) a condutividade elétrica teve 981 lacunas, sendo 13% do total dos dados levantados; iv) para o parâmetro de turbidez, foram observadas 1.296 lacunas, o que compreende 17% do total de dados e v) o parâmetro de temperatura apresentou 941 lacunas, o que equivale 12% do total de dados levantados. As lacunas foram filtradas para o cálculo dos dados estatísticos. Os dados de precipitação e de qualidade da água foram sistematizados por meio da Ferramenta R-Studio, ambiente de software livre para análise estatística. Primeiramente, foram tabulados os dados de chuva, a fim de avaliar o seu comportamento no Reservatório do Rio Grande, adicionalmente, foram sistematizados os dados associados à qualidade da água do reservatório, com o objetivo de verificar as medidas de tendência central. Posteriormente, os conjuntos de dados foram integrados e relacionados, sendo selecionadas variáveis com potenciais interações, como temperatura e oxigênio dissolvido, além de precipitação diária e turbidez. Por fim, aplicou-se o teste de Anderson-Darling aos dados de precipitação diária, com o objetivo de verificar a normalidade, considerando sua adequação a grandes amostras.

Resultados e Discussão

Idealmente, no contexto da hidrologia, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) recomenda que para as normas climatológicas sejam utilizadas séries históricas de 30 anos para definir médias estáveis (WMO, 2017), entretanto, estudos indicam que a detecção de tendências e a análise da variabilidade climática podem ser realizadas com séries temporais mais curtas, desde que empregadas metodologias estatísticas adequadas. Observa-se que o comportamento da precipitação ao longo

de 20 anos está associado à ocorrência de eventos de diferentes intensidades pluviométricas. Para o Reservatório do Rio Grande, a precipitação média diária foi de 3,87 mm, enquanto a mediana foi de 0,2 mm, indicando forte assimetria na distribuição dos dados. O desvio padrão foi de 9,50 mm e o coeficiente de variação de 242%, evidenciando variabilidade muito elevada e a influência de eventos de maior intensidade na série analisada. A Figura 01 apresenta a distribuição da chuva diária (mm) ao longo dos 20 anos, sendo possível notar valores de pico de precipitação variando entre 82 mm e 147,5 mm, quantidade significativa de precipitação por dia, reflexo do clima tropical do bioma Mata Atlântica, o qual apresenta chuvas orográficas, em decorrência das elevações do planalto e das serras (IBF, 2025). Embora não se observe uma padronização nos períodos de ocorrência, esses eventos extremos distribuem-se ao longo dos anos analisados.

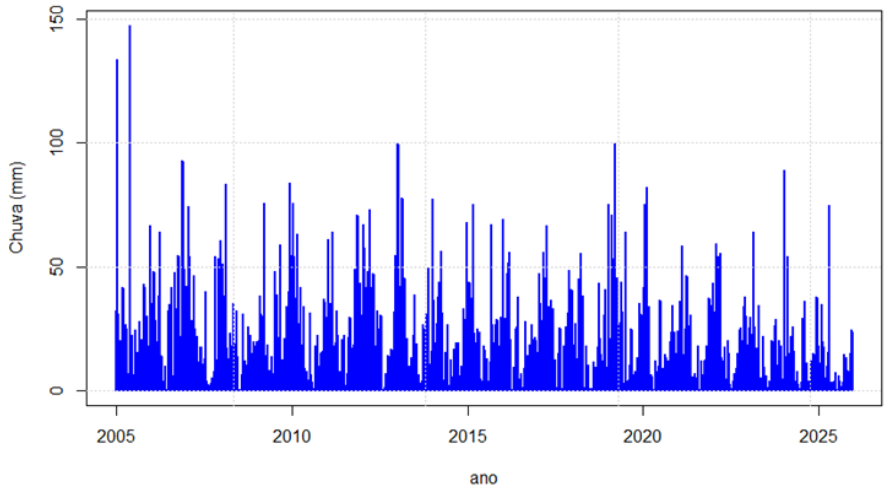


Figura 01: Distribuição da precipitação diária (mm) no Reservatório Rio Grande no período de 2005 a 2025.
Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da SP ÁGUAS (2025)

A normalidade dos dados de precipitação diária (mm) foi avaliada por meio do teste de Anderson-Darling. O p-valor obtido foi inferior a $2{,}2\times10^{-16}$, indicando a rejeição da hipótese de normalidade. Histogramas com curvas de densidade e ajuste à distribuição exponencial foram utilizados para complementar a análise (Figura 2). Observa-se que os dados apresentam assimetria à direita, com predominância de baixos valores de precipitação e ocorrência menos frequente de eventos intensos, caracterizando um comportamento compatível com a distribuição exponencial.

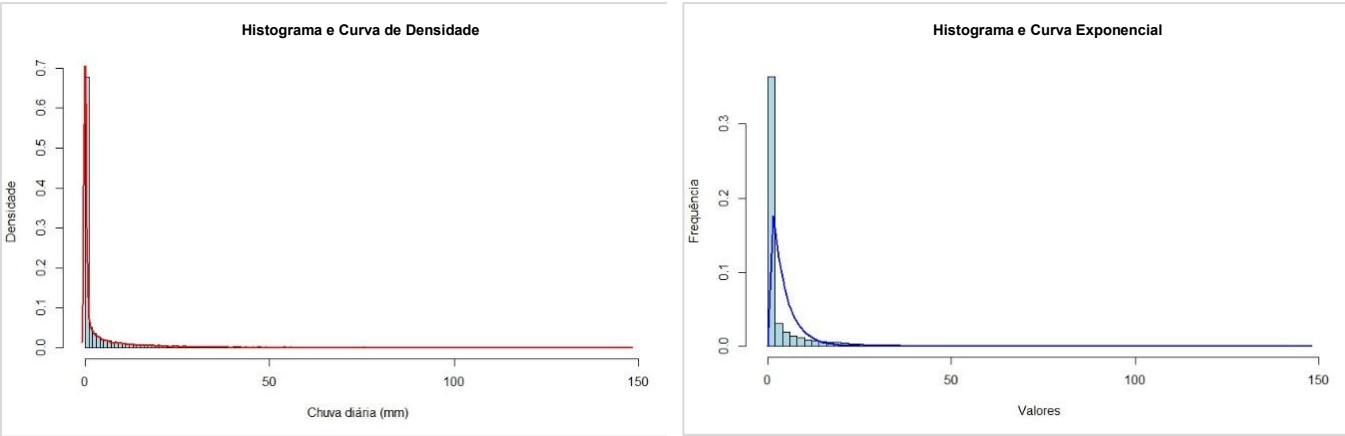


Figura 02: Modelos probabilísticos – Histograma e Curva de Densidade e Histograma e Curva Exponencial para chuva diária (mm) – dados de 2005 a 2025.
Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da SP ÁGUAS (2025)

Foram calculadas as medidas de tendência central e de dispersão dos parâmetros de qualidade da água (Tabela 01). De modo geral, o pH apresentou baixa variabilidade (coeficiente de variação de 0,09), indicando relativa estabilidade ao longo do período analisado. O oxigênio dissolvido apresentou variação moderada (CV = 0,19), com valores próximos entre média e mediana, sugerindo distribuição relativamente simétrica. A condutividade elétrica apresentou maior dispersão (CV = 0,40), indicando variabilidade mais acentuada, enquanto a turbidez apresentou o maior coeficiente de variação (CV = 1,24), evidenciando alta variabilidade e possível influência de eventos pontuais, como episódios de precipitação intensa. Esses resultados indicam que alguns parâmetros permanecem relativamente estáveis, enquanto outros são mais sensíveis a variações ambientais e eventos externos.

Parâmetro	Média	Mediana	Moda	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação
pH	7,72	7,6	7,1	0,73	0,53	0,09
Oxigênio Dissolvido	7,52 mg/L	7,8 mg/L	8,23 mg/L	1,39	0,53	0,19
Condutividade elétrica	120,21 µS/cm	97,61 µS/cm	103 µS/cm	47,79	2284,13	0,40
Turbidez	2,62 NTU	2,34 NTU	2,47 NTU	3,24	10,52	1,24
Temperatura	22,70 ºC	22,81 ºC	24,9 ºC	2,89	8,37	0,13

Tabela 01: Medidas de Tendência Central para os parâmetros de qualidade da água no período de 2005 a 2025.
Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados do SIMQUA (2025)

De forma geral, os resultados do monitoramento da qualidade da água do Reservatório Rio Grande disponibilizados pelo SIMQUA permitem inferir que há condições razoáveis de qualidade, considerando, sobretudo, valores significativos de Oxigênio Dissolvido, uma vez que de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005, para rios de água doce, Classe 2, os valores não podem ser inferiores a 5 mg/L, e a média encontrada para o Reservatório Rio Grande é de 7,52 mg/L e a moda é de 8,23 mg/L, o que representa valores adequados para a manutenção do ecossistema aquático. O parâmetro de turbidez também apresenta resultados expressivos, com média de 2,62 NTU e moda de 2,47 NTU, valores extremamente inferiores do que o valor máximo recomendado pela referida resolução (turbidez: até 100 NTU). A partir dos dados levantados e organizados na Ferramenta R Studio, realizou-se a sobreposição dos resultados de temperatura e oxigênio dissolvido, considerando que à medida que a temperatura da água aumenta, sua capacidade de reter oxigênio diminui (USGS, 2018). Trata-se de uma relação inversamente proporcional, e conforme demonstra a figura 03, observa-se, de fato, a relação do aumento de temperatura e queda no oxigênio dissolvido. No entanto, há algumas anormalidades, ao se observar cenários onde há temperaturas não tão altas, quando comparadas com outras, mas que apresentam quedas significativas de Oxigênio Dissolvido.

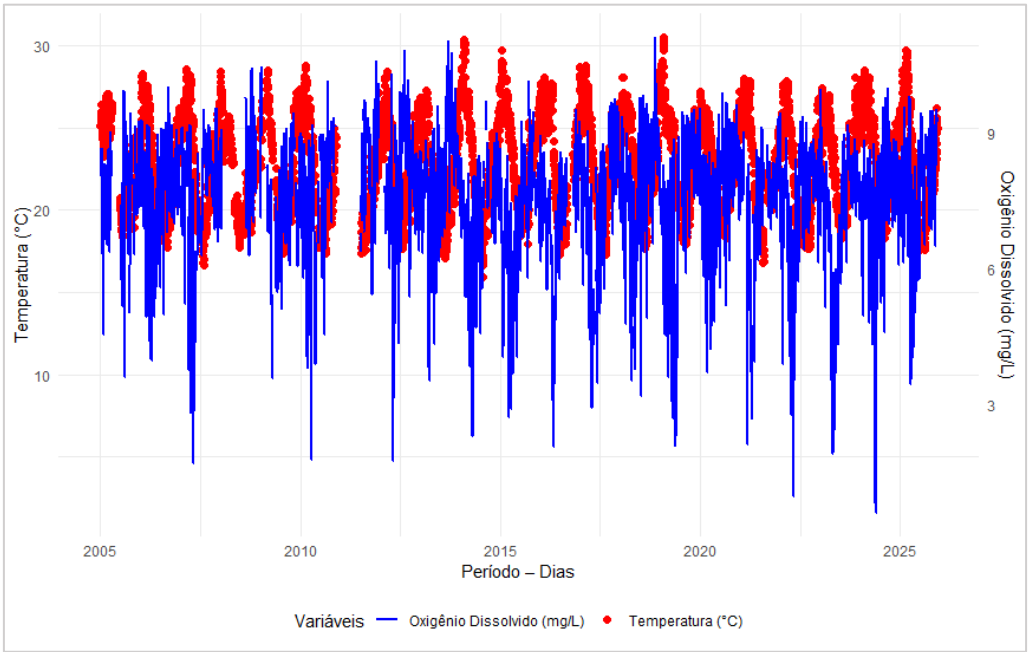


Figura 03: Relação de Temperatura (°C) e Oxigênio Dissolvido (mg/L) para o Reservatório do Rio Grande no período de 2005 a 2025.
Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados do SIMQUA (2025)

Quanto à turbidez, esta foi relacionada com os dados de precipitação diária, uma vez que as chuvas podem provocar o arrasto de sedimentos, tais como areia, argila e matéria orgânica (PENEDO et al, 2023). Neste caso, conforme demonstra a Figura 04, ainda que há aumento dos valores de turbidez significativos, estes não são alterados proporcionalmente aos valores de precipitação.

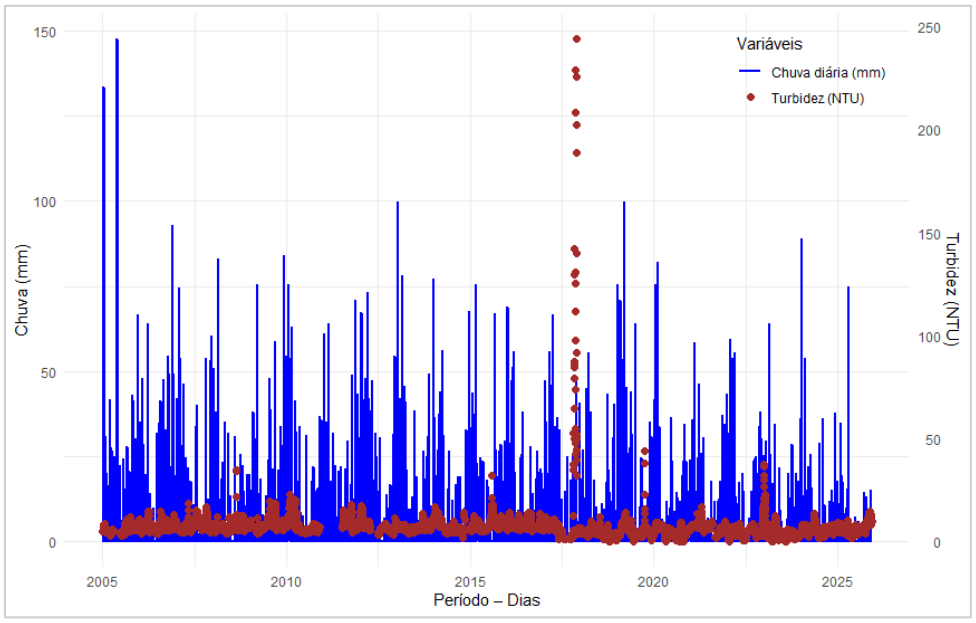


Figura 04: Relação de precipitação (mm) com turbidez (NTU) para o Reservatório do Rio Grande no período de 2005 a 2025.
Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados do SIMQUA (2025)

Considerações Finais

Para avaliar o desempenho hidrológico do Reservatório do Rio Grande, no que compete à precipitação, notou-se uma série de dados robusta, com dados diários que permitem identificar tendências e possíveis comportamentos de chuva. Ainda é necessária maior composição de dados para obter modelagens mais precisas e visualizar ou estabelecer padrões de precipitação.

Por outro lado, os dados disponibilizados pelo SIMQUA, que permitiriam avaliar a qualidade da água por meio de parâmetros básicos, como pH, oxigênio dissolvido, turbidez, temperatura e condutividade elétrica, possuem lacunas significativas, que podem distorcer a análise dos eventos. Cabe, portanto, ressaltar a importância da manutenção e calibração dos equipamentos que monitoram em tempo real a qualidade deste corpo hídrico e de demais do estado de São Paulo. O monitoramento em tempo real de parâmetros físico-químicos da água traz uma leitura mais assertiva das condições do ambiente e de possíveis interferências antrópicas e/ou naturais. Por meio da ferramenta R-Studio, foi possível promover correlações entre os dados analisados: i) o oxigênio dissolvido diminui à medida que a temperatura aumenta, podendo impactar a vida aquática e o ecossistema, no entanto, não foi possível aferir que esta situação ocorre de forma estritamente inversamente proporcional, o que pode indicar possíveis desvios nos equipamentos de medição ou influência de outras variáveis ambientais; e ii) quando há ocorrência de chuvas, a turbidez aumenta. Neste caso, observa-se que o aumento da turbidez não está somente condicionado aos volumes mais expressivos de chuva, ou seja, a medida que ocorre um evento de chuva, a turbidez aumenta, mas sim associado a ocorrência em si, não sendo necessariamente proporcional aos pontos de picos acentuados. Neste sentido, a Ferramenta R-Studio é uma ferramenta simples com grande potencial para calcular medidas de tendência central de banco de dados robustos, bem como, realizar análises de dados por meio de comparação e sobreposição de dados.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação stricto sensu em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), à CAPES e à UNESP, por nos proporcionarem acesso ao universo da pesquisa científica na área de recursos hídricos. À Profª Dra. Fabiana Oliveira e ao Profº Dr. Geraldo Maciel, pela orientação e apoio durante esta incrível jornada.

Referências Bibliográficas

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Sistema Integrado de Monitoramento da Qualidade das Águas do Estado de São Paulo – SIMQUA: As Estações - EF07 - Rio Grande. Disponível em: https://simqua.cetesb.sp.gov.br/estacao/11/. Acesso em: 06 de dezembro de 2025.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Sistema Integrado de Monitoramento da Qualidade das Águas do Estado de São Paulo – SIMQUA: Dados Históricos - EF07 - Rio Grande. Disponível em: https://simqua.cetesb.sp.gov.br/graficos_tabelas/. Acesso em: 06 de dezembro de 2025.

CBH-AT, Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. Caracterização Geral da Bacia do Alto Tietê. Disponível em: https://comiteat.sp.gov.br/a-bacia/caracterizacao-geral/. Acesso em: 01 de abril de 2026.

IBF, Instituto Brasileiro de Florestas. Bioma Mata Atlântica. Disponível em: https://www.ibflorestas.org.br/bioma-mata-atlantica. Acesso em: 21 de março de 2026.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados. Diadema. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/diadema.html. Acesso em: 04 de abril de 2026.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados. Santo André. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/santo-andre.html. Acesso em: 04 de abril de 2026.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados. São Bernardo do Campo. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/santo-andre.html. Acesso em: 04 de abril de 2026.

PENEDO, Pedro Henrique Silva; GARCIA, Giovanni de Oliveira; CECÍLIO, Roberto Avelino; ZANETTI, Sidney Sara; ROZA, Mariza Pereira de Oliveira. Relação entre precipitação e turbidez em cursos d'água no Espírito Santo. Caminhos de Geografia, Uberlândia, v. 24, n. 91, p. 132–152, 2023. DOI: 10.14393/RCG249161901. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/61901. Acesso em: 09 de dezembro de 2025.

SPAGUAS, Gráficos Rápidos. Sistema Rio Grande. Disponível em: https://cth.daee.sp.gov.br/ssdsp/Mananciais Acesso em: 13 de dezembro de 2025.

USGS, United States Geological Survey. Dissolved Oxygen and Water. 2018. Disponível em: https://www.usgs.gov/water-science-school/science/dissolved-oxygen-and-water#. Acesso em: 04 de abril de 26.

WMO, WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Guidelines on the calculation of climate normals. Geneva: WMO, 2017. Disponível em: https://library.wmo.int/viewer/55797/download?file=1203_en.pdf&type=pdf&navigator=1. Acesso em: 4 de abril de 2026.

ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE UM KIT DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM UM CÓRREGO URBANO

1 Pedro Henrique da Silva Oliveira, 2 Marcelle Lemos Leite, 3 Maiana Azevedo Vasconcelos
1 Universidade Federal do Sul da Bahia, e-mail: pedro.oliveira@gfe.ufsb.br; 2 Universidade Federal do Sul da Bahia, e-mail: marcelle.leite@gfe.ufsb.edu.br; 3 Universidade Federal do Sul da Bahia, e-mail: maiana.azevedo@ufsb.edu.br.

Palavras-chave: Recursos hídricos; Poluição; Alfakit.

Introdução

Os recursos hídricos desempenham papel fundamental na garantia das necessidades humanas e na manutenção dos ciclos biogeoquímicos do carbono, nitrogênio e fósforo, atuando no transporte e na disponibilidade de nutrientes indispensáveis ao equilíbrio e à conservação dos ecossistemas (Santos *et al.*, 2026; Jesus *et al.*, 2026).

Todavia, a urbanização desordenada, o lançamento de efluentes *in natura* e a ausência de gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) têm agravado a poluição dos rios (Salunke; Zaware, 2024; Oliveira *et al.*, 2017). Na região sul da Bahia, observa-se a intensificação dos processos de degradação dos recursos hídricos, marcada por frequentes inconformidades da qualidade da água dos mananciais, principalmente em decorrência do despejo de resíduos e esgotos domésticos e da ocupação irregular das margens dos cursos d'água (Bifano *et al.*, 2020). Assim, o conhecimento da qualidade da água torna-se necessário para o planejamento e gestão adequada dos recursos hídricos (Gadelha *et al.*, 2022).

A qualidade dos corpos d'água é avaliada a partir da análise integrada de parâmetros físico-químicos e biológicos, os quais permitem identificar alterações ambientais e indícios de poluição, conforme previsto na Resolução CONAMA nº 357/2005, a qual dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento (Brasil, 2005). Nesse sentido, a preservação dos recursos hídricos depende da adoção de estratégias de monitoramento capazes de fornecer diagnósticos confiáveis sobre suas condições (Maranho *et al.*, 2017).

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do Kit de Potabilidade Alfakit no monitoramento da qualidade da água do córrego Chamagunga, localizado no município de Porto Seguro – BA, a partir da análise dos parâmetros físico-químicos.

Material e Métodos

O trabalho foi desenvolvido no córrego Chamagunga, situado no perímetro urbano de Porto Seguro, sul do Estado da Bahia (Figura 1). O município possui uma área territorial de 2.285,734 km² e uma população de estimada de 182.630 habitantes (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas – IBGE, 2025).

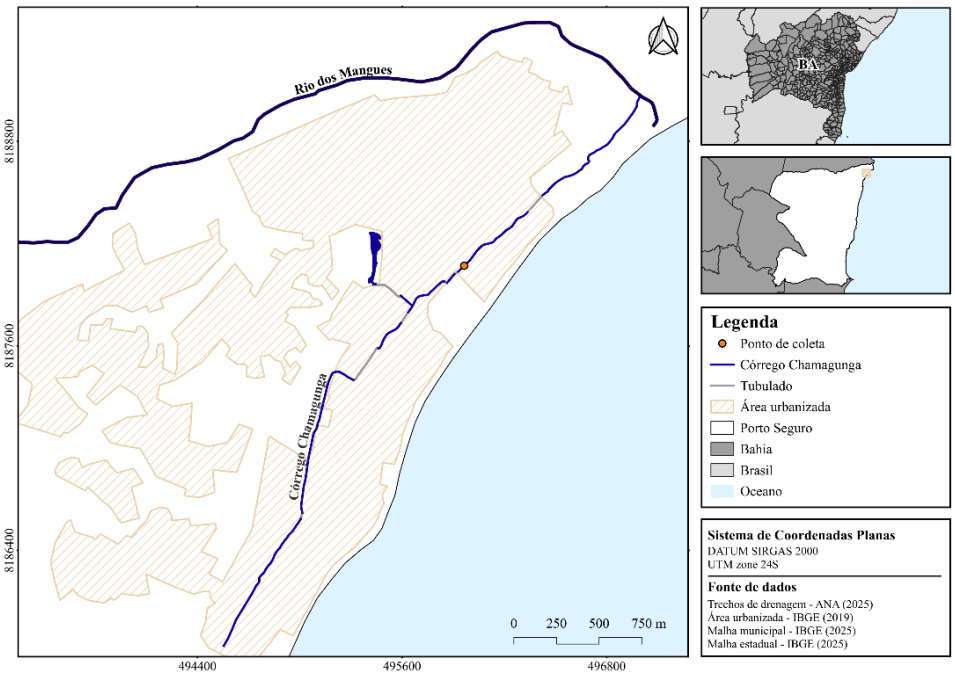


Figura 01: Localização do ponto de coleta.
Fonte: Autores (2026).

A caracterização físico-química da água foi realizada *in situ*, utilizando-se: (i) Kit Potabilidade Alfakit, sendo as análises conduzidas por comparação com cartela colorimétrica e por titulações volumétricas; e (ii) sonda multiparâmetro. A Tabela 01 apresenta os parâmetros analisados e os métodos correspondentes.

Parâmetros	Unidade	Método
Temperatura	ºC	Sonda Multiparâmetro Portátil - AK88
Cor	$mg.L^{-1}$	Kit de Potabilidade – Alfakit
Turbidez	NTU	Kit de Potabilidade – Alfakit
Sólidos Totais Dissolvidos	$mg.L^{-1}$	Sonda Multiparâmetro Portátil - AK88
Salinidade	‰	Sonda Multiparâmetro Portátil - AK88
Condutividade Elétrica	$\mu S.cm^{-1}$	Sonda Multiparâmetro Portátil - AK88
pH	--	Sonda Multiparâmetro Portátil - AK88
Cloreto Total	$mg.L^{-1}$	Kit de Potabilidade – Alfakit
Ferro	$mg.L^{-1}$	Kit de Potabilidade – Alfakit
Amônia	$mg.L^{-1}$	Kit de Potabilidade – Alfakit
Cloro	$mg.L^{-1}$	Kit de Potabilidade – Alfakit
Oxigênio Dissolvido	$mg.L^{-1}$	Sonda Multiparâmetro Portátil - AK88

Tabela 01: Parâmetros físico-químicos analisados.
Fonte: Autores (2026).

Resultados e Discussão

A Tabela 2 mostra os resultados dos parâmetros físico-químicos da água do ponto amostral em comparação com os respectivos valores máximos permitidos (VMP) para corpos hídricos de classe II, de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005.

Parâmetros	Unidade	Valor obtido	VMP - Classe II
Temperatura	ºC	23,5	--
Cor	$mg.L^{-1}$	25	75
Turbidez	NTU	43,1	100
Sólidos Totais Dissolvidos	$mg.L^{-1}$	96,3	500
Salinidade	‰	0,08	0,5
Condutividade Elétrica	$\mu S.cm^{-1}$	190	--
pH	--	7,3	6,0 – 9,0
Cloreto Total	$mg.L^{-1}$	30	250
Ferro	$mg.L^{-1}$	0,75	0,3
Amônia	$mg.L^{-1}$	2,43	3,7 (pH ≤ 7,5)
Cloro	$mg.L^{-1}$	0,05	0,01
Oxigênio Dissolvido	$mg.L^{-1}$	2,4	≥ 5,0

Tabela 02: Resultados das análises físico-químicas do ponto amostral.
Fonte: Autores (2026).

Observa-se que o Ferro, Cloro e Oxigênio Dissolvido (OD) apresentaram valores em desconformidade com o estabelecido pela legislação ambiental vigente. A salinidade observada, de 0,08 $mg.L^{-1}$, confirma a natureza doce do corpo hídrico analisado, uma vez que o limite que distingue águas doces de salobras é de 0,5 $mg.L^{-1}$.

Entre os parâmetros, o OD destaca-se como o mais relevante, por ser fundamental à manutenção da vida dos organismos aquáticos (Silva *et al.*, 2025). Baixas concentrações de OD podem provocar quadros de hipóxia, comprometendo a respiração dos organismos aquáticos, afetando sua saúde e podendo, consequentemente, levá-los à morte (Silva, 2023). Pode ser afetado por diferentes fatores, como temperatura, quantidade de material orgânico e nutrientes.

Conforme Prado (1995), as maiores concentrações de ferro em águas superficiais resultam do carreamento e da lixiviação dos solos, com destaque para os argissolos como principais contribuintes. Assim, sugere-se que a concentração de ferro observada, de 0,75 $mg.L^{-1}$, pode estar diretamente relacionada à composição dos solos na área de drenagem do córrego.

O valor elevado de Cloro, de 0,05 $mg.L^{-1}$, pode estar associado tanto a fatores de origem natural, como a dissolução de minerais, quanto a fatores de origem antrópica, como o lançamento de efluentes domésticos/industriais no corpo hídrico (Von Sperling, 1996).

A CE superior a 100 $\mu S.cm^{-1}$ indica possíveis lançamentos de efluentes domésticos/industriais (Brasil, 2006). Nesse contexto, o valor de CE observado, de 190 $\mu S.cm^{-1}$, encontra-se acima do recomendado para corpos d'águas, sugerindo a ocorrência de despejos de esgotos *in natura*, de forma semelhante ao estudo conduzido por Oliveira *et al.* (2025) no mesmo córrego.

Considerações Finais

A inconformidade dos valores de OD e Cloro em relação aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 indica possível influência de fontes poluidoras de origem antrópica no córrego Chamagunga, como o lançamento de

esgotos domésticos. Adicionalmente, as concentrações observadas de Ferro e Cloro sugerem que a qualidade da água do curso hídrico é condicionada não apenas por atividades antrópicas, mas também por fatores naturais, relacionados às características pedológicas e à composição mineralógica dos solos.

Diante disso, a aplicação do Kit de Potabilidade Alfakit demonstrou potencial como ferramenta ágil e eficaz no monitoramento da qualidade da água em cursos d'água, apresentando-se como uma alternativa acessível para subsidiar processos de gestão e tomada de decisão no âmbito da gestão pública.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

BIFANO, R. B. A. et al. Avaliação da Qualidade da Água em Microbacias Hidrográficas do Extremo Sul da Bahia, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 2447–2461, 2020.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Alterada pelas resoluções CONAMA n° 393/2007, n° 397/2008, n° 410/2009 e n° 430/2011. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Seção 1, p. 34. 18 mar. 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Coordenação-Geral de Vigilância em

Saúde Ambiental. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano**. Brasília, DF: Ministério

da Saúde, 2006. 212 p.

GADELHA, J. E. F. D. S. et al. CONSEQUÊNCIAS DA EUTROFIZAÇÃO EM CORPOS HÍDRICOS. REMUNOM, [s. l.], v. 3, n. 1, 2022. Disponível em: https://remunom.ojsbr.com/multidisciplinar/article/view/908. Acesso em: 24 abril 2026.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Cidades e Estados**: Brasil. Porto Seguro: IBGE; 2019

JESUS, F. N.; ALMEIDA, S. E. S. de; FERREIRA, A. QUALIDADE DA ÁGUA E SUSTENTABILIDADE: UM ESTUDO DE CASO NA SUB-BACIA DO RIO DO PEIXE. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 1–17, 2026.

MARANHO, L. A.; BOTELHO, R. G.; NOGUEIRA, L. A.; TORNISIELO, V. L. Avaliação da qualidade da água do Ribeirão Samambaia (São Pedro, São Paulo, Brasil) através de parâmetros físicos e químicos, índice de estado trófico e teste de toxicidade com Daphnia magna. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 22, n. 1, p. 195–201, 2017.

OLIVEIRA, R. M. M.; SANTOS, E. V. D.; LIMA, K. C. Avaliação da qualidade da água do riacho São Caetano, de Balsas (MA), com base em parâmetros físicos, químicos e microbiológicos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 523–529, 2017.

OLIVEIRA, P. H. S.; SILVA, E. M.; OLIVA, A.; SANTOS, A. O.; SILVA, A. G. Análise do desempenho de sementes de Brassica oleracea e Lactuca sativa na determinação da fitotoxicidade do Córrego Chamagunga, Porto Seguro – BA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 33., 2025, Brasília, DF. **Anais** [...]. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anaiseletronicos/33cbesa/972_tema_iv.pdf. Acesso em: 20 abr. 2026.

SALUNKE, V. S.; ZAWARE, P. P. Water Quality Assessment Using Overall Index of Pollution (OIP) in Upper Godavari River (Maharashtra, India). **Anuário do Instituto de Geociências**, [s. l.], v. 47, 2024. Disponível em: https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/59417. Acesso em: 27 abril 2026.

SANTOS, J. L.; RAMOS, P. R.; REIS, W. O. C. Impactos Ambientais e Qualidade da Água em Nascentes de Jenipapo e Catuni da Grota, Jaguarari-BA: desafios e ações de conservação. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 118–142, 2026.

SILVA, H. M. G. Estudo dos indicadores de qualidade da água do Rio São Francisco: turbidez, demanda bioquímica de oxigênio e oxigênio dissolvido. **Engineering Sciences**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 33–40, 2023.

SILVA, M. C. A.; GUEDES, M. T. C. J.; PESSOTA, R. M. P.; GAJARDO, G. P.; MARIN, R. M. Avaliação temporal do oxigênio dissolvido e demanda bioquímica de oxigênio na Barragem Mãe D'Água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 33., 2025, Brasília, DF. **Anais** [...]. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anaiseletronicos/33cbesa/879_tema_iv.pdf. Acesso em: 22 abr. 2026.

PRADO, H. Manual de classificação de solos do Brasil. 2. ed. Jaboticabal: FUNEP, 1995.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. [S. l.]: Editora UFMG, 1996.

ESTUDO DA ADSORÇÃO DO GLIFOSATO POR FILME COMPÓSITO DE NANOCELULOSE-QUITOSANA

1Giovanni Rampazzo Baldi, 2Marianna Jardim Santos, 3Maria Eduarda Soler da Angela, 4Giovana Rocha de Oliveira, 5Danielle Goveia, 6Suzan da Silva Lessa, 7Paulo Sérgio Tonello

1 UNESP, e-mail: giovanni.rampazzo@unesp.br; 2 UNESP, e-mail: marianna.jardim@unesp.br; 3 UNESP, e-mail:maria.soler@unesp.br, 4 UNESP, e-mail: giovana.r.oliveira@unesp.br; 5 UNESP; e-mail: e-mail: danielle.goveia@unesp.br, 6 UNESP, e-mail: suzan.lessa@unesp.br ;7 UNESP, e-mail: paulo.tonello@unesp.br.

Palavras-chave: Biopolímeros; Agrotóxico; Águas naturais.

Introdução

Em meio às recentes transformações ambientais e o avanço da agricultura no Brasil, o comércio e uso de pesticidas cresce em larga escala. O Brasil é um dos principais produtores agrícolas no mundo e, como resultado, a agricultura avança a cada ano. Atualmente, o país é o principal consumidor de agrotóxicos no mundo, sendo que somente no ano de 2021 foram aplicadas 719,5 mil toneladas de venenos em lavouras nacionais (FAO, 2021). Isso corresponde a 10,9 kg de agrotóxicos para cada hectare de lavoura e 3,31 kg de agrotóxicos por pessoa.

Com o objetivo de matar ervas daninhas, um dos principais herbicidas utilizados é o glifosato (N-(fosfonometil)glicina). No ano de 2023, Glifosato e seus sais corresponderam aos dez ingredientes herbicidas ativos mais comercializados no Brasil (IBAMA, 2023). Em meio aquoso, a meia vida do glifosato pode variar de 1,5 a 130 dias, além de ser quimicamente estável e não sofrer degradação fotoquímica na água superficial (CETESB, 2022).

Sua aplicação exacerbada pode comprovadamente resultar na presença de resíduos na agropecuária. Além disso, está relacionado com desenvolvimento de tumores, problemas de imunidade, infertilidade, problemas neurológicos, e outros malefícios à saúde humana (MADDALON *et al*., 2022). Tendo em vista essa problemática, o surgimento e aprimoramento de diversos métodos para a medição e remoção dessas substâncias vem se destacando na questão de monitoramento ambiental.

Um dos processos de remediação conhecidos em ambientes aquáticos é a adsorção, na qual se avalia a propriedade de determinados sólidos em remover determinadas substâncias líquidas ou gasosas, e acumular em sua superfície, viabilizando sua separação (Zola, 2017). Os bioadsorventes se destacam, sendo adsorventes alternativos, benéficos por serem limpos e renováveis, e por poderem ser utilizados para remoção e quantificação de diversos poluentes. São provenientes de resíduos de processos agrícolas, extrativistas e da aquicultura. Os biopolímeros (compostos derivados, que podem ser utilizados como bioadsorventes) mais abundantes na natureza são celulose e quitina, respectivamente (MOURA, *et al.* 2006).

A quitosana é uma poliamina linear produzida a partir da quitina, proveniente de materiais orgânicos como a casca do camarão, e que possui propriedade de se solubilizar em ácidos orgânicos. É eficaz para a construção de biofilmes adsorvente, tanto de cátions metálicos quanto de ânions, e reage com proteínas, polissacarídeos, sais minerais e metais pesados (BASSI; PRASHER, 2000). Para maior eficácia na produção dos biofilmes, a quitosana pode estar associada a outros materiais com propriedades notáveis. Um desses materiais é a celulose, o material orgânico mais abundante da Terra. É amplamente estudada e utilizada por ter, além de propriedades adsortivas, possuir propriedades mecânicas relevantes, como elevada resistência e rigidez, baixo peso, além de baixo custo e abundância (YANO & NAKAHARA, 2004). Portanto, o compósito nanocelulose-quitosana se apresenta como um adsorvente de contaminantes promissor no meio ambiental.

Dessa forma, o presente trabalho visa investigar a utilização de filmes compósitos de nanocelulose e quitosana para a remoção de glifosato de meios aquosos, fazendo a síntese e caracterização desses materiais e avaliando os mecanismos de adsorção e a eficiência em diferentes condições de temperatura e concentração.

Metodologia

A metodologia escolhida para a produção da nanocelulose foi proposta por Goveia *et al,* (2010). A solução com nanocelulose e água destilada foi agitada por 60 minutos e o desfibrilada utilizando o Moinho Super Masscolloider a 1500 rpm, para produzir as nanopartículas. As soluções preparadas continham 1%, 2% e 3% de polpa celulósica. Utilizando a estufa e dessecador obteve-se a concentração de massa de celulose, em g/g. A quitosana utilizada no estudo foi a quitosana comercial de alto peso molecular da Sigma-Aldrich.

Para a produção dos filmes compósitos nanocelulose-quitosana a metodologia utilizada foi adaptada de Listyarini *et. al*, 2018, na qual foram dissolvidos 4g de quitosana em 200mL de ácido acético 1% (v/v), e mantido em agitação por 24 horas. Em seguida, adicionou-se 2g de nanocelulose diluída em 20mL de água ultrapura, agitando e aquecendo a mesma por 2 horas, não deixando a temperatura ultrapassar 80ºC. Após esfriar, a solução foi sonicada por 30 minutos em um ultrassom Eco-Sonic, ajustado a uma potência de 80%, visando garantir a homogeneidade da solução. Em seguida, foi transferida para uma placa de petri de 13,5 cm de diâmetro e deixada secar até que atingisse massa constante de 60ºC. Após o processo de secagem os filmes foram hidratados em NaOH 0,1 molL^{-1} por 24 horas, Por fim, lavados, cortados em quadrados de 2,5 cm de largura e armazenados em água ultrapura sob refrigeração.

O filme produzido foi caracterizado utilizando Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), assim determinando os grupos ligantes presentes na nanocelulose. Também foram determinados os valores de *pH* de carga zero *pHpcz,* baseado na metodologia de Herrera (2021), para avaliação do melhor valor de pH para condução dos testes de adsorção.

Foram feitas as isotermas, analisando a quantidade adsorvida por massa de adsorvente. Inicialmente foi preparada uma solução de 10 mL de água e 0,005g de glifosato, *pH* 6 e em duplicata. O filme compósito foi adicionado aos erlenmeyers, que foram agitados em banho-maria por 24 horas. Após o período de 24 horas, foram retiradas alíquotas e determinada a concentração de glifosato, de acordo com metodologia proposta por Bhaskara e Nagaraja (2006). As isotermas foram determinadas em diferentes temperaturas e analisadas segundo modelos de Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson e Temkim.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos pelo FTIR evidenciam as bandas características e os agrupamentos químicos do compósito: observaram-se bandas associadas principalmente aos grupos O-H (hidroxila), C-H (carbono-hidrogênio), C=O (carbonila), presentes tanto na nanocelulose quanto na quitosana, e os grupos C-O-C, (éter) da nanocelulose, e C-N (carbono-nitrogênio) e NH_2 (amino), bandas polissacarídicas e bandas amido, ambas atribuídas à quitosana. Isso evidencia que houve incorporação dos componentes de ambos biomateriais na estrutura do compósito (Figura 01). Pelo gráfico de transmitância (%) por número de onda (cm^{-1}) é possível observar que o número de onda de 3273 cm^{-1} do filme compósito nanocelulose-quitosana apresentou uma alta intensidade quando comparado à nanocelulose. Considerando que número de onda de 1647 cm^{-1}indica a formação de ligações de hidrogênio entre os componentes do filme, infere-se que houve aumento da quantidade de grupos OH no compósito. Isso possivelmente resulta em uma boa adesão (RAHMI, *et al*., 2017).

Compósito Nanocelulose-Quitosana	
Nº de onda	**Atribuição**
3273	O-H
2870	C-H
1647	C=O
1025	C-O
895	C-O-C

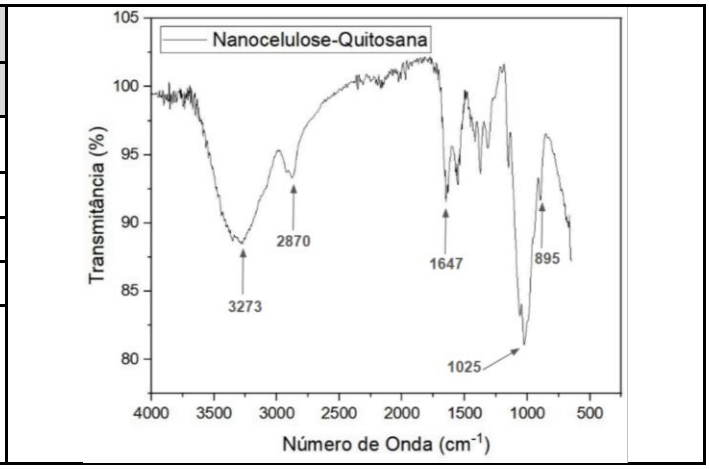


Figura 01: Espectro de absorção no infravermelho do filme compósito e seus principais grupos ligantes.
Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 02 representa o gráfico de pH de carga zero obtido para o filme. Observa-se no gráfico que o pH de carga zero resultou em um valor de 7.35, favorecendo o glifosato, uma vez que sendo o pH da solução menor que pH de carga zero de determinado material, há o favorecimento da adsorção de partículas carregadas negativamente. O pH do estudo foi ajustado para 6 (filme compósito nanocelulose-quitosana possui pH de carga zero maior que 6 - que favorece a adsorção dos ânions).

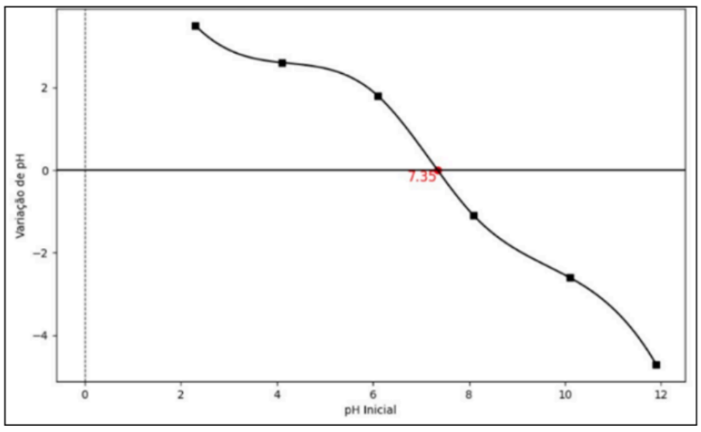


Figura 02: pH_{PZC} do filme compósito nanocelulose-quitosana.
Fonte: Autoria própria (2024).

O estudo da termodinâmica de adsorção, feito por meio das isotermas de adsorção (Figura 03), evidenciou a relação matemática entre a quantidade de glifosato adsorvida e a concentração do adsorvato no equilíbrio. Nota-se a formação de um formato de "L" invertido, principalmente nos gráficos de 20ºC e 30ºC, padrão que pode sugerir uma adsorção favorável em baixas concentrações como fora teorizado por Langmuir. Pôde-se notar pelas curvas que o modelo de Redlich-Peterson foi o modelo que apresentou um melhor ajuste no geral, principalmente nas temperaturas de 20ºC e 30ºC, onde é possível perceber um ajuste evidente. O alto valor de K_R, a constante de Redlich-Peterson relacionada com a capacidade de adsorção e dada em L g^{-1}, sugere que o filme compósito tem uma afinidade significativa pelo glifosato, resultando em uma adsorção eficiente. Além disso, observa-se que a quantidade máxima de glifosato adsorvida é, para a temperatura de 20º C aproximadamente 1,23 $\boldsymbol{mg \cdot g^{-1}}$, enquanto para 40ºC é de 0,63 $\boldsymbol{mg \cdot g^{-1}}$, indicando uma relação inversamente proporcional entre temperatura e adsorção. A isoterma de Redlich-Peterson teve melhor valor de K_R na temperatura de 20ºC (Tabela 01), evidenciando que sob temperaturas mais altas há um comprometimento da adsorção.

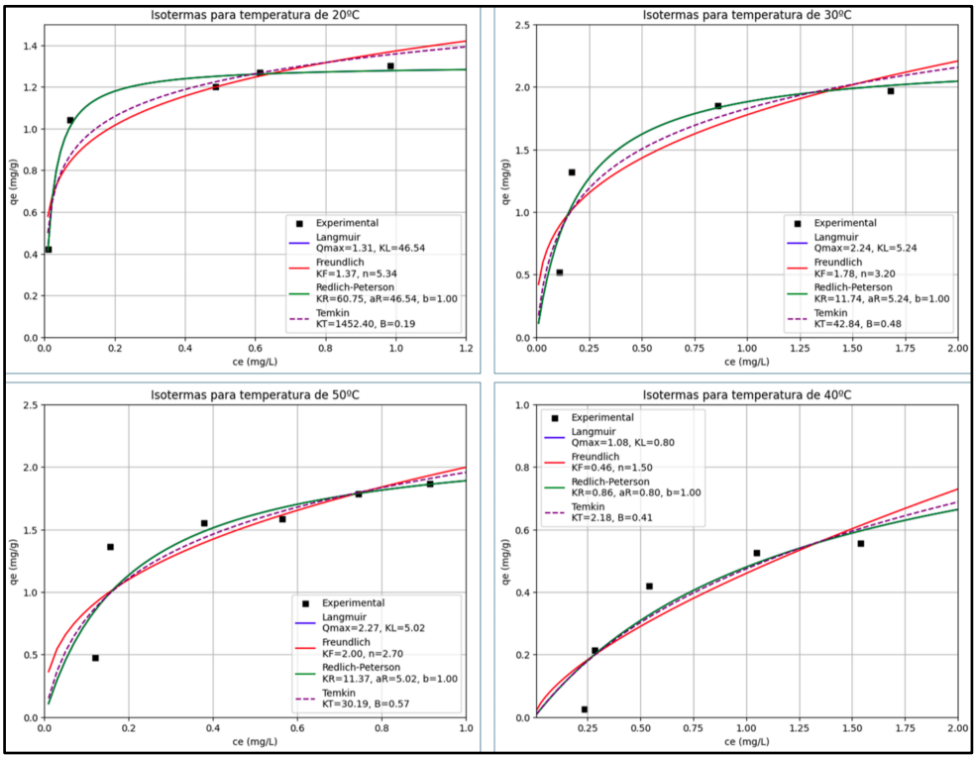


Figura 03: Gráfico das isotermas.
Fonte: Autoria própria (2024).

Temperatura (ºC)	Modelo	Qmax (mg/g)	KL	KF (mg/g)	n	KR	aR	b	KT (L/g)	B
20	Langmuir	1,31	46,54	-	-	-	-	-	-	-
	Freundlich	-	-	1,37	5,34	-	-	-	-	-
	Redlich-Peterson	-	-	-	-	66,75	46,54	1	-	-
	Temkin	-	-	-	-	-	-	-	1452,4	0,19
30	Langmuir	2,24	5,24	-	-	-	-	-	-	-
	Freundlich	-	-	1,78	3,2	-	-	-	-	-
	Redlich-Peterson	-	-	-	-	11,27	5,24	1	-	-
	Temkin	-	-	-	-	-	-	-	42,84	0,48
40	Langmuir	1,08	0,8	-	-	-	-	-	-	-
	Freundlich	-	-	0,46	1,5	-	-	-	-	-
	Redlich-Peterson	-	-	-	-	0,86	0,8	1	-	-
	Temkin	-	-	-	-	-	-	-	2,18	0,41
50	Langmuir	2,27	5,02	-	-	-	-	-	-	-
	Freundlich	-	-	2	2,7	-	-	-	-	-
	Redlich-Peterson	-	-	-	-	11,37	5,02	1	-	-
	Temkin	-	-	-	-	-	-	-	30,19	0,57

Sendo:

Qmax ($mg \cdot g^{-1}$): capacidade máxima de adsorção

KL ($\boldsymbol{L \cdot mg^{-1}}$)**:** constante de Langmuir, indica a afinidade entre adsorvente e adsorvato.

KF ($\boldsymbol{mg \cdot g^{-1}}$): constante de Freundlich, relacionada à capacidade de adsorção.

KR: constante de Redlich-Peterson, relacionada à capacidade de adsorção.

Kt ($L \cdot g^{-1}$)**:** constante de Temkin, relacionada ao equilíbrio de adsorção.

B: constante de Temkin, relacionada ao calor de adsorção.

Tabela 01: valores dos parâmetros obtidos isotermas.
Fonte: Autoria própria (2024).

Considerações Finais

O estudo alcançou seus principais objetivos, elaborando um filme de biopolímero composto por nanocelulose e quitosana para a adsorção de glifosatos. A quitosana, devido à sua estrutura molecular quimicamente semelhante à da celulose, apresenta resultados satisfatórios na adsorção de glifosato. Em relação à temperatura de operação, observou-se um melhor desempenho nas temperaturas mais baixas (20ºC e 30ºC), indicando que a adsorção de glifosato utilizando compósitos de nanocelulose-quitosana é mais eficiente em águas naturais do Brasil, que apresentam temperaturas relativamente mais baixas. Tal análise evidencia que o processo de adsorção de glifosato é exotérmico, já que a capacidade adsortiva diminui com o aumento da temperatura (NASCIMENTO *et al.,* 2020, PENHA; MOURA; PAZ, 2021).

Os dados estudados na Termodinâmica de adsorção permitem ainda o cálculo de outros parâmetros, que explicam características físico-químicas do sistema. Parâmetros como entropia de adsorção e valores de energia de Gibbs estão sendo calculados para a continuidade desse estudo.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), ao Departamento de Engenharia Ambiental da UNESP Sorocaba.

Referências Bibliográficas

AMARANTE JUNIOR, Ozelito Possidônio de; SANTOS, Teresa Cristina Rodrigues dos; BRITO, Natilene Mesquita; RIBEIRO, Maria Lúcia. Glifosato: propriedades, toxicidade, usos e legislação. Química Nova, v. 25, n. 4, p. 589–593, 2002.

BASSI, R.; PARSHER, S. O. Removal of selective metal ions from aqueous solutions using chitosan flakes. Separation Science and Technology, v. 35, n. 4, p. 547–560, 2000.

BATTISTI, R.; CAMPAGNOLO, M. A. Adsorption of glyphosate on biochar produced from forestry wastes: adsorption kinetics, isotherms, and thermodynamic studies. *Environmental Science and Pollution Research*, n. 7, p. 7393-7404, 2020.
BHASKARA, B. L.; NAGARAJA, P. Direct sensitive spectrophotometric determination of glyphosate by using ninhydrin as a chromogenic reagent in formulations and environmental water samples. *Helvetica Chimica Acta*, n. 11, p. 2686-2693, 2006.

CARLISE, S. M.; TREVORS, J. T. Glyphosate in the environment. Department of Environmental Biology, University of Guelph, 18 jun. 1987.

COONEY, D. O. Adsorption Design for Wastewater Treatment. Florida: CRC Press, 1999.

FOUST, A. S. et al. *Princípios das operações unitárias*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.
HERRERA, S. G. Remoção de íons cromo de soluções aquosas por biochar produzido de casca de café. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Sorocaba, 2021.

LISTYARINI, A. *et al.* Chitosan/nanocellulose with natural dye as a new developed colorimetric film for ammonia detection. AIP Conference Proceedings, v. 2023, p. 020028-1–020028-6, 2018.

MADDALON, A. et al. Direct effects of glyphosate on in vitro T helper cell differentiation and cytokine production. Frontiers in Immunology, v. 13, p. 854837, 10 mar. 2022.
MATIAS, C. A. Adsorção de glifosato por biochar derivado de casca de banana em solos agrícolas contaminados. 2024.

MOURA, Catarina et al. Quitina e quitosana produzidas a partir de resíduos de camarão e siri: avaliação do processo em escala piloto. Rio Grande - RS, 2006.

NAKAGAITO, A. N.; FUJIMURA, A.; SAKAI, T.; HAMA, Y.; YANO, H. Production of microfibrillated cellulose (MFC)-reinforced polylactic acid (PLA) nanocomposites from sheets obtained by a papermaking-like process. Composites Science and Technology, v. 69, p. 1293–1297, 2009.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira; CLECIUS, Ari Alves; VIDAL, Carla; MELO, Diego; RAULINO, Giselle Santiago Cabral. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Imprensa Universitária, Fortaleza, 2 ed. 256 p., 2020.

ORSI, B. L. Estudo cinético e de adsorção de íons metálicos em nanofibrilas de celulose. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Sorocaba, 2022.

PENHA, Ana Vitória Sousa; MOURA, Karine Oliveira, PAZ, Gizeuda Lavor de Lavor. Tratamento de Águas Residuais: uma Revisão sobre a Adsorção do Corante Preto de Amido 10B. Revista Virtual de Química, v. 13, n. 2, pp. 581-592, 2021.

POORNACHANDHRA, C. et al. Cellulose-based hydrogel for adsorptive removal of cationic dyes from aqueous solution: isotherms and kinetics. *RSC Advances*, v. 13, n. 8, p. 4757-4774, 2023.

RAHMI, L. J. S. Preparation of chitosan composite film reinforced with cellulose isolated from oil palm empty fruit bunch and application in cadmium ions removal from aqueous solutions. *Carbohydrate Polymers*, v. 170, p. 226-233, 2017.

REDLICH, O.; PETERSON, W. S. A useful adsorption isotherm. *Journal of Physical Chemistry*, v. 62, n. 2, p. 338-339, 1958.
RUTHVEN, D. M. *Principles of adsorption and adsorption processes*. New York: John Wiley & Sons, 1984.

SILVA, J. E. da et al. Adsorção de chumbo (II) em casca de coco modificada quimicamente. *Brazilian Journal of Chemistry*, v. 23, n. 1, p. 105-111, 2012.
ZOLA, R. S. Estudo de adsorção-dessorção: equação cinética e efeito memória. 2007. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2007.

GOVEIA, D. et al. Preparação de membranas de acetato de celulose organomodificadas para adsorção dos íons Cu(II), Cd (II), Mn(II) e Ni(II). Química Nova, v. 33, n. 5, 1135-1140, 2010.

PROCESSOS OXIDATIVOS PARA MODIFICAÇÃO DA ALUMINA: EFEITOS NA ADSORÇÃO DE ÍONS FLUORETO

1 Nátalie de Paula, 2 João Gabriel Munareto do Amaral, 3 Angélica Arndt Scalabrin, 4 Darliana Mello Souza, 5 Liliana Amaral Féris, 6 Sérgio Luiz Jahn, 7 Elvis Carissimi

1 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: eng.nataliedepaula@gmail.com; 2 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: eng.joaogabriel@hotmail.com; 3 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: angelicaascalabrin@gmail.com; 4 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: darliana.souza@ufsm.br; 5 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: liliana.feris@ufrgs.br; 6 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: sergiojahn@gmail.com; 7 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: elvis.carissimi@ufsm.br

Palavras-chave: Fluoreto; Alumina Ativada; Processos Oxidativos

Introdução

O íon fluoreto (F^-) desempenha um papel fundamental na mineralização dos ossos e dentes, sendo sua adição à água de abastecimento uma estratégia adotada em diversos países para promover a saúde bucal e reduzir a incidência de cáries na população (Zohoori; Duckworth, 2017). Entretanto, a ingestão prolongada de água com concentrações elevadas desse íon pode resultar em fluorose dental e óssea, além de outros efeitos prejudiciais à saúde (Han *et al.*, 2021). Por essa razão, a Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda um limite máximo de 1,5 mg/L de fluoreto na água destinada ao consumo humano (World Health Organization, 2022). Em diversos países (Ijumulana *et al.*, 2020; McMahon *et al.*, 2020; Podgorski *et al.*, 2018; Yousefi; Ghoochani; Mahvi, 2018) e em diferentes regiões do Brasil (Luiz; da Silva; Filho, 2018; Martins *et al.*, 2018; Sampaio *et al.*, 2010), as concentrações de íons F^- na água subterrânea excedem os limites recomendados. Considerando a ocorrência frequente de concentrações de íons F^- acima dos limites recomendados e seus impactos na saúde pública, diferentes métodos de remoção vêm sendo estudados, sendo a adsorção considerada uma das alternativas mais eficazes (Zhou *et al.*, 2018).

Adsorventes à base de alumínio são adequados para a remoção de íons fluoreto da água devido à alta afinidade (George; Pandit; Gupta, 2010; Kumari; Behera; Meikap, 2019) e à estabilidade química entre o íon fluoreto (F^-) e o alumínio (Al) (Alhassan *et al.*, 2020). De acordo com a teoria ácido-base duro-mole (HSAB) de Pearson, o alumínio na forma Al^{3+}, presente na estrutura de materiais sólidos, apresenta comportamento de ácido de Lewis com alta afinidade por F^-, que, em solução, apresenta comportamento de base de Lewis. Assim, materiais como hidróxido de alumínio, óxido de alumínio e outros à base de alumínio vêm sendo estudados como adsorventes para a desfluoretação da água (Chen *et al.*, 2022). Devido ao seu preparo simples, baixo custo e forte afinidade por íons F^-, a alumina ativada (AA) é atualmente um dos adsorventes mais aplicados na desfluoretação de águas (Gai; Deng, 2021; He *et al.*, 2020; Jagtap *et al.*, 2012).

No entanto, a capacidade de adsorção da AA depende do pH do meio, que deve ser inferior a 6 para atingir altos níveis de remoção (Ingle *et al.*, 2014). Considerando que o pH das águas subterrâneas varia entre 5,5 e 8,5 (Feitosa *et al.*, 2008), sua aplicação é limitada devido ao baixo desempenho nessas condições. Além disso, a AA requer longos tempos de contato para atingir o equilíbrio de adsorção (Huang *et al.*, 2020). Muitos estudos têm buscado melhorar a eficiência da alumina e superar suas limitações por meio de modificações químicas e/ou físicas em sua superfície. Entretanto, a maioria dos novos materiais desenvolvidos ainda apresenta dependência do pH e/ou exige longos tempos de contato, além de utilizar reagentes de alto custo, como os óxidos de terras raras (He *et al.*, 2019). Entre as alternativas avaliadas, destaca-se o uso de processos oxidativos, como a ozonização (de Paula *et al.*, 2023b) e a reação de Fenton (de Paula *et al.*, 2026), que vêm demonstrando efeito positivo no desempenho de desfluoretação da alumina. O objetivo deste trabalho é comparar os efeitos da ozonização e da reação de Fenton na modificação da alumina ativada, avaliando suas influências nas propriedades físico-químicas e no desempenho de adsorção de F^- da água.

Materiais e Métodos

Preparo dos materiais

O preparo da alumina ativada ozonizada (AAO) foi realizado utilizando um gerador de ozônio (Z100, Ozonebras), com produção estimada de 0,4 ± 0,01 g O_3/h, no qual 1,0 g de AA foi submetido à ozonização em 100 mL de água destilada em pH 7, sob agitação constante de 150 rpm, à temperatura ambiente (25 °C), por 90 minutos. Após a ozonização, o material foi seco em estufa a 105 °C por 12 horas (de Paula *et al.*, 2023a). Já a alumina ativada modificada via reação de Fenton (AAFen) foi preparada em duas etapas. Primeiramente, íons de ferro foram imobilizados na superfície da alumina na forma de óxidos, resultando em um compósito de ferro e alumina (Fe/AA), que posteriormente foi tratado por 90 minutos com peróxido de hidrogênio (1% H_2O_2) (de Paula *et al.*, 2026).

Ensaios de adsorção em batelada

As condições experimentais dos ensaios de adsorção, incluindo pH da solução, dosagem do adsorvente, concentração inicial de F^-, tempo de contato, temperatura e agitação, foram definidas com base nas melhores condições de uso de cada material, estabelecidas em estudos anteriores (de Paula *et al.*, 2023b, 2026), e estão descritas na Tabela 01.

Condições experimentais	AAFen	AAO
Concentração inicial de F^- (mg/L)	5	5
pH	8,5	8,0
Dosagem de adsorvente (g/L)	3,9	4,35
Tempo de contato (min)	30	60
Temperatura (ºC)	25	25
Agitação (rpm)	150	150

Tabela 01: Condições dos ensaios de adsorção utilizando AAO e AAFen.

A fim de comparar os efeitos dos processos oxidativos sobre a eficiência de adsorção da AA, foram realizados experimentos com os materiais modificados (AAO e AAFen) e com o material base (AA). Os experimentos foram conduzidos em um banho-maria metabólico com controle de temperatura e agitação orbital tipo Dubnoff (Marconi, modelo MA095) utilizando frascos de polipropileno. Ao final de cada experimento, foram determinadas as concentrações residuais de íons F^- nas soluções e, por meio da Equação (01), a eficiência de adsorção de cada material.

$$Eficiência\ de\ Adsorção\ (\%) = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0}\right) 100 \qquad (01)$$

Onde: C_0 é a concentração inicial (mg/L) e C_e é a concentração de equilíbrio (mg/L).

Determinação de íons F^-

A determinação da concentração de íons fluoreto foi realizada por cromatografia iônica (930 Compact IC Flex, Metrohm), equipada com coluna de troca iônica (Metrosep A supp 5-150/4.0). As amostras foram previamente filtradas em filtros de seringa (25 mm de diâmetro, 0,22 µm de tamanho de poro). O eluente utilizado era composto por bicarbonato de sódio e carbonato de sódio ($NaHCO_3$ 20 mM e Na_2CO_3 64 mM). As curvas de calibração foram preparadas a partir de uma solução padrão de multiânions (Specsol Quimlab).

Resultados e Discussão

Ao comparar as concentrações residuais de F^- (mg/L) e as eficiências de adsorção (%) (Figura 1), tanto a AAFen quanto a AAO apresentaram desempenho superior ao da AA nas condições testadas. A AAO atingiu eficiência de remoção de 94,84%, contra 26,83% da AA, enquanto a AAFen removeu 84,07%, contra 23,44% da AA. O uso da AA nas mesmas condições testadas para a AAO e a AAFen resultou em concentrações residuais de F^- de 3,23 mg/L e 3,86 mg/L, respectivamente. Esses valores excedem o limite máximo de 1,5 mg/L recomendado pela OMS para água potável. Em contraste, a AAO reduziu a concentração de F^- de aproximadamente 5 mg/L para 0,25 mg/L, e a AAFen reduziu de aproximadamente 5 mg/L para 0,78 mg/L. Embora ambos os materiais modificados tenham atingido concentrações residuais de F^- abaixo do limite da OMS, a AAO apresentou desempenho superior ao da AAFen.

Considerações Finais

Os resultados obtidos demonstram que a modificação da AA utilizando processos oxidativos (ozonização e reação de Fenton) resulta em melhorias no desempenho de adsorção de íons F^- em relação ao material base. Ambos os materiais modificados (AAO e AAFen) atingiram concentrações residuais de F^- abaixo do limite máximo recomendado pela OMS (1,5 mg/L), ao contrário da AA, que não alcançou esse padrão nas condições testadas. A AAO apresentou desempenho superior ao da AAFen, com eficiência de remoção de 94,84% contra 84,07%, o que sugere que a ozonização é o processo oxidativo mais eficiente para a modificação superficial da alumina ativada visando à desfluoretação da água. Adicionalmente, esses resultados foram alcançados em condições de pH básico e de concentração inicial de F^- similares às encontradas em águas subterrâneas, o que reforça a aplicabilidade prática de ambos os materiais no tratamento de água para consumo humano. Além disso, a AAO alcança o equilíbrio de adsorção em 60 minutos e a AAFen em 30 minutos, superando uma limitação do material base (AA) que necessita de até 300 minutos. Como perspectivas futuras, recomendam-se estudos voltados ao escalonamento do processo, visando à sua aplicação em sistemas de tratamento de água em escala real.

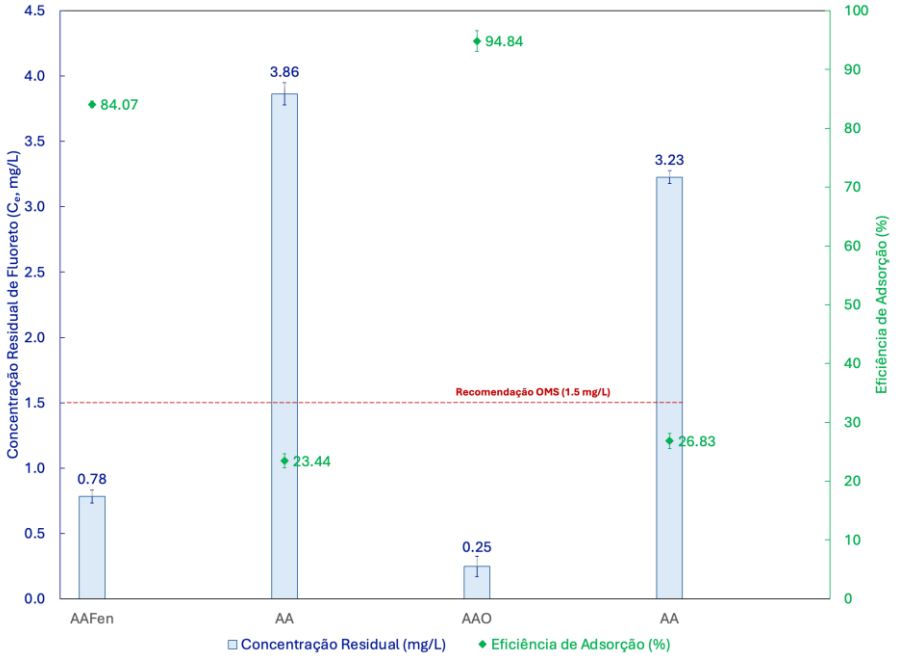


Figura 01: Concentração residual de F^- (mg/L) e eficiência de adsorção (%) da AAFen, AAO e AA nas condições experimentais descritas na Tabela 01.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) e à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Referências Bibliográficas

ALHASSAN, S. I. *et al.* Fluoride removal from water using alumina and aluminum-based composites: A comprehensive review of progress. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, [*s. l.*], vol. 51, nº 18, p. 2051–2085, 2020.

CHEN, J. *et al.* Removal of fluoride from water using aluminum hydroxide-loaded zeolite synthesized from coal fly ash. **Journal of Hazardous Materials**, [*s. l.*], vol. 421, 2022.

DE PAULA, N. *et al.* A non-conventional application of the Fenton reaction: Surface modification of alumina for faster and more efficient fluoride adsorption over multiple cycles. **Journal of Water Process Engineering**, [*s. l.*], vol. 87, 2026.

DE PAULA, N. *et al.* Application of ozone to enhance the defluoridation property of activated alumina: A novel approach. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [*s. l.*], vol. 11, nº 5, p. 110384, 2023a. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213343723011235.

DE PAULA, N. *et al.* Ozone-treated activated alumina as an alternative adsorbent to remove fluoride from water: Conventional and Bayesian approaches to evaluate the isotherms, kinetics, and thermodynamics. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [*s. l.*], vol. 11, nº 6, p. 111403, 2023b.

FEITOSA, F. A. C. *et al.* **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3ª Ediçãoed. Rio de Janeiro: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2008. vol. 11

GAI, W. Z.; DENG, Z. Y. **A comprehensive review of adsorbents for fluoride removal from water: Performance, water quality assessment and mechanism**. [*S. l.*]: Royal Society of Chemistry, 2021.

GEORGE, S.; PANDIT, P.; GUPTA, A. B. Residual aluminium in water defluoridated using activated alumina adsorption – Modeling and simulation studies. **Water Research**, [*s. l.*], vol. 44, nº 10, p. 3055–3064, 2010.

HAN, J. *et al.* Chemical Aspects of Human and Environmental Overload with Fluorine. **Chemical Reviews**, [*s. l.*], vol. 121, nº 8, p. 4678–4742, 2021.

HE, Y. *et al.* Enhanced fluoride removal from water by rare earth (La and Ce) modified alumina: Adsorption isotherms, kinetics, thermodynamics and mechanism. **Science of the Total Environment**, [*s. l.*], vol. 688, p. 184–198, 2019.

HE, J. *et al.* Review of fluoride removal from water environment by adsorption. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [*s. l.*], vol. 8, nº 6, 2020.

HUANG, L. *et al.* Enhanced surface hydroxyl groups by using hydrogen peroxide on hollow tubular alumina for removing fluoride. **Microporous and Mesoporous Materials**, [*s. l.*], vol. 297, p. 110051, 2020.

IJUMULANA, J. *et al.* Spatial analysis and GIS mapping of regional hotspots and potential health risk of fluoride concentrations in groundwater of northern Tanzania. **Science of the Total Environment**, [*s. l.*], vol. 735, p. 139584, 2020.

INGLE, N. A. *et al.* Defluoridation techniques: Which one to choose. **Journal of Health Research and Reviews**, [*s. l.*], vol. 1, nº 1, p. 1–4, 2014.

JAGTAP, S. *et al.* Fluoride in Drinking Water and Defluoridation of Water. **Chemical Reviews**, [*s. l.*], vol. 112, nº 4, p. 2454–2466, 2012.

KUMARI, U.; BEHERA, S. K.; MEIKAP, B. C. A novel acid modified alumina adsorbent with enhanced defluoridation property: Kinetics, isotherm study and applicability on industrial wastewater. **Journal of Hazardous Materials**, [*s. l.*], vol. 365, p. 868–882, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.11.064.

LUIZ, T. B. P.; DA SILVA, J. L. S.; FILHO, L. L. V. D. Hydrochemical investigation of fluoride high contents in groundwaters in portion of guarani aquifer system, southern Brazil. **Anuario do Instituto de Geociencias**, [*s. l.*], vol. 41, nº 1, p. 52–65, 2018.

MARTINS, V. T. de S. *et al.* Who to blame for groundwater fluoride anomaly in São Paulo, Brazil? Hydrogeochemistry and isotopic evidence. **Applied Geochemistry**, [*s. l.*], vol. 90, p. 25–38, 2018.

MCMAHON, P. B. *et al.* Fluoride occurrence in United States groundwater. **Science of the Total Environment**, [*s. l.*], vol. 732, p. 139217, 2020.

PODGORSKI, J. E. *et al.* Prediction Modeling and Mapping of Groundwater Fluoride Contamination throughout India. **Environmental Science and Technology**, [*s. l.*], vol. 52, nº 17, p. 9889–9898, 2018.

SAMPAIO, F. C. *et al.* Natural Fluoride Levels in the Drinking Water, Water Fluoridation and Estimated Risk of Dental Fluorosis in a Tropical Region of Brazil. **Oral Health and Preventive Dentistry**, [*s. l.*], vol. 8, nº 1, p. 71–75, 2010.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda**. [*S. l.*]: [*s. d.*], 2022.

YOUSEFI, M.; GHOOCHANI, M.; MAHVI, A. H. Health risk assessment to fluoride in drinking water of rural residents living in the Poldasht city, Northwest of Iran. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [*s. l.*], vol. 148, nº October 2017, p. 426–430, 2018.

ZHOU, J. *et al.* Highly selective and efficient removal of fluoride from ground water by layered Al-Zr-La Tri-metal hydroxide. **Applied Surface Science**, [*s. l.*], vol. 435, p. 920–927, 2018.

ZOHOORI, F. V.; DUCKWORTH, R. M. Fluoride: Intake and Metabolism, Therapeutic and Toxicological Consequences. *In*: MOLECULAR, GENETIC, AND NUTRITIONAL ASPECTS OF MAJOR AND TRACE MINERALS. [*S. l.*]: Elsevier Inc., 2017. p. 539–550.

INFLUÊNCIA HIDRODINÂMICA DO RIO CAMBORIÚ NAS ARRIBADAS EM BALNEÁRIO CAMBORIÚ, SC: MODELAGEM NUMÉRICA PRELIMINAR

1 João Victor Fagundes Silveira, 2 Cristina Ono Horita, 3 Mauro Michelena Andrade
1 UNIVALI, e-mail: joaovfsilveira@edu.univali.br; 2 UNIVALI, e-mail: cristina.horita@univali.br; 3 UNIVALI, e-mail: michelena@univali.br

Palavras-chave: Modelagem numérica; Delft3D; Arribadas.

Introdução

O processo de Arribadas em Balneário Camboriú é um fenômeno costeiro natural e complexo, caracterizado pelo acúmulo de algas marinhas que ocorrem por todo o ano no ambiente, porém a frequência desse fenômeno e a quantidade dessas algas aumentam substancialmente, principalmente nas estações de primavera e verão, o que tem chamado a atenção de turistas devido ao mau cheiro e incômodo aos banhistas, mas que não tem apresentado qualquer dano à saúde pública. O estímulo para o seu crescimento é o excesso de nutrientes, temperatura, intensidade de luz e sistema de circulação da água da praia (TOCCI et al., 2022).

Nesse contexto, a presente pesquisa compreendeu a área do Rio Camboriú e da enseada da Praia Central de Balneário Camboriú como locais de estudo, buscando analisar, por meio de modelos numéricos, a influência do afluente nos processos das arribadas na enseada. Utilizando a ferramenta de modelagem Delft3D, esta pesquisa visou compreender se as características do Rio Camboriú influenciam na frequência e/ou potencializam o processo das arribadas na costa da cidade.

Material e Métodos

O programa Delft3D, é um sistema de modelagem Open Source que oferece condições de elaborar modelos numéricos em duas e/ou três dimensões para simulações em ambientes aquáticos. Para realizar tais tarefas os módulos em questão utilizam ferramentas de pré-processamento e pós-processamento para auxiliar nos procedimentos de implementação do modelo e visualização dos resultados.

As etapas de pré-processamento consistiram na seleção e digitalização da linha de costa do domínio da modelagem utilizando o programa computacional Google Earth Pro; geração da grade numérica; interpolação da batimetria para os nós da grade numérica. As etapas foram realizadas no programa Delftdashboard. Neste mesmo programa ainda foram realizadas algumas etapas de implementação do modelo como a definição dos contornos abertos, imposição das condições de contorno para os contornos abertos e estabelecimento dos pontos de monitoramento para gravação dos resultados temporais.

Para o processamento, primeiramente foi gerada a circulação hidrodinâmica na área de estudo tendo como forçantes a maré, o vento e as ondas de gravidade para depois modelar a qualidade de água. O módulo FLOW foi executado em conjunto com o módulo WAVE. O FLOW gerou a circulação hidrodinâmica bidimensional (nível de água e de velocidade de correntes) e o WAVE simula a propagação de ondas de gravidade no domínio da modelagem.

A condição de contorno imposta ao modelo de circulação foram as constantes harmônicas geradas pelo modelo global TPXO disponível dentro do DelftDashboard. Já para o WAVE foram impostos dados de onda referente as ondas mais frequentes na área de estudo. Os dados de ondas foram obtidos a partir de resultados com frequência de 3h da reanálise do modelo global de ondas do Copernicus Marine Service para o período de 1980 a 2020, sendo selecionados três casos mais frequentes.

Quadro 1 - Casos de ondas mais frequentes selecionados para a execução dos modelos

Caso	Dir (°)	Hs (m)	Tp (s)	%
1	75	1.1	5.6	12.3
2	90	1.0	5.4	15.1
3	105	1.1	5.5	15.8

Fonte – Os autores

O módulo WAQ, que recebe como dado de entrada a circulação na área de estudo gerada pelo FLOW, foi utilizado para modelar parâmetros de qualidade de água, como salinidade, oxigênio dissolvido e demanda bioquímica de oxigênio, a fim de verificar a área de influência da dispersão do Rio Camboriú.

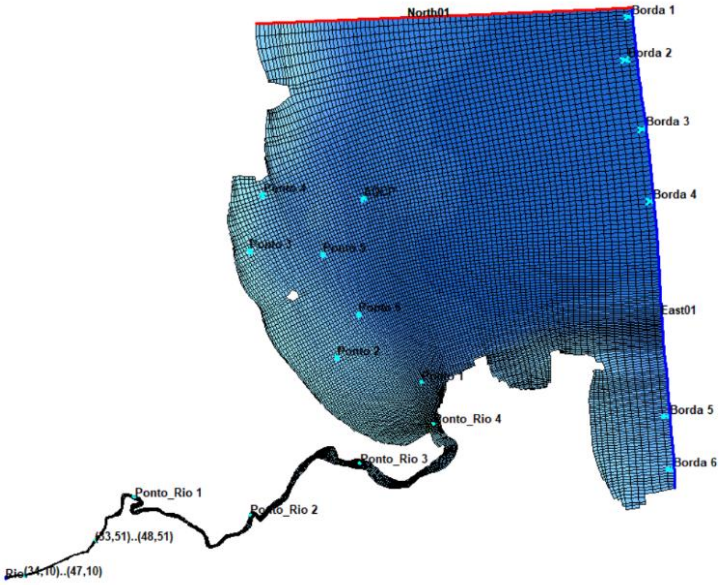


Figura 1 - Pontos de Monitoramento na Área de estudo do Rio Camboriú e Enseada da Praia Central de Balneário Camboriú, SC
Fonte: Os autores

Foram estabelecidos valores pré-definidos para o processamento na área de estudo. Os valores de salinidade inicial utilizados para a modelagem foram de 30 mg/L para toda área modelada da enseada e para os valores à montante no Rio Camboriú, foi usado o valor de 10 mg/L.

Além disso, foram modelados Oxigênio Dissolvido – OD e Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO, onde foram utilizados valores iniciais para a área de enseada de 9 mg/L (OD) e 2 mg/L (DBO), e para Rio Camboriú foram usados valores para OD de 7 mg/L, e para DBO de 25 mg/L.

Tendo em vista que o Rio Camboriú recebe o aporte referente ao ponto de lançamento de efluentes sanitários da Estação de Tratamento da Empresa Municipal de Águas e Saneamento de Balneário Camboriú – EMASA, foi estabelecido um ponto com valores iniciais para OD de 2 mg/L, e para DBO de 100 mg/L.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos são apresentados através de gráficos gerados de salinidade, Oxigênio Dissolvido e Demanda Bioquímica de Oxigênio pelo módulo QUICKPLOT. Inicialmente foi realizada a validação, através de comparações quantitativas dos resultados da modelagem hidrodinâmica com malhas regulares com células quadradas de 100 metros, e valores obtidos através de dados do marégrafo localizado na Praia de Laranjeiras, cedidos pela EPAGRI.

Através dessa comparação foram obtidos valores de MAE (Mean Absolute Error) na ordem de 10-2 e de RMSE (Root Mean Square Error) na ordem de 10-3, o que demonstra que o processo de modelagem se encontra próximo da realidade (WILLIAMS; ESTEVES, 2017).

Os modelos foram executados para o período entre 25 de março de 2022 a 10 de abril de 2022, período posterior ao engordamento da Praia Central de Balneário Camboriú, SC. Desses casos, executou-se a modelagem de qualidade de água apenas para o Caso 1.

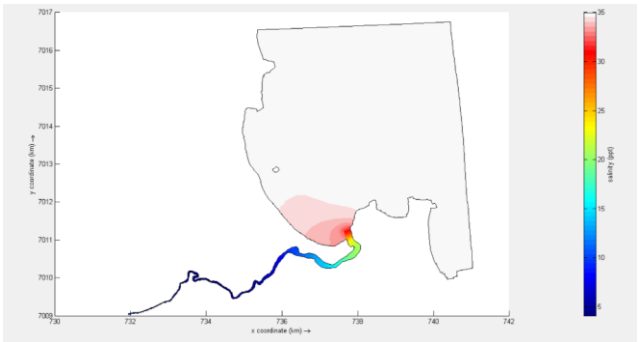


Figura 2 - Dispersão do parâmetro da salinidade na área de estudo - maré quadratura.
Fonte: Os autores

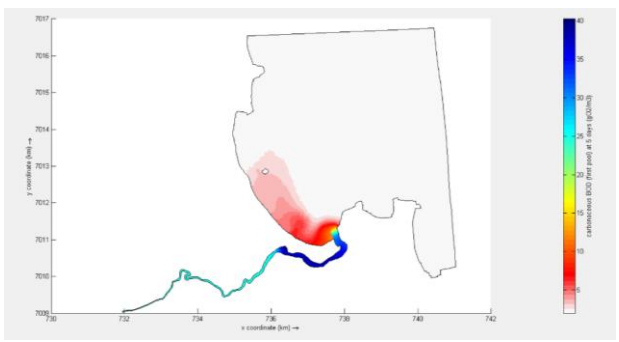


Figura 3 - Dispersão de Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO na área de estudo - maré quadratura.
Fonte: Os autores

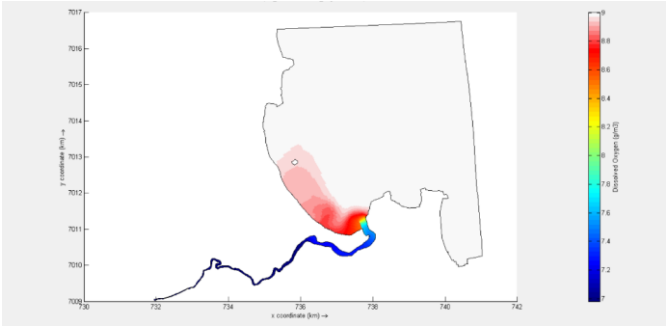


Figura 4 - Dispersão de Oxigênio Dissolvido na área de estudo - maré quadratura.
Fonte: Os autores

Como é possível perceber nos resultados apresentados, a dispersão dos parâmetros estudados atinge a enseada da Praia Central de Balneário Camboriú, SC. Com essas informações não é possível verificar, porém, se há influência direta dos componentes do Rio Camboriú nos processos de arribadas que acontecem na região.

Contudo, com esses resultados preliminares, aponta-se que há a modificação mesmo que baixa de parâmetros importantes da enseada, como OD e DBO.

Considerações Finais

Ao longo deste estudo, pôde-se perceber através de resultados obtidos que há indicativos da influência de parâmetros bioquímicos do Rio Camboriú no processo de arribadas que ocorre na enseada da Praia Central de Balneário Camboriú, SC, haja vista que a dispersão dos parâmetros de qualidade de água chega à enseada da região, influenciando nas variáveis da área de estudo.

Salienta-se que a pesquisa se limitou a resultados preliminares devido às dificuldades encontradas durante a execução dos modelos de qualidade de água que permitia a inclusão de diversas variáveis distintas nos parâmetros escolhidos de Salinidade, Oxigênio Dissolvido e Demanda Bioquímica de Oxigênio.

Por isso, seria de extrema importância um período maior de pesquisa para a execução de mais cenários específicos, além da inclusão de novos parâmetros, como nutrientes (fósforo e nitrogênio), que possibilitariam a verificação de influência direta do Rio Camboriú e seus componentes bioquímicos na enseada da cidade.

Agradecimentos

- Ao CNPq/FAPESC, pelo apoio financeiro à pesquisa.
- Ao Programa de Bolsas Universitárias de Santa Catarina – UNIEDU, pelo incentivo à formação acadêmica.
- Ao Laboratório de Oceanografia Física e Química da UNIVALI, pelo suporte técnico e científico.
- À Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – EPAGRI, pelo fornecimento dos dados utilizados.

Este trabalho contou com apoio financeiro do projeto de pesquisa “Efeitos da hidrodinâmica na variabilidade da qualidade da água e nas ocorrências de arribadas de microalgas na praia central de Balneário Camboriú, SC”, aprovado no Edital FAPESC Nº 27/2021.

Referências Bibliográficas

TOCCI, Bianca R. C.; VIEIRA, Leandro M.; TAMANAHA, Márcio S.; RESGALLA JUNIOR, Charrid. Stranding events of drift organisms (Arribadas) in southern Brazil and the spread of invasive bryozoan in South America. Marine Pollution Bulletin, [S.l.], v. 184, p. 114120, 2022.

WILLIAMS, Jon J.; ESTEVES, Luciana S. Guidance on setup, calibration, and validation of hydrodynamic, wave, and sediment models for shelf seas and estuaries. Advances in Civil Engineering, [S. l.], v. 2017, Art. ID 5251902, p. 1–25, 2017.

QUALIDADE DA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO E IMPLICAÇÕES À SAÚDE PÚBLICA: ANÁLISE DO SISTEMA SUL DE CUIABÁ (MT) A PARTIR DE DADOS DO SISAGUA

1Beatriz Pinho de Almeida, 2Amanda Alcaide Francisco Fukumoto, 3Alana Francischini Ferreira, 4Maria Francisca Alves dos Santos Souza, 5Sueny Andrade Batista

1 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: beatriz.almeida@sou.ufmt.br; 2 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: amandaalcaide_f@yahoo.com.br; 3 Universidade Federal de Mato grosso, e-mail: alana.ferreira@sou.ufmt.br; 4 Universidade Federal de Mato Grosso, e-mail: maria.souza23@sou.ufmt.br; 5 Universidade Federal de Goiás, e-mail: subatistanutricionista@gmail.com

Palavras-chave: Potabilidade da água; monitoramento da qualidade da água; Sisagua.

Introdução

O acesso regular à água potável e segura é um direito humano assegurado na Constituição Federal, sendo indispensável à manutenção da vida, à promoção da saúde pública e ao desenvolvimento econômico (Brasil, 1988). Além disso, exerce impacto direto no controle e na prevenção de doenças. Nesse sentido, a água destinada ao abastecimento público deve atender aos padrões de potabilidade vigentes. No contexto das Doenças de Veiculação Hídrica (DVI), a potabilidade da água é fundamental para assegurar condições sanitárias adequadas e prevenir a exposição da população a riscos associados (Instituto Trata Brasil, 2025). Dados relacionados a esse grupo de doenças no cenário nacional mostram o registro de 336.165 internações e 4.877 óbitos; em Cuiabá, foram registrados 253 internações e dois óbitos (Painel do Saneamento, 2024).

No Brasil, de acordo com o Instituto Trata Brasil, com base em dados do Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA), cerca de 15,9% da população, o que corresponde a 32,8 milhões de brasileiros, não possuíam acesso à água tratada em 2024. Em Cuiabá, esse contingente corresponde a 11.678 pessoas, representando a parcela de 1,7% da população local. Frente a essa realidade, a etapa de desinfecção presente no tratamento da água assume papel central na proteção da saúde pública, uma vez que promove a inativação de microrganismos patogênicos. Adicionalmente, a manutenção de um teor residual de desinfetante ao longo da rede de distribuição evita a recontaminação da água, assegurando sua qualidade até o ponto de consumo e reduzindo o risco de ocorrência de DVI (Vizioli; Montagner, 2023).

Para garantir a qualidade da água destinada ao abastecimento público no Brasil, a Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2021) estabelece os padrões de potabilidade e os procedimentos de controle e vigilância. O monitoramento é realizado por meio de sistemas de informação, especialmente o Sistema de Informação da Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (SISAGUA), que consolida dados de parâmetros físico-químicos e microbiológicos provenientes dos responsáveis pelo abastecimento. De acordo com o Ministério da Saúde, esses dados permitem a avaliação da conformidade da água distribuída à população frente aos padrões de potabilidade estabelecidos pela portaria e são utilizadas no gerenciamento de riscos à saúde associados ao abastecimento de água no país (Brasil, 2026).

Apesar da disponibilidade de dados provenientes do SISAGUA, ainda são limitadas as análises que exploram a qualidade da água em sistemas de abastecimento específicos, especialmente aqueles de implantação recente. No município de Cuiabá (MT), o Sistema Sul destaca-se por ser um dos principais sistemas de abastecimento e por possuir a Estação de Tratamento de Água mais recente, em operação desde 2020, atendendo 86 bairros e parcela significativa da população que corresponde a 155 mil pessoas (Mato Grosso, 2021), o que reforça a necessidade de avaliações direcionadas quanto à qualidade da água distribuída. Assim, torna-se relevante investigar se os parâmetros físico-químicos e os microbiológicos atendem aos padrões estabelecidos, considerando a importância desse sistema para a segurança sanitária local. Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar a qualidade da água para consumo humano no Sistema Sul do município de Cuiabá (MT), a partir de dados secundários disponibilizados pelo SISAGUA, com foco na análise de parâmetros físico-químicos e microbiológicos, visando verificar sua conformidade com a legislação vigente e discutir possíveis implicações à saúde da população.

Material e Métodos

O estudo caracteriza-se como uma análise descritiva retrospectiva, de abordagem quantitativa, utilizando dados secundários de qualidade da água para consumo humano provenientes do SISAGUA, referentes ao Sistema Sul de abastecimento do município de Cuiabá, Mato Grosso. Os dados abrangem o período de janeiro a dezembro de 2025.

A estruturação do estudo foi realizada em duas etapas principais de análise. A primeira etapa consistiu na avaliação de parâmetros físico-químicos e microbiológicos considerados básicos no monitoramento da qualidade da água, sendo eles: turbidez, cor aparente, fluoreto, pH, residual de desinfetante, coliformes totais e *Escherichia coli (E. coli),* a partir de dados fornecidos pela concessionária que presta o serviço de abastecimento de água a população cuiabana. A segunda etapa consistiu na análise de parâmetros microbiológicos e organolépticos da água com base em amostras provenientes do monitoramento da vigilância da qualidade da água para consumo humano, realizado e analisado pelo Sistema Único de Saúde (SUS).

Na primeira etapa, a coleta dos dados foi realizada por meio dos painéis de informação do SISAGUA (denominado Painéis Vigiagua), na seção de controle mensal, no subtópico informações detalhadas por tabela, onde é possível baixar em

planilha o compilado dos dados. Foram aplicados os seguintes filtros: ano de 2025, unidade federativa "Mato Grosso", município de Cuiabá, instituição responsável (Águas Cuiabá S.A.), tipo de abastecimento (Sistema de Abastecimento de Água – SAA) e identificação do sistema (Sistema Sul). A unidade de análise correspondeu às amostras coletadas na rede de distribuição. Para cada parâmetro, foram contabilizados o número total de análises realizadas ao longo do ano de 2025 e a ocorrência de resultados em não conformidade com os padrões estabelecidos pela legislação vigente.

Na segunda etapa, a coleta dos dados também foi realizada por meio dos Painéis VIGIAGUA, na seção de vigilância, especificamente na área de parâmetros básicos, que reúne as amostras analisadas no âmbito do SUS. Foram aplicados filtros semelhantes aos utilizados na etapa anterior, considerando: ano de 2025, unidade federativa "Mato Grosso", município de Cuiabá e tipo de abastecimento por Sistema de Abastecimento de Água (SAA), com seleção do Sistema Sul. A análise foi dividida em dois grupos de parâmetros: microbiológicos, incluindo *E. coli* e coliformes totais; e organolépticos, abrangendo turbidez, cor aparente, cloro residual livre, cloro residual combinado, dióxido de cloro e fluoreto. Destaca-se que os dados de análise não estavam disponíveis para todos os meses de 2025, sendo consideradas apenas as campanhas com registros disponíveis. Para cada parâmetro, repetiu-se o processo anterior de contabilizar as amostras analisadas e verificar a ocorrência de não conformidades em relação aos padrões estabelecidos pela legislação vigente.

Ressalta-se que a plataforma SISAGUA não disponibiliza os resultados numéricos individuais dos parâmetros analisados, apresentando apenas o quantitativo de amostras avaliadas e sua classificação quanto à conformidade com os padrões estabelecidos, indicando a quantidade de resultados fora do padrão, conforme apresentado na seção de resultados. Assim, não é possível identificar valores específicos obtidos em cada análise (por exemplo, valores de pH ou turbidez por amostra), sendo a avaliação baseada na frequência de atendimento e não atendimento aos limites legais.

Resultados e Discussão

Os resultados evidenciam uma divergência significativa entre os dados de controle operacional e os dados da vigilância em saúde, sendo observada alta conformidade no monitoramento realizado pela concessionária e maior ocorrência de não conformidades nos dados da vigilância.

Conforme apresentado na Tabela 1, parâmetros como turbidez, cor aparente, pH, residual de desinfetante, coliformes totais e *E. coli* apresentaram valores dentro dos limites estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2021). Para o parâmetro fluoreto, foi registrada apenas uma amostra fora do padrão dentre um total de 1.368 análises realizadas ao longo de todo o ano de 2025, indicando baixa frequência de não conformidade. Esses resultados sugerem que, sob a perspectiva dos dados fornecidos pelo sistema de abastecimento, a qualidade da água distribuída à população atende, em sua maioria, aos padrões estabelecidos pela legislação vigente. Entretanto, destaca-se como limitação do presente estudo a ausência de acesso aos valores brutos dos parâmetros analisados, essa restrição, impede uma avaliação mais detalhada das variações dos parâmetros e da proximidade dos valores em relação aos limites estabelecidos pela legislação.

Parâmetros Básicos provenientes da Concessionária - Sistema Sul - Cuiabá/MT - 2025

Ponto de Monitoramento	Parâmetro	Nº total de amostras	Nº de amostras inconformes	VMP
Sistema de Distribuição	Turbidez (uT)	1.401	0 (0%)	5 uT
Sistema de Distribuição	Cor (uH)	1.395	0 (0%)	15 uH
Sistema de Distribuição	pH	1.401	0 (0%)	6 - 9,5
Sistema de Distribuição	Residual de Desinfetante (mg/L)	1.401	0 (0%)	0,2 - 5,0 mg/L
Sistema de Distribuição	Fluoreto (mg/L)	1.368	1 (0,07%)	1,5 mg/L
Sistema de Distribuição	Coliformes totais	750	0 (0%)	Ausente em 100 ml
Sistema de Distribuição	*E. coli*	750	0 (0%)	Ausente em 100 ml

*Valor de Referência permitido pela Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2021).

Tabela 1: Parâmetros básicos do sistema sul de abastecimento.
Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados do Sisagua (2025)

A Tabela 2 apresenta os resultados das análises realizadas no âmbito da vigilância da qualidade da água para consumo humano, vinculada ao SUS. Para o padrão microbiológico foram registradas 32 amostras não conformes dentre um total de 77 análises, o que representa uma inconformidade de 41,6%. Para padrão organoléptico, observaram-se 23 amostras fora do valor de referência permitido em um total de 78 análises, representando 29,5% de inconformidade.

Parâmetros Básicos analisadas pelo SUS - Sistema Sul - Cuiabá/MT - 2025			
Padrão	**Parâmetros**	**Nº Total de Amostras**	**Nº de amostras inconformes**
Microbiológico	*E. coli* e Coliformes Totais	77	32 (41,6%)
Organoléptico	Turbidez, Cor, Cloro Residual Livre, Dióxido de Cloro, Cloro Residual Combinado e Fluoreto	78	23 (29,5%)

Tabela 2: Parâmetros básicos do sistema sul de abastecimento.
Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados do Sisagua (2025)

Apesar de ambos os conjuntos de dados, apresentados nas Tabela 1 e 2, serem provenientes do mesmo sistema, fica evidente a diferença considerável entre os resultados obtidos a partir das duas vertentes de monitoramento. Essa diferença pode ser explicada pelas distintas abordagens adotadas. De acordo com a Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2021), o controle operacional, realizado pela concessionária, tem como foco a eficiência do tratamento. Por outro lado, a vigilância em saúde prioriza o ponto de consumo onde a água já percorreu toda a rede de distribuição, estando mais suscetível a alterações.

A atuação do SUS como vigilante da qualidade da água para consumo humano é essencial para proteger a saúde da população, atuando em perspectiva de risco sanitário e não apenas como prestador de serviços clínicos (Sintaema, 2024). Nesse contexto, a análise realizada pelo SUS adquire ainda maior relevância por diferir dos resultados médios divulgados pela concessionária, permitindo a identificação de não conformidades que poderiam ser subestimadas em análises agregadas. Observou-se a ocorrência de não conformidades de 29,5% e 41,5% no conjunto de parâmetros avaliados, percentuais expressivos que podem comprometer a qualidade da água fornecida à população. Destaca-se que as análises realizadas pelo SUS ocorreram de forma pontual ao longo do ano, concentrando-se nos meses de janeiro, fevereiro, março e junho de 2025, não havendo registros de análises nos demais meses. Essa descontinuidade temporal pode limitar a representatividade dos dados, uma vez que não contempla possíveis variações sazonais na qualidade da água. Ainda assim, os resultados obtidos evidenciam a ocorrência de inconformidades relevantes.

Nesse contexto, a presença de inconformidades, sobretudo em parâmetros microbiológicos, pode representar riscos à saúde pública, uma vez que está associada à possibilidade de contaminação por microrganismos patogênicos. A ingestão de água contaminada pode resultar na ocorrência de DVI, como gastroenterites, hepatite A e infecções por protozoários, configurando um relevante problema de saúde coletiva. Além disso, a vulnerabilidade de determinados grupos populacionais, como crianças, idosos e indivíduos imunocomprometidos, torna esses riscos ainda mais relevantes, evidenciando a necessidade de garantir a qualidade da água até o ponto de consumo (Instituto Trata Brasil, 2025).

Além disso, falhas na rede de distribuição, como variações de pressão, intermitência no abastecimento e condições inadequadas das tubulações, podem favorecer a entrada de contaminantes e comprometer a qualidade microbiológica da água (Santos et al., 2023). Essas inconformidades podem estar associadas a falhas na manutenção da rede, intermitência no abastecimento e possíveis eventos de intrusão. Logo, a atuação da vigilância em saúde torna -se essencial para a identificação de riscos que podem não ser detectados pelo controle operacional. Dessa forma, a integração entre as diferentes vertentes de monitoramento é fundamental para a proteção da saúde da população e para o aprimoramento das estratégias de gestão dos sistemas de abastecimento da água.

Considerações Finais

De modo geral, os resultados evidenciam a necessidade de uma análise integrada das diferentes vertentes de monitoramento para uma avaliação mais completa da qualidade da água, especialmente no ponto de consumo. A análise dos dados provenientes da vigilância em saúde revelou a ocorrência de inconformidades relevantes, em contraste com os resultados do controle operacional, reforçando que abordagens distintas podem levar a interpretações diferentes sobre a qualidade da água distribuída. Essa divergência dentro do próprio Sisagua destaca a importância da atuação complementar entre controle e vigilância, sobretudo na identificação de riscos à população. Além disso, limitações relacionadas à ausência de valores brutos e à descontinuidade das coletas indicam a necessidade de aprimoramento na disponibilização e regularidade das informações. Dessa forma, destaca-se a importância do fortalecimento das ações de monitoramento e vigilância, contribuindo para a garantia da qualidade da água, a proteção da saúde pública e o aprimoramento da gestão dos sistemas de abastecimento.

Referências Bibliográficas

BRASIL, Ministério da Saúde. **Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (Sisagua).** 2026. Disponível em: https://www.gov.br/saude/pt-br/composicao/svsa/saude-ambiental/vigiagua/sisagua. Acesso em: 12 dezembro 2025.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.** Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm Acesso em: 10 dezembro 2025

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 7 maio 2021.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Saneamento é saúde: como a falta de acesso à infraestrutura básica afeta a incidência de doenças relativas ao saneamento ambiental inadequado no Brasil.** São Paulo, 2025. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/saneamento-e-saude/. Acesso em: 02 fevereiro 2026.

MATO GROSSO. Prefeitura Municipal de Cuiabá. **Prefeito comemora resultados da ETA Sul: "Cuiabá vive uma nova era no saneamento básico".** Cuiabá, 17 jun. 20https://doi.org/10.21577/0100- 4042.20230029. 2021. Disponível em: https://cuiaba.mt.gov.br/noticias/prefeito-comemora-resultados-da-eta-sul-cuiaba-vive-uma-nova-era-no-saneamento-basico. Acesso em: 10 dezembro 2025.

PAINEL DO SANEAMENTO. **Painel do saneamento (2024)**. Disponível em: https://www.painelsaneamento.org.br/. Acesso em: 15 janeiro 2026

SANTOS, N. G. N. et al. **Water quality monitoring in southern Brazil and evaluation of risk factors related to contamination by coliforms and Escherichia coli.** Journal of Water and Health, v. 21, n. 10, 2023. Disponível em: https://iwaponline.com/jwh/arti cle/21/10/1550/97686/. Acesso em: 02 março 2026.

SINTAEMASP. **Por que o SUS atua como vigilante da qualidade da água consumida no Brasil?** São Paulo, 6 ago. 2024. Disponível em: https://sintaemasp.org.br/notici as/sus-saneamento-saude. Acesso em: 01 maio 2026

VIZIOLI, B. de C.; MONTAGNER, C. C. **Questões regulatórias sobre a desinfecção da água e o impacto da geração de DBPs na qualidade da água tratada.** Química Nova, v. 46, n. 4, 2023. DOI: https://doi.org/10.21577/0100- 4042.20230029. Acesso em: 15 janeiro 2026.

CHLORELLA VULGARIS COMO AGENTE BIOLÓGICO NA REMEDIAÇÃO DE MEIOS AQUÁTICOS E NO CONTROLE DA EUTROFIZAÇÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

1 Júlia Gonçalves Caixeta, 2 Isabela Guimarães Lima, 3 Ana Carolina Silva Ferreira Vilela, 4 João Victor Bispo da Cruz, 5 Lucas Carvalho Basílio de Azevedo

1 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: julia.caix1@ufu.; 2 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: br isabela.lima@ufu.br; 3 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: anacarolina14@ufu.br; 4 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: joaovctr123.jv@ufu.br; 5 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: lucasazevedo@ufu.br;

Palavras-chave: biorremediação; eutrofização; *Chlorella vulgaris.*

Introdução

O termo eutrofização refere-se à mudança gradual que assola um corpo hídrico e o torna rico em nutrientes com o passar do tempo. Esse excesso, principalmente de nitrogênio e fosforo, causa um aumento no crescimento algal, o que influencia negativamente a qualidade da água e a disponibilidade de oxigênio dissolvido do local (BOYD, 2020). As mudanças causadas pela eutrofização costumam ser percebidas quando ocorre uma mudança repentina (ponto de inflexão) para um estado visivelmente mais eutrófico, relacionado a mudanças na cor e no odor da água.

Estudos demonstram que a biomassa fitoplanctônica está fortemente relacionada à disponibilidade de fósforo em ambientes de água doce, independentemente da concentração de nitrogênio (SCHINDLER, 2008). O fósforo tem sido apontado como um dos principais elementos responsáveis pela manutenção do estado eutrófico, especialmente devido à sua liberação a partir de sedimentos, o que pode sustentar elevadas concentrações desse nutriente mesmo na ausência de fontes externas significativas (LI et al., 2024; HOLDT et al., 2025).

Entretanto, o nitrogênio desempenha papel fundamental na regulação da eutrofização em sistemas estuarinos, atuando como um dos principais fatores que controlam a produtividade fitoplanctônica (PEIN; STANEVA, 2024). O controle eficiente da eutrofização pode exigir a redução simultânea de nitrogênio e fósforo, especialmente em ambientes costeiros e estuarinos, nos quais o nitrogênio frequentemente atua como nutriente limitante (CONLEY et al., 2009).

Ou seja, a eutrofização não depende exclusivamente da concentração absoluta de nutrientes, como também do equilíbrio entre nitrogênio e fósforo no sistema (KOPÁČEK et al., 2024), o controle dessa relação juntamente com a redução nos valores dos nutrientes possibilita o controle da eutrofização.

Existem alternativas biológicas remoção de nitrogênio da água. Para fosforo, entretanto, os procedimentos mais comuns envolvem agentes químicos. Coagulantes químicos podem ser adicionados aos corpos d'água para precipitar o fósforo, e produtos químicos como o sulfato de cobre podem ser aplicados como algicidas. (BOYD, 2020).

É nesse contexto que a microalga chlorella vulgaris pode agir como agente biorremediador na remoção de nutrientes de ambiente aquáticos em processo de eutrofização. Sua composição morfologica a permite prosperar em ambientes aquaticos e terretres (XU et al., 2020). Alem de demonstrar notável resiliência e capacidade adaptativa em diversos ambientes aquáticos estressantes, incluindo salinidades extremas e temperaturas variáveis e altas concentrações de nutrientes (U et al., 2020; MOUNTOURAKIS et al., 2023).

Metodologia

A presente revisão sistemática foi conduzida com base nas diretrizes do protocolo PRISMA 2020 (Page et al., 2021). O processo seguiu as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão.

A busca bibliográfica foi realizada nas bases Scopus e Web of Science, utilizando a seguinte equação de busca aplicada em título, resumo e palavras-chave:("Chlorella vulgaris") AND ("bioremediation" OR "phycoremediation") AND ("wastewater" OR "eutrophication" OR "eutrophic water" OR "nutrient removal") AND ("nitrogen removal" OR "phosphorus removal" OR "N removal" OR "P removal")

Foram considerados artigos publicados entre 2020 e 2025, nos idiomas inglês e português, restritos a publicações revisadas por pares. Após a remoção de duplicatas, os estudos foram submetidos à triagem por leitura de títulos e resumos, seguida da leitura completa para avaliação de elegibilidade.

Foram incluídos estudos experimentais que utilizaram *Chlorella vulgaris* na remoção de nitrogênio e/ou fósforo em águas eutrofizadas ou efluentes. Foram excluídos trabalhos que não abordaram a espécie alvo, que não apresentaram dados quantitativos de remoção de nutrientes, que possuíam caráter exclusivamente teórico, que não estavam disponíveis na íntegra, bem como estudos que não apresentaram a eficiência de remoção em termos percentuais ou dados suficientes para sua determinação, de modo a assegurar a consistência na comparação dos resultados. (Figura 1)

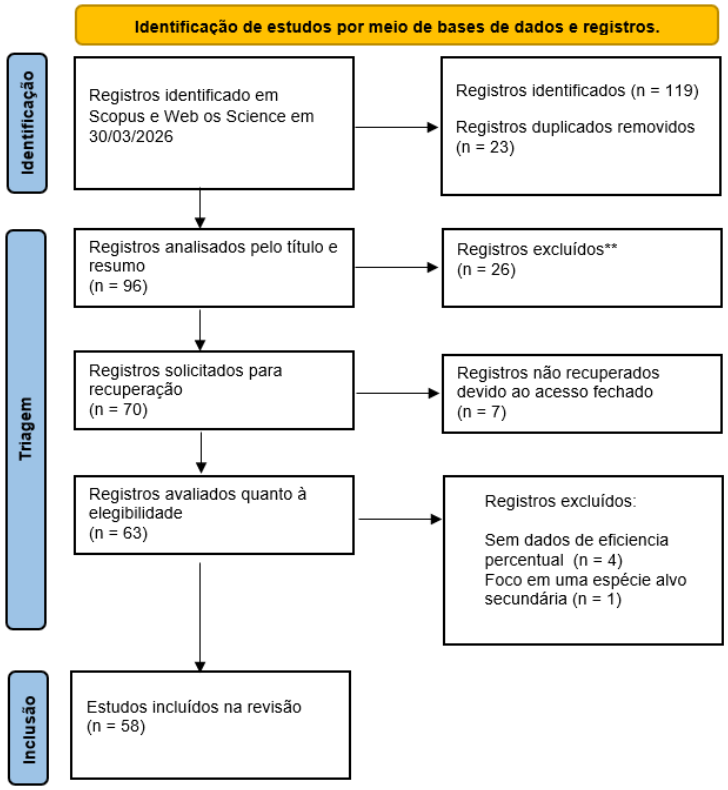


Figura 1: Processo de seleção dos estudos.
Fonte: Autoral (2026)

Resultados e Discussão

Eficiência na Remoção de Parâmetros Nitrogenados

A análise da capacidade de biorremediação da *Chlorella vulgaris* revela uma afinidade metabólica superior por compostos nitrogenados, como nitrogênio total, amoniacal, nitrito e nitrato. Nos estudos que avaliaram a microalga em condições de monocultivo, observou-se que aproximadamente 33,3% dos casos apresentaram eficiências de remoção situadas entre 90% e 95%, enquanto 66,6% demonstraram índices abaixo de 80%. Esses resultados indicam que, embora a microalga possua um bom potencial de remoção, seu desempenho isolado pode ser bastante variável, dependendo das condições ambientais e operacionais adotadas.

Em contrapartida, o emprego de consórcios microbianos demonstrou uma clara potencialização dos resultados: 45,45% dos trabalhos reportaram remoções acima de 95%, e 9,09% situaram-se na faixa de 90% a 95%. Essa superioridade é atribuída à sinergia estabelecida entre os microrganismos, na qual as bactérias promovem a mineralização de compostos orgânicos complexos, tornando os nutrientes mais facilmente assimiláveis pela microalga. Por exemplo, enquanto o uso isolado de certas linhagens permite remoções elevadas em meios sintéticos, como demonstrado por (REZVANI et al., 2020), o uso de consórcios em meios naturais mantém a eficiência estável em torno de 92% a 99%. Essa tendência também é observada no estudo de (MA et al., 2022), no qual a interação entre *C. vulgaris* e *Bacillus* spp. resultou em uma melhora significativa na purificação do efluente, evidenciando o papel estratégico dessas associações.

Eficiencia na remoção de Fósforo

A remoção de fósforo apresentou comportamentos distintos conforme a configuração biológica adotada. Em sistemas isolados, 50% dos estudos atingiram eficiências superiores a 95%, enquanto nos sistemas em consórcio, embora 33,3% tenham mantido esse alto desempenho, 66,6% apresentaram remoções abaixo de 80%. Esses resultados indicam que, diferentemente do nitrogênio, a remoção de fósforo pode ser mais sensível às condições do sistema e às interações entre os microrganismos, não apresentando um ganho consistente com o uso de consórcios.

A eficácia nesse parâmetro é fundamental, uma vez que o fósforo é amplamente reconhecido como o principal catalisador do processo de eutrofização. O trabalho de (HAJRI et al., 2024) demonstra que a remoção de fósforo pode alcançar até 97,36% em meios naturais utilizando *C. vulgaris*. Além disso, observa-se que a eficiência desse processo pode ser potencializada pelo aumento do pH durante a atividade fotossintética, o que favorece a precipitação química do fósforo na forma de fosfatos de cálcio ou magnésio, conforme discutido por (REZVANI et al., 2020). Dessa forma, a combinação entre assimilação biológica e processos abióticos de precipitação desempenha um papel decisivo no polimento final do efluente, especialmente em aplicações em larga escala.

Redução de Carga Orgânica (DBO e DQO)

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e a Demanda Química de Oxigênio (DQO) são indicadores críticos de poluição. Para a DBO, o uso de consórcios mostrou-se superior, com 66,6% dos estudos atingindo remoção entre 90% e 95%. No caso da DQO, o estudo de (FALLAHI et al., 2020) demonstra que o consórcio com lodo ativado atinge eficiências significativamente maiores do que cultivos isolados, que frequentemente apresentam remoções abaixo de 80%. Essa sinergia ocorre devido à troca gasosa vital: as microalgas fornecem oxigênio para a decomposição bacteriana, enquanto as bactérias suprem o CO_2 necessário para a fotossíntese algal.

Relação C:N:P

A performance da biorremediação é intrinsecamente ligada à relação C:N:P. No estudo de (POZZOBON et al., 2022), observou-se que a disponibilidade de carbono (razão C/N > 8) é o fator limitante para a remoção total de nitrogênio. Já o trabalho de (KHOLOMYEVA et al., 2020) reforça que em efluentes desequilibrados, a suplementação para atingir razões próximas a 12:1 é essencial para evitar a estagnação metabólica da cultura.

Considerações Finais

A *Chlorella vulgaris* consolidou-se como uma alternativa altamente eficiente para o combate à eutrofização, com destaque para a remoção quase total de nitrogênio amoniacal e excelentes taxas de redução de fósforo. Esses resultados reforçam o potencial da microalga como uma solução sustentável para o tratamento de águas enriquecidas com nutrientes. Os consórcios microbianos mostraram-se sistematicamente superiores às monoculturas, uma vez que a interação simbiótica entre os microrganismos favorece a degradação de matéria orgânica complexa e contribui para uma maior estabilidade do sistema, mesmo sob condições ambientais adversas.

A aplicabilidade dessa tecnologia é ampla, abrangendo desde o tratamento terciário de esgoto doméstico até efluentes industriais mais complexos, como os provenientes das indústrias petroquímica e de laticínios. Além disso, observa-se um crescente interesse na integração desses sistemas a processos mais sustentáveis e economicamente viáveis. Nesse contexto, trabalhos futuros devem focar na otimização de fotobiorreatores em larga escala e na valorização da biomassa gerada, especialmente para a produção de biocombustíveis e biofertilizantes, promovendo uma abordagem integrada alinhada aos princípios da economia circular.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer ao CNPQ, a Universidade Federal de Uberlândia e ao Programa Empreendedorismo Ambiental pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

BOYD, Claude E. *Eutrophication*. In: BOYD, Claude E. *Water quality: an introduction*. 3. ed. Cham: Springer, 2020. p. 311–322. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-23335-8_15

CONLEY, Daniel J. et al. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. *Science*, v. 323, n. 5917, p. 1014–1015, 2009. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1167755

FALLAHI, A. et al. Co-culture of microalgae-activated sludge for wastewater treatment and biomass production. *Iran Journal of Biotechnology*, v. 18, n. 4, e2586, 2020.

GUPTA, A.; MARCHETTI, L. Microalgae-Assisted-Treatment-of-Wastewater-Originating-from-Varied-Sources. *Algal Research*, v. 75, 102895, 2024.

HAJRI, A. K. et al. Bioremediation of dairy industry wastewater and assessment of nutrient removal potential of *Chlorella vulgaris*. *Biology*, v. 13, n. 8, p. 591, 2024.

HOLDT, K. Johann et al. Spatial patterns of sediment phosphorus contents and release in a deep clearwater lake undergoing rapid eutrophication. *Biogeochemistry*, v. 168, p. 83, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s10533-025-01280-1

KHOLOMYEVA, O. et al. Assessing the potential of microalgae for nutrients removal from a landfill leachate using an innovative tubular photobioreactor. MDPI, Basel, 2020.

KOPÁČEK, Jiří et al. A stoichiometric insight into the seasonal imbalance of phosphorus and nitrogen in central European fishponds. *Environmental Sciences Europe*, v. 36, p. 139, 2024. DOI: https://doi.org/10.1186/s12302-024-00968-9

LI, Chenghan et al. Variations of phosphorus in sediments and suspended particulate matter of a typical mesotrophic plateau lake and their contribution to eutrophication. *Scientific Reports*, v. 14, p. 26551, 2024. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-77866-w

MA, H. et al. Nutritional Profile and Bioremediation of Tropical Marine Aquaculture with an Integrated Microalgae and Bacteria Symbiosis. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 10, 2022.

MOUNTOURAKIS, F. et al. Evidence of physiological adaptation of *Chlorella vulgaris* under extreme salinity – new insights into a potential halotolerance strategy. *Environmental and Experimental Botany*, v. 216, p. 105543, dez. 2023. Elsevier BV. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105543.

PEIN, Johannes; STANEVA, Joanna. Eutrophication hotspots, nitrogen fluxes and climate impacts in estuarine ecosystems: a model study of the Odra estuary system. *Ocean Dynamics*, v. 74, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10236-024-01607-w

POZZOBON, V. et al. Effect of pot-ale enrichment on the treatment efficiency of primary settled wastewater by the microalga *Chlorella vulgaris*. *Algal Research*, v. 65, 102754, 2022.

REZVANI, F. et al. Assessment of algae-based wastewater treatment in hot climate region: Treatment performance and kinetics. *Journal of Environmental Management*, v. 268, 110650, 2020.

SCHINDLER, David W. et al. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 105, n. 32, p. 11254–11258, 2008. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.0805108105

SHOU, Chen-Yang et al. Chronic increasing nitrogen and endogenous phosphorus release from sediment threaten the water quality in a semi-humid region reservoir. *Science of the Total Environment*, v. 931, p. 172924, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172924

XU, Mengmeng et al. Growth of *Chlorella vulgaris* and nutrient removal in wastewater under different nitrogen and phosphorus concentrations. *Frontiers in Microbiology*, v. 11, p. 585836, 2020. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.585836

ZHANG, Yong et al. Spatial-temporal distribution of nitrogen and phosphorus nutrients and potential eutrophication assessment in Bohai Bay, China. *Ocean & Coastal Management*, v. 267, p. 107741, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107741

ZHOU, S.; LI, W.; HE, S. N-acyl homoserine lactones (AHLs) enhanced removal of cadmium and other pollutants by algae-bacteria consortia. *Frontiers in Ecology and Evolution*, v. 11, 1125743, 2023.

ESTRATÉGIAS INTEGRADAS PARA CONTROLE DA TURBIDEZ EM CURSOS D'ÁGUA E REDUÇÃO DE RISCOS AMBIENTAIS NA MINERAÇÃO DE FERRO

1 Evandro Alexandre Perché, 2 Joao Carlos Araújo Silva Neto, 3 Aldo Marques Zerlotini, 4 Pedro Aurélio Ferreira Coutinho, 5 Giselle Maria de Oliveira Raiol, 6 Eliza Assis Paixão, 7 Jose Eustaquio Rezende Pereira, 8 Renata Torres Pinto.

1 Vale S/A, e-mail: evandro.alexandre.perche@vale.com; 2 Vale S/A, e-mail: joao.carlos.neto@vale.com; 3 Vale S/A, e-mail: aldo.zerlotini@vale.com; 4 Vale S/A, e-mail: pedro.aurelio@vale.com; 5 Vale S/A, e-mail: giselle.raiol@vale.com; 6 Vale S/A eliza.paixão@vale.com ; 7 Salum Ltda, e-mail: eustaquio@salumconstrucoes.com.br: 8 Salum Ltda, e-mail: renata.torres@salumconstrucoes.com.

Palavras-chave: Controle de Sedimentos, Eficiência Operacional, Mineração Sustentável

Introdução

O setor mineral possui papel estratégico na economia, contribuindo significativamente para o Produto Interno Bruto (PIB), geração de empregos e desenvolvimento tecnológico. Entretanto, a atividade minerária também está associada a impactos ambientais relevantes, especialmente sobre os recursos hídricos. No Quadrilátero Ferrífero, região de intensa atividade minerária em Minas Gerais, a combinação entre geologia local, alta pluviosidade e intervenções antrópicas intensifica processos erosivos e o carreamento de sedimentos. Neste contexto a alteração de turbidez é um dos impactos ambientais mais relevantes em obras da mineração de ferro, dado seu potencial de afetar diretamente a qualidade da água, a biota aquática e o cumprimento dos limites legais.

Embora existam diversas técnicas de controle de sedimentos, a literatura apresenta lacunas quanto à avaliação integrada dessas soluções em condições reais de mineração. Este estudo busca preencher essa lacuna ao avaliar, de forma experimental, a eficiência combinada de diferentes tecnologias de controle de turbidez.

Neste contexto, este estudo avaliou experimentalmente, em condições reais de operação, a eficiência individual e integrada de estruturas físicas (sumps, filtros de brita e cascalho, geotêxteis, paliçadas e cortinas de turbidez) associadas ou não a coagulação química, visando reduzir a turbidez gerada por obras de terraplanagem e movimentação de solo.

Objetivos

Objetivo Geral

Avaliar a eficiência de um sistema integrado de controle de turbidez em obras de mineração durante o período chuvoso, por meio de estudo experimental em campo.

Objetivos Específicos

- Avaliar a eficiência de estruturas isoladas e combinadas;
- Verificar colmatação e durabilidade;
- Comparar desempenho técnico e custo;
- Analisar estatisticamente os resultados.

Metodologia

A pesquisa foi caracterizada como experimental de campo, com abordagem quantitativa. O monitoramento foi realizado em pontos específicos ao longo do curso d'água, com medições diárias utilizando turbidímetro portátil.

As variáveis incluem turbidez (dependente), tipo de estrutura, intensidade de chuva e tempo pós-evento (independentes), além de variáveis de controle como solo e declividade.

As estruturas avaliadas incluem:

- Sumps (sedimentação);
- Filtros de brita (retenção física);
- Geotêxteis e paliçadas (barreiras);
- Cortinas de turbidez;
- Aplicação de coagulantes.

A eficiência foi calculada pela redução percentual da turbidez entre montante e jusante.

Análise Estatística

Foram aplicados testes de normalidade (Shapiro-Wilk), homogeneidade (Levene), ANOVA ou Kruskal-Wallis, além de correlações de Pearson ou Spearman. Também será analisado o comportamento pré e pós-colmatação.

Resultados e Discussão

O desempenho individual foi mensurado por meio de pontos de monitoramento instalados imediatamente a montante e a jusante dos dispositivos. Essa estratégia permite determinar a eficiência de remoção de turbidez com base na redução percentual entre as medições, seguindo abordagem utilizada em estudos sobre retenção de sólidos suspensos e controle de sedimentos (EPA, 2017; CAMPOS, 2024).

A avaliação integrada considerou o conjunto das estruturas instaladas ao longo do percurso preferencial da água, desta forma foi verificado se houve ganho cumulativo de eficiência quando os filtros, geotêxteis e sumps atuam em sequência. A abordagem seguiu diretrizes recomendadas por Tavares et al. (2021) e EPA (2022) sobre sistemas integrados de controle de sedimentos.

Os parâmetros quantitativos de redução da turbidez serviram como referência para avaliar a intensidade e a variação temporal do transporte de sedimentos em suspensão. Para a análise dos dados, foram aplicadas estatísticas descritivas, incluindo média, mediana, desvio padrão e coeficiente de variação, permitindo caracterizar o comportamento da turbidez em cada ponto amostral. Adicionalmente, testes inferenciais foram utilizados para verificar diferenças significativas entre os pontos de medição ou ao longo do tempo, possibilitando identificar padrões espaciais e temporais relevantes. Essa abordagem metodológica forneceu subsídios robustos para a interpretação dos processos de transporte de sedimentos e para a gestão da qualidade da água na região estudada.

Os resultados revelam que a adoção integrada das estruturas promoveu uma evolução operacional sem precedentes. A eficiência global de controle da turbidez, que era de 62,86% no ciclo chuvoso 2024/2025, avançou para 98,41% no ciclo 2025/2026, representando um salto de +35,55 pontos percentuais e consolidando o plano como altamente eficaz diante da alta variabilidade pluviométrica da região. Esse desempenho foi favorecido pelo encadeamento sinérgico das estruturas: sumps estratégicos reduziram a energia do escoamento e favoreceram a decantação; filtros de brita e cascalho atuaram na interceptação física de sólidos; geotêxteis e paliçadas ampliaram a retenção de sedimentos finos; e as cortinas de turbidez reduziram a dispersão em águas de maior profundidade. A análise integrada demonstrou ganho cumulativo de eficiência superior ao observado individualmente em cada estrutura.

Além da expressiva redução de turbidez, o sistema otimizou o tempo de estabilização pós-chuva, diminuiu colmatação, ampliou a durabilidade das estruturas e reduziu a necessidade de manutenções emergenciais. Do ponto de vista técnico e econômico, os resultados indicam que a combinação de estruturas físicas, com uso mínimo e criterioso de coagulação, proporcionou o melhor custo-benefício, reduzindo riscos ambientais, fortalecendo a conformidade legal e aumentando a previsibilidade operacional durante eventos críticos.

Considerações Finais

O estudo preenche uma lacuna científica sobre o desempenho conjunto de tecnologias de controle de sedimentos em ambientes da mineração de ferro e demonstra que soluções integradas, quando corretamente dimensionadas e distribuídas ao longo da microbacia, podem atingir níveis de eficiência comparáveis aos de sistemas industriais de clarificação, contribuindo para operações mais seguras, resilientes e ambientalmente responsáveis.

Referências Bibliográficas

ABDULHASAN, M. J. et al. Using Crushed Glass with Sand as a Single and Dual Filter Media for Removal of Turbidity from Drinking Water. Al-Mustaqbal University College, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Waleed-Alabdraba/publication/370341449_Using_Crushed_Glass_with_Sand_as_a_Single_and_Dual_Filter_Media_for_Removal_of_Turbidity_from_Drinking_Water/links/64a9cf5d8de7ed28ba86202d/Using-Crushed-Glass-with-Sand-as-a-Single-and-Dual-Filter-Media-for-Removal-of-Turbidity-from-Drinking-Water.pdf. Acesso em: 29 nov. 2025.

AMARAL, Ana Karolyna Nunes; ROSA, Lucas Espíndola; FORMIGA, Klebber Teodomiro Martins. Estudo do transporte de sedimentos em suspensão ao longo da bacia hidrográfica do rio Meia Ponte – Goiás. Ateliê Geográfico, Goiânia, v. 15, n. 2, p. 94–113, ago. 2021.

ARAÚJO, M. Práticas recomendadas para a gestão mais sustentável em canteiro de obras. 2009. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2009.

BARROS, Raphael Tobias Vasconcelos. Movimentação de Terra em Obras Rodoviárias: Um Estudo de Caso de Trechos do Proacesso-MG. Monografia (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstreams/04cb7335-8ccc-4f7f-ad7c-7a0cccf56405/download. Acesso em: 28 nov. 2025.

CAMPOS, Maria Eduarda Rodrigues de Almeida. Estudo de caso do dimensionamento hidrológico e hidráulico dos sumps na área lavrável do empreendimento minerário Mineração Ibirité – MIB. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Alfenas, Campus Avançado de Poços de Caldas, Poços de Caldas, 2023.

CAMPOS, Maria Eduarda Rodrigues de Almeida. Estudo hidrológico e hidráulico para dimensionamento e operação de sumps em área degradada de mineração (Pit Norte). 2024. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2024.

CARROLL, R.G. Jr. Geotextile filter criteria. Transportation Research Record, v. 916, p. 46–53, 1983. Disponível em: https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1983/916/916- 008.pdf. Acesso em: 9 set. 2025.

CASSIDY, R.; FOX, J. Suspended sediment, turbidity, and streamflow: An integrated approach for improved water-quality monitoring. Journal of Hydrology, v. 563, p. 609- 620, 2018.

CASTRO, P. T. A.; NALINI, H. W. J.; LIMA, H. M. Entendendo a mineração no Quadrilátero Ferrífero. 1. ed. Belo Horizonte: Ecológico, - Comunicação em Meio Ambiente, 102 p. 2015.

CAVALHIERI, Caio Pompeu; et al. Avaliação da eficiência na utilização de cortinas de turbidez para retenção de sólidos suspensos realizada em escala piloto. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 26, n. 1, p. 1–10, 2021.

EPA (2017) UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Erosion and Sediment Control Design Guide / Effectiveness of Sedimentation Ponds . Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2017.

EPA (2022): UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Sediment Risk Management Principles. Disponível em: <https://www.epa.gov/superfund/sediment-risk-management-principles>. National Menu of Best Management Practices (BMPs) for Stormwater-Construction. https://www.epa.gov/npdes/national-menu-best-management-practices-bmps-stormwater-construction . Washington, DC: EPA, 2022.

FIGUEIREDO, Múcio do Amaral. Mineração e crise hídrica em Minas Gerais: Quadrilátero Ferrífero/Quadrilátero Aquífero. Revista Geografia, Belo Horizonte, v. 33, n. 2, p. 45-68, 2021. Disponível em: https://periodicos.pucminas.br/geografia/article/download/25533/17774. Acesso em: 28 nov. 2025.

FILHO, L. A. da S.; CAMÊLO, D.; PROFETI, D. Óxidos de manganês em solos doQuadrilátero Ferrífero (MG). Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 35, p. 793–804, 2011.

GAIOTTE, J. V. M. Avaliação do desempenho de barreiras flutuantes para proteção de captações de água superficial. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alfenas, 2020. Disponível em: https://repositorio.unifal-mg.edu.br/bitstreams/82f7c1f2-1f73-4041-a5be-120df267fb6b/download Acesso em: 29 nov. 2025.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GUPTA, S.; AHUJA, R.S. Sediment control in mining and construction projects: Implications for water quality. Environmental Monitoring and Assessment, v. 188, n. 4, p. 245, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Informações e análises da economia mineral brasileira. Brasília: IBRAM, 2023. Disponível em: https://ibram.org.br/publicacoes. Acesso em: 28 nov. 2025.

IECA (2010)- INTERNATIONAL EROSION CONTROL ASSOCIATION. Design Standards for Erosion and Sediment Control. Denver: IECA, 2010. Disponível em: <https://connect.ieca.org/resources/design-standards>

IECA (2020)– International Erosion Control Association. Best Management Practices for Erosion and Sediment Control. Denver, 2020

NASCIMENTO, Jéssica Wanderley Souza do; SAMPAIO, Allefy Teles. Controle Tecnológico da Compactação dos Solos em Obra de Terraplenagem. In: Congresso Brasileiro Digital de Geotecnia e Meio Ambiente, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Jessica-Souza-53/publication/373359481_CONTROLE_TECNOLOGICO_DA_COMPACTACAO_DOS_SOLOS_EM_OBRA_DE_TERRAPLENAGEM/links/64e777340acf2e2b520dbdc6/CONTROLETECNOLOGICO-DA-COMPACTACAO-DOS-SOLOS-EM-OBRA-DE-TERRAPLENAGEM.pdf. Acesso em: 28 nov. 2025.

LAET, Sandra Márcia. Funcionamento hídrico em vertente de microbacia impactada por exploração garimpeira, Nova Marilândia/MT. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Mato Grosso. 2009.

LAWSON, C. R. Geotextile revetment filters. Geotechnical Testing Journal, v. 11, n. 4,p. 431–438, 1992. Disponível em: https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1992GtGm...1 1..431L/abstract. Acesso em: 9 set.2025.

LeChevallier, Mark W, Au, Kwok-Keung & World Health Organization. Water, Sanitation and Health Team (2004). Water treatment and pathogen control : process efficiency in achieving safe drinking water / Mark W. LeChevallier, Kwok-Keung Au. World Health Organization. World Health Organization. https://iris.who.int/handle/10665/42796

LEVIGHINI, A. C. P. Avaliação de barreiras flutuantes na retenção de sólidos suspensos. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) –UNIFAL-MG, Poços de Caldas, 2020.

LEVIGHINI, D. M. Impactos da turbidez na biodiversidade aquática em áreas mineradas. Revista Ecossistemas, 2020.

LIBÂNIO, P. A. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. 2. ed. Campinas: Átomo, 2010.

LUCIO, Felisberto Avaliação do emprego da filtração direta no tratamento de água com turbidez elevada por meio da pressedimentação: ensaios em escala de bancada Dissertação de Mestrado – UFMG disponível em : http://hdl.handle.net/1843/BUOS-AVKMVV.. 2013.

MACEDO,, L. G. M. Desempenho de cortinas de turbidez em sistema de drenagem pluvial aplicadas em pilhas de estéril. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – CEFET-MG, Belo Horizonte, 2023.

MACHADO, R. L. Análise do processo de formação e evolução das voçorocas: proposta de critérios para recuperação e reabilitação ambiental. 2007. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2007.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. Fundamentos de metodologia científica. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MURILLO-BERMÚDEZ, Luis Fernando. Correlação entre turbidez e concentração de sedimentos em suspensão para análises hidrossedimentológicas utilizando dados de uma estação de tratamento de água. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2021. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNICAMP 30_29665b2e1cb0553a3fbeb578df96a6ad. Acesso em: 8 out. 2025.

NAMY, Roberto Bayeux. Drenagem de rodovias: contribuição para o estudo de controle da poluição por cargas difusas gerada pelo escoamento superficial. 1999. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. Disponível em:https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-21012025-121601/pt-br.php.

OLIVEIRA, E. P. Avaliação da redução de turbidez por barreiras flutuantes em reservatórios de água. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alfenas, 2020. Disponível em: https://repositorio.unifal-mg.edu.br/items/9eedb6d0-1f91-4db0-afed-83f87d8766cd. Acesso em: 17 nov. 2025.

PEIXOTO, Murilo Santos; OLIVEIRA, Adriano Vicente Magalhães. Impacto Econômico e Ambiental: Aplicação e Melhoramento de Solo em Terraplanagem. Revista FT, v. 27, 2023. Disponível em: https://revistaft.com.br/impacto-economico-e-ambiental-aplicacao-e-melhoramento-de-solo-em-terraplanagem/. Acesso em: 28 nov. 2025.

RODRIGUES, Bruno Oliveira. Avaliação do comportamento de escoamentos provenientes de rupturas hipotéticas de pilhas de rejeito por meio de métodos empíricos e hidrodinâmicos. 2024. 172 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

SILVA, Caio Abreu Araújo; NOLASCO, Elaine; COUTO JÚNIOR, Antonio Felipe; SALEMI, Luiz Felippe. Efeito da estação climática sobre a turbidez da água de um manancial: implicações para a gestão da qualidade da água. Revista de Geografia (Recife), Recife, v. 38, n. 2, p. 1–15, 2021. Disponível em: https://periodicos .ufpe.br/revistas/index.php/revistageografia/article/download/249019/38797/0. Acesso em: 14 nov. 2025.

SILVA, J. R. Avaliação da eficiência de remoção de turbidez de um sistema alternativo de clarificação de água utilizando coagulantes natural e químico. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal do Espírito Santo, 2023. Disponível em: https://repositorio.ifes.edu.br/xmlui/handle/123456789/4373 Acesso em: 17 nov. 2025.

SOTO, Miguel Angel Alfaro; KIANG, Chang Hung; PEREIRA, Eliana Martins. Estudo laboratorial para construção de barragens filtrantes de sedimentos em áreas de lavra para cerâmica. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo, n. 3, p. 45-56, 2011.

TAVARES, A. P.; COSTA, C. R.; MARTINS, R. C. Eficiência de sistemas integrados de controle de sedimentos em obras de mineração. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 26, p. 1-14, 2021.

TALHAMI, M. et al. Efficient Turbidity Removal Using a New Gel Filtration Process. In: CIC Conference, Qatar University, 2023. Disponível em: https://qspace.qu .edu.qa/bitstream/handle/10576/47111/158.pdf?sequence=1. Acesso em: 29 nov. 2025.

TSUJI, T. M. Monitoramento e modelagem das águas de drenagem pluvial no Campus Darcy Ribeiro. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

VON HAGEN, E. L. Comparative Analysis of Turbidity and Organics Removal in Biological Activated Carbon and Anthracite-Sand Filters in the Moorhead Water Treatment Plant. Dissertação (Mestrado) – North Dakota State University, 2019. Disponível em: https://library.ndsu.edu/server/api/core/bitstreams/27359b4c-2137-4929-8791-134aacbabfdc/content Acesso em: 29 nov. 2025.

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: UFMG, 1996.

OCORRÊNCIA DE AGROTÓXICOS EM AMBIENTES AQUÁTICOS URBANOS: BIOMONITORAMENTO DO ARROIO DILÚVIO (RS, BRASIL)

1 Olga Maria do Nascimento Silveira, 2 Silvana Isabel Schneider, 1 Bárbara Clasen, 1 Gabriel Florencio Fontana, 1 Milena Morais Da Silva

1 Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, e-mail: olga-silveira@uergs.edu.br; 2 Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental e-mail: barbara-clasen@uergs.edu.br.

Palavras-chave: Biomonitoramento; Qualidade de água; agrotóxicos

Introdução

Segundo BUSS, D. F. et al., biomonitoramento pode ser definido como o uso sistemático das respostas de organismos vivos para avaliar as mudanças ocorridas no ambiente, geralmente causadas por ações antropogênicas. Nesse contexto, os agrotóxicos representam uma das principais fontes de alterações ambientais passíveis de avaliação por meio do biomonitoramento especialmente no que se refere à qualidade da água em ecossistemas aquáticos.

Contaminantes de preocupação emergente, como os agrotóxicos, podem representar uma ameaça significativa à integridade ecológica de ecossistemas aquáticos e à saúde humana, mesmo quando presentes em baixas concentrações. Esses compostos são definidos como produtos químicos sintéticos utilizados para eliminar insetos, larvas, fungos e outros organismos, sob a justificativa de controlar doenças provocadas por esses vetores e regular o crescimento da vegetação, tanto no ambiente rural quanto urbano (BRASIL, 2002; INCA, 2021).

Diante disso, este estudo teve como objetivo determinar a presença e distribuição de agrotóxicos em amostras de água do Arroio Dilúvio, importante recurso hídrico da cidade de Porto Alegre, sul do Brasil, mesmo na ausência de áreas agrícolas nas proximidades indicando a necessidade de implementação contínua de estratégias de biomonitoramento, controle das fontes poluidoras, educação ambiental e atualização da legislação vigente, visando garantir um meio ambiente ecologicamente equilibrado, essencial a sadia qualidade de vida.

Material e Métodos

O presente estudo foi realizado no estado do Rio Grande do Sul, ao longo do Arroio Dilúvio abrangendo 6 pontos de coleta distribuídos entre o que se compreende sua nascente no município de Viamão, situada a 30°04'27.7" de latitude sul 51°07'27.3" de longitude oeste até o último ponto na cidade de Porto Alegre, localizado a 30°02'50.9" de latitude sul e 51°13'06.3" de longitude oeste de Greenwich, no hemisfério sul, no mês de fevereiro de 2025 conforme ilustrado no mapa apresentado na Figura 1. As estimativas populacionais são de 231.996 habitantes para Viamão e 1.388.794 habitantes para Porto Alegre (IBGE,2022). O curso do Arroio Dilúvio possui cerca de 17 km de extensão, dos quais aproximadamente 12 km são canalizados, atravessando áreas densamente urbanizadas e recebendo afluentes e contribuições de drenagem pluvial até desaguar no Lago Guaíba, apresentando regime de escoamento predominantemente controlado pelas chuvas.

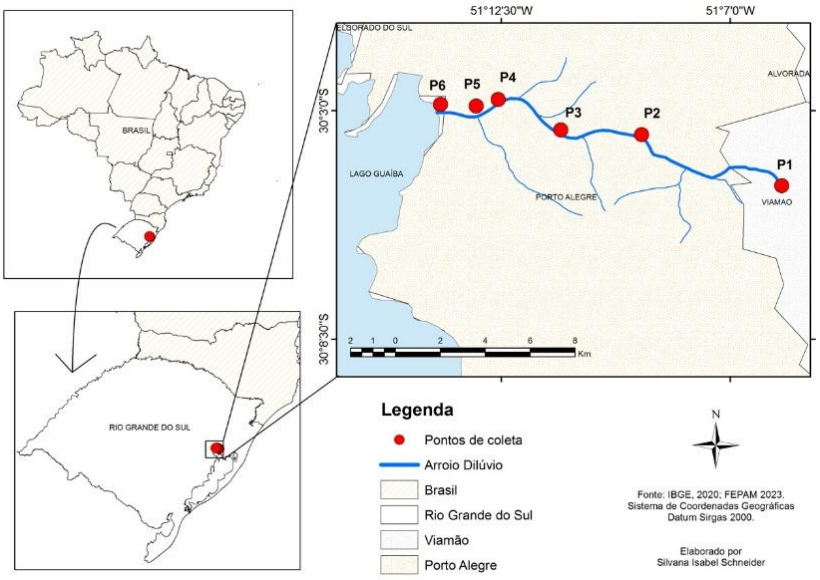


Figura 1: Mapa de localização dos pontos de amostragem no Arroio Dilúvio, Porto Alegre, RS, Brasil.
Fonte: Elaborado pelos próprios autores (2025)

Com base na definição dos pontos amostrais descritos anteriormente as amostras de água foram coletadas em frascos âmbar esterilizados, refrigeradas e transportadas para a Universidade Federal de Santa Maria, junto ao Laboratório de Análises de Resíduos de Pesticidas (LARP). nas quais foram submetidas à determinação de resíduos de agrotóxicos por extração em fase sólida (SPE) e cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas em tandem (LC-MS/MS). Os resultados foram expressos em forma de tabela, possibilitando a identificação e quantificação de resíduos de agrotóxicos além da realização de análises comparativas entre os diferentes pontos de coleta.

Resultados e Discussão

Os dados obtidos mostraram evidenciaram a presença de diferentes agrotóxicos ao longo do percurso do arroio diluvio com variações entre os pontos de coleta conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Concentração de agrotóxicos (µg/L) em pontos de coleta ao longo do Arroio Dilúvio, Porto Alegre, RS, Brasil, em fevereiro de 2025.

COMPOSTOS PRESENTES	P1 (nascente)	P2	P3	P4	P5	P6
2,4-D	N.D	N.D	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
Atrazina	N.D	<LOQ	0,032	0,037	0,047	0,038
Azoxistrobina	N.D	<LOQ	0,021	0,024	0,031	0,025
Carbaril	N.D	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
Carbendazim	0,041	0,067	0,092	0,178	0,146	0,172
Clomazona	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Fipronil	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	<LOQ
Imidacloprido	<LOQ	<LOQ	0,034	0,133	0,060	0,082
Propoxur	N.D	N.D	N.D	<LOQ	N.D	N.D
Quincloraque	0,027	0,066	0,117	0,132	0,150	0,140
Simazina	N.D	N.D	N.D	<LOQ	<LOQ	<LOQ
Tebuconazol	N.D	<LOQ	0,041	0,060	0,061	0,052
Tiametoxam	<LOQ	<LOQ	0,025	0,025	0,034	0,032
AMPA	N.D	N.D	N.D	5,297	2,224	<LOQ

Fonte: Elaborado pelos próprios autores (2025)

Nota:
N.D. = não detectado; LOD = limite de detecção do método; <LOQ = inferior ao limite de quantificação do método.
Para os compostos 2,4-D, atrazina, azoxistrobina, carbaril, carbendazim, clomazona, fipronil, imidacloprido, simazina, tebuconazol e tiametoxam: LOD = 0,006 µg/L e LOQ = 0,020 µg/L;
quincloraque: LOD = 0,012 µg/L e LOQ = 0,040 µg/L;
propoxur: LOD = 0,024 µg/L e LOQ = 0,080 µg/L;
AMPA: LOD = 0,601 µg/L e LOQ = 2,00 µg/L.

A Tabela 1 evidencia a presença de diferentes compostos em concentrações variáveis ao longo do trecho analisado. De modo geral, observa-se um aumento na frequência de detecção e nas concentrações dos compostos ao longo dos pontos de amostragem, sugerindo maior influência de fontes antrópicas no percurso urbano.

No ponto 1 (P1), caracterizado como nascente, já foram detectados compostos como carbendazim e quincloraque. O carbendazim apresentou 0,041 µg/L, enquanto o quincloraque também foi identificado desde a nascente, com concentração inicial de 0,027 µg/L. A presença desses compostos já no ponto inicial pode indicar fontes difusas próximas, como áreas residenciais ou deposição atmosférica.

O Carbendazim é um dos fungicidas mais comuns em ambientes urbanos. Sua principal fonte é tinta e revestimentos de fachadas de prédios para evitar o crescimento de fungos e limo nas paredes (X. Huang, 2005), quando chove, o composto é lixiviado e levado pelas galerias pluviais até o arroio. O aumento gradual de sua concentração em relação aos pontos de coleta de 0,041 µg/L no P1 a 0,172 µg/L no P6 pode indicar a poluição gradativa do arroio,

De forma semelhante, o Quincloraque que é um herbicida amplamente utilizado no controle de ervas daninhas em gramados ornamentais, teve sua detecção desde a nascente de 0,027 µg/L Podendo indicar a presença de contaminantes próximos a região como uso em jardins residenciais próximos ou deposição atmosférica mesmo estando abaixo do valor limite permitido pela legislação brasileira.

O AMPA, principal metabólito do glifosato, também pode ter origem urbana, sendo derivado da degradação de fosfonatos presentes em detergentes e produtos de limpeza. (S. Coutu. 2011) A concentração observada de 5,297 µg/L no ponto P4 é relativamente elevada e pode indicar aporte localizado, possivelmente associado ao lançamento de esgoto ou ao escoamento superficial intenso de áreas urbanizadas.

O Imidacloprido que a partir do P3 consegue ser quantificado com 0,034 µg/L e é um princípio ativo comum em produtos veterinários contra pulgas e carrapatos e em venenos domésticos para formigas e cupins. A presença crescente desse composto ao longo dos pontos de coleta sugere contribuição de fontes domésticas, como a lavagem de animais e o escoamento de águas residuais urbanas.

Atrazina também a partir do ponto três consegue ser quantificada com 0,032 µg/L sem muitas variações ao longo do percurso. frequentemente usada para controle de vegetação em leitos de ferrovias e margens de rodovias para evitar danos ao asfalto e manter a visibilidade, o que pela lixiviação ou águas pluviais explicaria a aparição ao longo do arroio

Segundo Meftaul et al. (2020), os pesticidas têm sido amplamente aplicados de forma imprudente e indiscriminada tanto na agricultura quanto em ambientes não agrícolas, incluindo áreas urbanas, para o controle de diversas pragas. Nesse contexto Tauchnitz et al. (2020) destacam que fontes urbanas também contribuem significativamente para a poluição das águas superficiais por pesticidas, uma vez que esses compostos podem alcançar corpos hídricos por diferentes vias, como o escoamento superficial e o transporte atmosférico, não estando associados exclusivamente às atividades agrícolas.

A análise integrada dos dados permite identificar diferentes padrões de comportamento entre os compostos. Observa-se um grupo que apresenta aumento progressivo de concentração ao longo do percurso, como o carbendazim e o quincloraque, indicando aporte contínuo por fontes difusas ao longo da área urbana. Por outro lado, compostos como imidacloprido, atrazina, tebuconazol e tiametoxam passam a ser detectados a partir do ponto P3, sugerindo a introdução de novas fontes de contaminação ao longo do trecho urbano, possivelmente associadas ao aumento da densidade urbana ou a mudanças no uso e ocupação do solo.

Destaca-se ainda o comportamento pontual do AMPA, que apresentou um pico expressivo no ponto P4, caracterizando um possível aporte localizado, compatível com descargas de esgoto ou contribuições concentradas de escoamento superficial.

Em relação aos compostos 2,4-D, carbaril, clomazona, propoxur e simazina, estes não foram detectados ou apresentaram concentrações inferiores ao limite de quantificação do método na maior parte dos pontos, indicando baixa relevância no contexto da área estudada.

Nesse contexto, apesar de a agricultura ser reconhecida como uma importante fonte de agrotóxicos para a contaminação dos recursos hídricos, não há áreas que possam ser caracterizadas como agrícolas no perímetro urbano da cidade de Porto Alegre. Dessa forma, acredita-se que a presença dos contaminantes investigados no Arroio Dilúvio seja predominantemente proveniente de atividades urbanas. Nessa perspectiva, esses compostos incluem não apenas agrotóxicos de uso agrícola, mas também pesticidas aplicados em áreas urbanas e produtos domissanitários, amplamente utilizados no controle de pragas domésticas e em espaços públicos, os quais compartilham princípios ativos e representam fontes relevantes de contaminação ambiental (TRINDADE, 2026). Os dados apresentam um cenário clássico de contaminação urbana por biocidas, definidos como substâncias ou misturas destinadas a destruir ou controlar organismos nocivos, incluindo pragas urbanas e microrganismos (European Commission, 2012), ou seja, os compostos não se originam de lavouras, mas da própria infraestrutura da cidade, de produtos domésticos e da manutenção de áreas verdes.

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece limites para a concentração de substâncias em águas doces de Classe 2, incluindo valores máximos de 2,0 µg/L para atrazina e simazina e 30,0 µg/L para 2,4-D (CONAMA, 2005). Embora os resultados obtidos neste estudo estejam dentro dos limites estabelecidos pela legislação, nota-se um aumento gradual nas concentrações do P1 (nascente) em direção ao P6. refletindo o acúmulo de carga poluidora à medida que o rio atravessa a malha urbana e recebendo mais contribuições de esgoto e águas pluviais. Sendo assim, se faz necessária uma avaliação integrada da presença desses compostos no ambiente aquático. A ocorrência simultânea de múltiplos agrotóxicos pode resultar em efeitos combinados, frequentemente descritos como “efeito coquetel”, os quais não são contemplados pela legislação vigente. Assim, mesmo em concentrações individuais consideradas seguras, a exposição crônica a misturas de contaminantes pode representar riscos à biota aquática do arroio.

Considerações Finais

Os padrões observados de agrotóxicos que aumentaram ao longo do trecho do Arroio Dilúvio são coerentes com a literatura, que aponta forte contribuição de usos urbanos, escoamento de chuva e deposição atmosférica, mesmo na ausência de atividades agrícolas próximas ao arroio. Cientificamente, esses resultados indicam a necessidade de uma melhor gestão urbana e de uma avaliação mais minuciosa quanto ao risco real à biota aquática, uma vez que, nas estações de tratamento, não há foco específico na remoção desses poluentes emergentes e, dentro dos parâmetros de qualidade da água exigidos, podem ser liberadas concentrações que, isoladamente, não parecem alarmantes. Dessa forma, embora os níveis individuais estejam abaixo dos limites estabelecidos pela legislação, o chamado “efeito coquetel”, resultante da presença simultânea de múltiplos compostos, não é considerado nas normas vigentes e pode causar toxicidade crônica à fauna aquática do Arroio Dilúvio, evidenciando a importância de revisar estratégias de controle desses contaminantes em ambientes urbanos.

Agradecimentos

Agradece-se em especial a Professora Barbara Clasen pela orientação, ao Grupo de Pesquisa em Toxicologia Ambiental (GPTOX), a Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS) e a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) por todo suporte oferecido.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 142, n. 53, p. 58-63, 18 mar. 2005. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf. Acesso em: 3 maio 2026.

BUSS, Daniel Forsin; BAPTISTA, Darcílio Fernandes; NESSIMIAN, Jorge Luiz. Bases conceituais para a aplicação de biomonitoramento em programas de avaliação da qualidade da água de rios. Cadernos de Saúde Pública, Rio de Janeiro, v. 19, n. 2, p. 465-473, mar./abr. 2003.

EUROPEAN COMMISSION. Regulation (EU) No 528/2012 of the European Parliament and of the Council of 22 May 2012 concerning the making available on the market and use of biocidal products. Official Journal of the European Union, Brussels, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER. Agrotóxicos. Rio de Janeiro: INCA, [s.d.]. Disponível em: https://www.gov.br/inca/pt-br/assuntos/causas-e-prevencao-do-cancer/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/agrotoxico. Acesso em: 2 maio 2026.

MEFTAUL, I. M. et al. Pesticides in the urban environment: A potential threat that knocks at the door. *Science of the Total Environment*, v. 711, 134612, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134612. Acesso em: 1 de maio 2026

S. Coutu, C. Rota, D. A. Barry, N. Chèvre, and L. Rossi, “Biocides in paints in urban areas: Modelling an underestimated source of environmental contamination,” Jan. 2011.

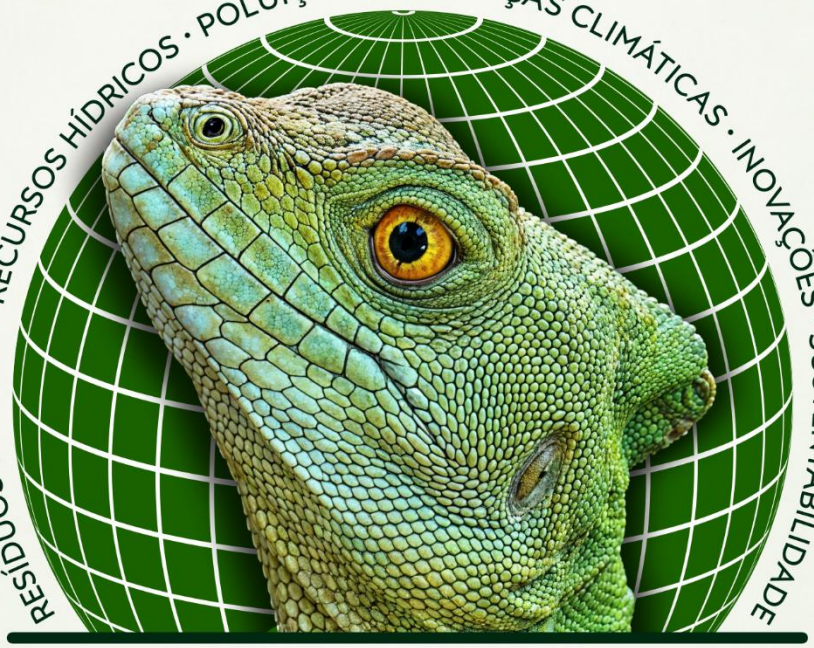
TAUCHNITZ, N. et al. Assessment of pesticide inputs into surface waters by agricultural and urban sources: A case study in the Querne/Weida catchment, central Germany. *Environmental Pollution*, v. 267, p. 115186, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115186. Acesso em: 1 de maio 2026

TRINDADE, J. F. S.; BARRETO, M. R. Diversidade, uso e cuidados de domissanitários desinfestantes em áreas urbanas e rurais. In: REIS, C. dos; BARBOSA, E. P.; REINA, L. D. C. B.; FEISTEL, R. A. B. (Orgs.). Ciências da Natureza e Matemática: relatos de Ensino, Pesquisa e Extensão. Sinop: KGM Editora, 2026. v. 6, cap. 1, p. 17-42. DOI: 10.29327/5790880.6- 1

X. Huang, S. Fong, L. A. Deanovic, and T. M. Young, “Toxicity of herbicides in highway runoff.,” *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 24, no. 9, pp. 2336–2340, Sept. 2005, doi: 10.1897/04-174R.1.

ÁREA TEMÁTICA 28

RESÍDUOS SÓLIDOS: RECICLAGEM E COLETA



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS DE RECICLAGEM PARA A CIRCULARIDADE DE EMBALAGENS PLÁSTICAS FLEXÍVEIS MULTICAMADAS: NA BUSCA DE UM *ROADMAP* TECNOLÓGICO

1 André Luiz dos Santos, 2 Liane Mahlmann Kipper, 3 Adriane Lawisch Rodriguez, 4 Jusicleiton Santos Pereira

1 Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Brasil, e-mail: andresantos@mx2.unisc.br; 2 Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Brasil, e-mail: liane@unisc.br; 3 Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Brasil, e-mail: adriane@unisc.br; 4 Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Brasil, e-mail: jusicleiton@mx2.unisc.br

Palavras-chave: Embalagens Plásticas Flexíveis Multicamadas (EPFM), Economia Circular, Reciclagem

Introdução

A fabricação mundial de polímeros registrou uma expansão significativa a partir de 1950, alcançando marcas próximas a 400 milhões de toneladas anuais (Blanco *et al*., 2025; Agostinho *et al*., 2025). Estimativas apontam que, mantendo-se os padrões vigentes, o volume global de plásticos pode ultrapassar 1,2 bilhão de toneladas até o ano de 2060 (Ruggeri *et al*., 2025). Desse montante, uma fatia de 36% a 40% supre o setor de embalagens, comumente de descarte rápido e ciclo de vida breve, consolidando-as como o principal vetor de resíduos plásticos (Yousef *et al*., 2020; Munoz-Briones *et al*., 2025). A Economia Circular (EC) de plásticos emerge como paradigma vital para atenuar impactos ambientais, visando o fechamento do ciclo produtivo e a preservação do valor intrínseco dos materiais (Munoz-Briones *et al*., 2025). Contudo, a migração para a circularidade plena esbarra em entraves críticos na gestão de resíduos de Embalagens Plásticas Flexíveis Multicamadas (MFPP), conforme apontado por (Johansen *et al*., 2022). O caráter heterogêneo dessas estruturas laminares; que integram Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Poliamida (PA), Politereftalato de Etileno (PET) e alumínio para assegurar proteção do produto embalado e a capacidade de produção em larga escala, constitui o maior desafio à reciclagem mecânica tradicional (Intarapong *et al*., 2024; Ügdüler *et al*., 2023). Dúvidas quanto à constituição das lâminas e ao uso de adesivos elevam os índices de incineração e o envio para aterros (Vagnoni et al., 2023; Soares *et al*., 2022). O presente artigo investiga o estado da arte das soluções tecnológicas factível a circularidade das MFPP, buscando identificar os desafios e oportunidades existentes para a criação de um *roadmap* tecnológico.

Material e métodos

O presente trabalho foi estruturado como uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) utilizando as bases de dados Science Direct, Scopus e Web of Science, abrangendo o período de 2020 a 2025. A metodologia seguiu o modelo proposto por Gohr *et al*. (2013), consistindo em três fases: definição da questão de pesquisa, seleção de trabalhos e classificação de estudos adequados. Foi aplicado um protocolo de atributos adaptado de Brizola e Fantin (2016) e o protocolo *Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) para organizar as análises qualitativas e quantitativas (Saputra *et al*., 2024). Foram desenvolvidos cinco eixos de busca combinando palavras-chave como "*circular economy*", "*flexible packaging*" e "*recycling technology*". O processo de triagem inicial identificou 827 estudos, dos quais 200 foram selecionados após a aplicação de critérios de elegibilidade, que incluíram a exclusão de artigos sobre plásticos rígidos ou outras classes de resíduos sólidos urbanos. A análise utilizou o software VOSviewer para o mapeamento bibliométrico e identificação de clusters temáticos voltados para a tecnologia de materiais e processos de reciclagem.

Resultados e discussões

A reciclagem de embalagens plásticas flexíveis multicamadas é um desafio significativo devido à composição heterogênea de materiais incompatíveis, o que torna o modelo mecânico convencional muitas vezes inviável (Yousef *et al*., 2020; Lase *et al*., 2022; Munoz-Briones *et al*., 2025). As rotas tecnológicas para esses materiais são divididas em três fases distintas: coleta e triagem, reciclagem de monomateriais e reciclagem de materiais complexos (M. V. Rizzo *et al*., 2024).

A primeira fase inicia-se com o tratamento dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em instalações de recuperação ou triagem (Gao *et al*., 2023; Bushra *et al*., 2025). A eficiência desta etapa é fundamental e pode utilizar sistemas avançados como o *Duales System Deutschland* (DSD) e tecnologias de espectroscopia de *Near-infrared* (NIR) ou *X-ray fluorescence* (XRF) para separar plásticos, metais e papéis (Bashirgonbadi *et al*., 2022). O objetivo desta fase é a produção de fardos concentrados (ex: fardos ricos em PE ou poliolefinas) que servirão de matéria-prima para os recicladores, definindo se o resíduo seguirá para rotas mecânicas ou químicas.

A segunda fase aborda a reciclagem mecânica para materiais puros e embalagens monomateriais, processando majoritariamente PE ou PP (Guleria *et al*., 2025). Esta rota divide-se em fluxos convencionais de *downcycling* e fluxos de alta pureza conhecidos como *upcycling*. No *downcycling*, os processos de lavagem a frio e extrusão simples resultam em pelotas de baixa qualidade para aplicações como sacos de lixo ou bancos de jardim. Em contrapartida, o Processo de Reciclagem de

Qualidade (PRQ) utiliza triagem avançada por NIR, lavagem a quente (> 80 °C) com detergentes e extrusão com filtragem de dois estágios e descontaminação para produzir regranulados de alta qualidade (ex: 99% PE) (Lase *et al*., 2022; Bashirgonbadi *et al*., 2022). Este método permite aplicações de maior valor, como filmes termoencolhíveis e a incorporação de conteúdo reciclado *Post-Consumer Recycled* (PCR) em novas embalagens.

A terceira fase foca na Reciclagem Química (RQ), essencial para materiais difíceis de reciclar mecanicamente devido à incompatibilidade de polímeros ou contaminação (Ahamed *et al*., 2021). Tecnologias como pirólise, gaseificação e solvólise emergem como soluções viáveis (Chari *et al*., 2025). A pirólise destaca-se por converter resíduos plásticos mistos em óleo de pirólise, gases ou combustíveis através da degradação térmica na ausência de oxigênio (Pauer *et al*., 2020; Johansen *et al*., 2022). Este óleo pode substituir a nafta virgem em processos de *steam cracking* para a produção de novos polímeros com qualidade idêntica à resina virgem. Outra rota promissora é o processo baseado em solventes, como o método *Solvent-Targeted Recovery and Precipitation* (STRAP), que utiliza solventes específicos (n-dodecano e GVL) para dissolver seletivamente polímeros como PE e PET de embalagens complexas, recuperando resinas de qualidade virgem (Johansen *et al*., 2022). Técnicas de delaminação também são exploradas, utilizando soluções aquosas com surfactantes aniônicos alternáveis (como C12-TEA) para separar camadas de polímero e alumínio, conforme demonstrado em embalagens de café (Vagnoni *et al*., 2023).

Além das rotas de processamento, o design para reciclagem surge como uma oportunidade tecnológica crítica. A transição para estruturas monomateriais, priorizando poliolefinas e o uso de filmes de orientação através de *Machine Direction Orientation* (MDO), permite substituir camadas complexas por barreiras recicláveis de óxido de silício (Bauer *et al*., 2021b; Guleria *et al*., 2025). O uso de polietileno trimodal também oferece um novo equilíbrio de rigidez e processabilidade, facilitando a redução da espessura das embalagens e aumentando a capacidade de incorporação de PCR (De Santis *et al*., 2024). Embora essas tecnologias sejam promissoras, barreiras econômicas como o baixo custo da matéria-prima fóssil e restrições regulatórias de segurança alimentar ainda dificultam a implementação em larga escala (Anwar *et al*., 2024; Cao *et al*., 2025; Pauer *et al*., 2020).

Considerações finais

A circularidade de embalagens plásticas flexíveis multicamadas é tecnicamente viável através da adoção de tecnologias avançadas, conforme as descritas na seção anterior, mas exige uma mudança sistêmica (Johansen *et al*., 2022; Samorì *et al*., 2023). Enquanto a reciclagem mecânica é limitada a monomateriais, a reciclagem química via pirólise e o método STRAP são rotas essenciais para valorizar resíduos complexos e produzir materiais de alta qualidade (Munoz-Briones *et al*., 2025; Chari *et al*., 2025). O sucesso desta transição depende do alinhamento entre o *Design for Recycling*, melhorias na infraestrutura de triagem e a superação de barreiras econômicas e regulatórias para que o plástico reciclado possa competir de forma justa com as matérias-primas fósseis (Zepa *et al*., 2024; Stumpf *et al*., 2023).

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Capes, a Universidade de Santa Cruz dos Sul (UNISC) e ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental (PPGTA) pelo apoio recebido. Também agradeçemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq – protocolos 306216/2022-1 e 310204/2022-4, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES - código 001 e processos 88881.710388/2022 e 88881.987783/2024-01.

Referências

AGOSTINHO, B.; IRSKA, I.; KWIATKOWSKA, M.; SZYMCZYK, A. et al. Optimized closed-loop recycling of bio-based poly(trimethylene 2,5-furandicarboxylate) using eutectic solvents. Sustainable Materials and Technologies, 45, p. e01506, 2025/10/01/ 2025.

AHAMED, A.; VEKSHA, A.; GIANNIS, A.; LISAK, G. Flexible packaging plastic waste – environmental implications, management solutions, and the way forward. Current Opinion in Chemical Engineering, 32, 2021. Review.

ANWAR, M. A.; SASONGKO, N. A.; NAJIB, M.; PRANOTO, B. Challenges and prospects of multilayer plastic waste management in several countries: A systematic literature review. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 10, 2024. Article.

BASHIRGONBADI, A.; SAPUTRA LASE, I.; DELVA, L.; VAN GEEM, K. M. et al. Quality evaluation and economic assessment of an improved mechanical recycling process for post-consumer flexible plastics. Waste Management, 153, p. 41-51, 2022/11/01/ 2022.

BAUER, A. S.; TACKER, M.; UYSAL-UNALAN, I.; CRUZ, R. M. S. et al. Recyclability and redesign challenges in multilayer flexible food packaging—a review. Foods, 10, n. 11, 2021. Review.

BLANCO, A.; JUAN, R.; PAREDES, B.; DOMÍNGUEZ, C. et al. Advancing polypropylene quantification in recycled HDPE: A comparative study of FTIR, DSC, TREF, and TGIC for enhanced plastic circularity. Polymer Testing, 149, p. 108855, 2025/08/01/ 2025.

BRIZOLA, J.; FANTIN, N. Revisão da literatura e revisão sistemática da literatura. Revista de Educação do Vale do Arinos-RELVA, 3, n. 2, 2016.

BUSHRA, R.; KHAYAL, A.; AHMAD, M.; SONG, J. et al. Catalytic conversion of polymer waste into high-value products for advancing circular economy and eco-sustainability. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 189, p. 107052, 2025/08/01/ 2025.

CHARI, S.; PAULILLO, A.; MATERAZZI, M. Exploring the potential of chemical recycling using a distributed model in the UK – A life cycle assessment perspective. Waste Management, 199, p. 13-24, 2025/05/15/ 2025.

DE SANTIS, F.; BORAGNO, L.; JEREMIC, D.; ALBUNIA, A. R. Trimodal polyethylene polymer design for more sustainable packaging applications. Polymer, 295, p. 126740, 2024/03/01/ 2024.

GAO, P.; KRANTZ, J.; FERKI, O.; NIEDUZAK, Z. et al. Thermo-mechanical recycling via ultrahigh-speed extrusion of film-grade recycled LDPE and injection molding. Sustainable Materials and Technologies, 38, p. e00719, 2023/12/01/ 2023.

GOHR, C. F.; SANTOS, L. C.; GONCALVES, A. M. C.; PINTO, N. O. Um método para a revisão sistemática da literatura em pesquisas de engenharia de produção. Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 33, p. 1-18, 2013.

GULERIA, D.; DEBRIE, S.; GE, S.; VERVOORT, S. et al. Assessing mechanical recyclability of blown films and integration of PCR for high modulus uniaxially drawn PE film application. Polymer Degradation and Stability, 240, p. 111458, 2025/10/01/ 2025.

INTARAPONG, P.; PREECHAWONG, J.; NITHITANAKUL, M. High valuable wax from multilayer film packaging wastes using solid catalyst via pyrolysis process. Waste Management, 186, p. 205-213, 2024/09/15/ 2024.

JOHANSEN, M. R.; CHRISTENSEN, T. B.; RAMOS, T. M.; SYBERG, K. A review of the plastic value chain from a circular economy perspective. Journal of Environmental Management, 302, 2022. Review.

LASE, I. S.; BASHIRGONBADI, A.; VAN RHIJN, F.; DEWULF, J. et al. Material flow analysis and recycling performance of an improved mechanical recycling process for post-consumer flexible plastics. WASTE MANAGEMENT, 153, p. 249-263, NOV 2022.

MUNOZ-BRIONES, P.; DEL CARMEN MUNGUÍA-LÓPEZ, A.; RIVERA, K. S.; AVRAAMIDOU, S. Integrated decision-making approach for the simultaneous design of food packaging and waste management technologies to achieve a Circular Economy. Computers and Chemical Engineering, 202, 2025. Article.

PAUER, E.; TACKER, M.; GABRIEL, V.; KRAUTER, V. Sustainability of flexible multilayer packaging: Environmental impacts and recyclability of packaging for bacon in block. Cleaner Environmental Systems, 1, p. 100001, 2020/12/01/ 2020.

RIZZO, M. V.; CARLO TANCREDI, G. P.; VIGNALI, G., 2024, The Recycling Technologies of Mono-material and Multilayer Plastic Film: A Descriptive Literature Review. 469-474. Disponível em: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85208058023&doi=10.1016%2fj.ifacol.2024.09.256&partnerID=40&md5=06f745e10bc52a06bd1e77366f42e893.

RUGGERI, M.; SAVASTANO, M.; RIZZI, A.; VERONESI, A. et al. Life cycle assessment of post-industrial plastics mechanical recycling. A case study from Italy. Science of The Total Environment, 998, p. 180246, 2025/10/10/ 2025.

SAMORÌ, C.; PITACCO, W.; VAGNONI, M.; CATELLI, E. et al. Recycling of multilayer packaging waste with sustainable solvents. Resources, Conservation and Recycling, 190, p. 106832, 2023/03/01/ 2023.

SAPUTRA, T.; TJAHJONO, H. K.; NURYAKIN. Bibliometric Analysis of Research Publication Trends on Job Rotation Satisfaction. Revista de Gestão Social e Ambiental, 18, n. 9, p. e05312, 04/26 2024.

SOARES, C. T. D. M.; EK, M.; ÖSTMARK, E.; GÄLLSTEDT, M. et al. Recycling of multi-material multilayer plastic packaging: Current trends and future scenarios. Resources, Conservation and Recycling, 176, p. 105905, 2022/01/01/ 2022.

STUMPF, L.; SCHÖGGL, J. P.; BAUMGARTNER, R. J. Circular plastics packaging – Prioritizing resources and capabilities along the supply chain. Technological Forecasting and Social Change, 188, 2023. Article.

VAGNONI, M.; PITACCO, W.; ARPAIA, V.; CATELLI, E. et al. Recycling of multilayer packaging waste with switchable anionic surfactants. Resources, Conservation and Recycling, 198, 2023. Article.

VAGNONI, M.; PITACCO, W.; ARPAIA, V.; CATELLI, E. et al. Recycling of multilayer packaging waste with switchable anionic surfactants. Resources, Conservation and Recycling, 198, p. 107141, 2023/11/01/ 2023.

YOUSEF, S.; EIMONTAS, J.; STRIŪGAS, N.; ZAKARAUSKAS, K. et al. Pyrolysis kinetic behavior and TG-FTIR-GC–MS analysis of metallised food packaging plastics. Fuel, 282, p. 118737, 2020/12/15/ 2020.

ZEPA, I.; GRUDDE, V. Z.; BENING, C. R. Legitimising technologies for a circular economy: Contested discourses on innovation for plastics recycling in Europe. Environmental Innovation and Societal Transitions, 50, 2024. Article.

ÜGDÜLER, S.; VAN LAERE, T.; DE SOMER, T.; GUSEV, S. et al. Understanding the complexity of deinking plastic waste: An assessment of the efficiency of different treatments to remove ink resins from printed plastic film. Journal of Hazardous Materials, 452, p. 131239, 2023/06/15/ 2023.

OCORRÊNCIA E DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM AMBIENTES CAVERNÍCOLAS NO NORDESTE DE GOIÁS, BRASIL CENTRAL

1Fernanda Sousa Santos 2Maycon Winnicius Barreira de Souza-Coelho, 3Igor Gerolineto Alves, 4Igor Gomes Oliveira, 5Wilian Vaz-Silva, 6Rodrigo Assis de Carvalho e 7Francisco Leonardo Tejerina-Garro

1 Pontifícia Universidade Católica de Goiás, e-mail: fernandamgene@gmail.com; 2 Pontifícia Universidade Católica de Goiás, e-mail: mayconwinnicius1999@gmail.com; 3 Pontifícia Universidade Católica de Goiás, e-mail: igor.heperto@gmail.com; 4 Universidade Estadual de Goiás, e-mail: igor.oliveira@ueg.br; 5 Pontifícia Universidade Católica de Goiás, e-mail: herpetovaz@gmail.com; 6 Universidade Estadual de Goiás, e-mail: decarvalho.ra@gmail.com; 7 Pontifícia Universidade Católica de Goiás e Universidade Evangélica de Goiás, e-mail: garro@pucgoias.edu.br.

Palavras-chave: Caverna; plástico; contaminação.

Introdução

As cavernas representam ambientes naturais singulares, caracterizados por condições ambientais estáveis, ausência de luz permanente na zona afótica e limitada disponibilidade de energia. Essas características resultam em ecossistemas especializados, compostos por organismos adaptados a condições extremas, como baixa produtividade primária e restrições tróficas (Trajano & Bichuette, 2010).

Dentre as diversas pressões antrópicas que afetam os ambientes cavernícolas, a presença de resíduos sólidos destaca-se como um problema crescente e ainda pouco explorado na literatura científica. Resíduos sólidos, conforme definido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), compreendem materiais descartados resultantes de atividades humanas, incluindo substâncias em estado sólido ou semissólido (Brasil, 2010). Em ambientes cavernícolas, esses resíduos podem ser introduzidos por múltiplas vias, tais como visitação turística desordenada, atividades recreativas, descarte irregular de lixo e transporte por escoamento superficial em sistemas cársticos (Cigna et al., 2013).

A vulnerabilidade das cavernas à poluição por resíduos sólidos está relacionada às características geomorfológicas e hidrológicas dos sistemas cársticos. Esses ambientes apresentam elevada conectividade entre superfície e subsuperfície, favorecendo a rápida infiltração e dispersão de contaminantes (Ford & Williams, 2007). Dessa forma, resíduos depositados na superfície podem ser transportados para o interior das cavernas, comprometendo não apenas o ambiente subterrâneo, mas também cursos de água associados (White & White, 2017).

Do ponto de vista ambiental, os resíduos podem alterar a qualidade da água subterrânea por meio da liberação de substâncias tóxicas, além de favorecer a introdução de poluentes emergentes, como microplásticos (Balestra et al., 2023). Esses materiais, além de persistirem por longos períodos no ambiente, podem atuar como vetores de contaminantes químicos e microrganismos, ampliando os riscos ecológicos (Piccardo & Bevilacqua, 2024).

A introdução de resíduos sólidos pode modificar a dinâmica dos ecossistemas cavernícolas. A entrada de resíduos sólidos associados a matéria orgânica, por exemplo, pode alterar cadeias tróficas naturalmente limitadas, favorecendo espécies oportunistas em detrimento de organismos especializados (Ferreira, 2024). Além disso, a presença física de resíduos pode causar degradação de habitats, interferir na locomoção da fauna e aumentar a mortalidade de organismos subterrâneos (Cigna et al., 2013).

Outro aspecto relevante refere-se aos impactos sobre o patrimônio geológico. Resíduos sólidos podem provocar danos diretos aos espeleotemas, seja por ação física, química ou estética, comprometendo a integridade e o valor científico e turístico das cavernas (Santos Lobo & Boggiani, 2013). Em ambientes turísticos, a deposição de resíduos sólidos também está associada à perda da qualidade paisagística e à degradação da experiência do visitante, refletindo problemas de manejo e educação ambiental (Lobo, De Jesus Perinotto & Boggiani, 2008).

Apesar da relevância do tema, estudos sobre resíduos sólidos em cavernas ainda são escassos, sendo frequentemente abordados de forma indireta em pesquisas sobre impactos ambientais, turismo e conservação de ambientes cársticos (Piccardo & Bevilacqua, 2024). Nos últimos anos, entretanto, tem-se observado um aumento no interesse científico, especialmente no que se refere à presença de microplásticos em ambientes subterrâneos, evidenciando que a poluição pode atingir até mesmo locais considerados isolados (Balestra & Bellopede, 2023).

Diante desse cenário, este estudo objetiva avaliar a ocorrência e distribuição dos resíduos sólidos em cavernas cársticas localizadas na região nordeste do estado de Goiás, Brasil Central.

Material e Métodos

A área amostrada está localizada no nordeste do estado de Goiás, Brasil Central, inserida no domínio do bioma Cerrado, caracterizado por elevada biodiversidade e sazonalidade climática bem definida (Sano, 2008), esta última classificada como tropical sazonal (Aw), segundo a classificação de Köppen-Geiger, com duas estações distintas: uma chuvosa, entre os meses de outubro e abril, e outra seca, entre maio e setembro (Alvares et al., 2013). Foram amostradas oito cavernas: Borá IV, Funil, Nova Esperança e Rio das Pedras localizadas no município de Mambaí, Penhasco, Córrego das Dores e Gruna da Judite localizadas no município de Buritinópolis e a Lapa do Sumidouro localizada no município de Posse. Destas, Borá IV, Funil, Penhasco e Córrego das Dores são cavernas turísticas e Nova Esperança, Sumidouro, Gruna da Judite e Rio das Pedras são não turísticas.

As cavernas amostradas apresentam desenvolvimento predominantemente horizontal, com presença de um gradiente de zonas de luz (fótica, penumbra e afótica). A zona fótica é caracterizada por maior influência externa, com variações de luminosidade, temperatura e aporte de matéria orgânica. A zona afótica, por sua vez, apresenta ausência total de luz, maior estabilidade ambiental e condições oligotróficas.

A coleta de dados foi realizada por meio de inspeção visual sistemática no interior das cavernas selecionadas, abrangendo as zonas de luz. Em cada zona foi delimitado um transecto, ao longo do qual foram realizadas as coletas de dados. O esforço amostral foi de 1pessoa/transecto/45 minutos/caverna. Todos os resíduos sólidos visíveis foram fotografados e quantificados, sem remoção, a fim de evitar interferências na dinâmica natural do ambiente.

Os resíduos após identificação foram classificados nas seguintes categorias: plástico, vidro e metal. Adicionalmente, quando possível, os resíduos foram classificados quanto à sua provável origem, incluindo as categorias: doméstica e urbano (Belarmino et al., 2014). A quantificação dos resíduos foi realizada por meio da contagem direta dos itens observados em cada caverna e em cada zona de luz.

Os dados coletados foram tabulados e organizados em uma matriz utilizando o software Excel®, para posteriormente serem realizadas as análises estatísticas. Inicialmente foi determinada a normalidade por meio do teste de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965). Para verificar a existência de diferenças estatísticas entre os grupos turísticos e não turísticos, entre as categorias dos resíduos sólidos e entre as diferentes zonas luminosas das cavernas, a matriz de dados foi submetida a uma análise de variância (ANOVA) seguida de uma análise *post hoc* de Tukey para comparações múltiplas (Zar, 1999), em ambos os casos $p<0,05$ (Rohlf, 1981).

Resultados e Discussão

Foram registrados 107 itens de resíduos sólidos nas oito cavernas analisadas, distribuídos entre as categorias metal, plástico e vidro. A caverna Borá IV apresentou a maior quantidade de resíduos (n = 44), seguida por Nova Esperança (n = 23) e Funil (n = 18), enquanto Córrego das Dores apresentou apenas um registro. Essa variação na quantidade de resíduos entre as cavernas sugere influência de fatores como acessibilidade, proximidade com áreas antropizadas e uso do entorno, que podem favorecer a introdução e o acúmulo de materiais nesses ambientes (Cigna et al., 2013; Lobo, De Jesus Perinotto & Boggiani, 2008).

A distribuição dos resíduos ao longo das zonas luminosas evidenciou maior concentração na zona de penumbra (n = 57), seguida pela zona fótica (n = 42) e, em menor proporção, pela zona afótica (n = 6). Apesar dessa tendência, a análise estatística não indicou diferença significativa entre as zonas ($F = 2,194$; $p = 0,1363$), demonstrando que os resíduos estão distribuídos ao longo de todo o gradiente de luz. Essa tendência reforça a elevada vulnerabilidade dos ambientes cavernícolas, uma vez que a presença de resíduos em diferentes zonas de luz indica sua dispersão no interior das cavidades. Esse processo pode estar associado tanto à circulação humana quanto ao carreamento de materiais pelo escoamento superficial em cavernas com cursos de água ativos, facilitando o transporte de resíduos para regiões mais internas (Ford & Williams, 2007; White & White, 2017).

A composição dos resíduos evidenciou predominância de materiais plásticos (n = 94), seguidos por metal (n = 21) e vidro (n = 12). A análise de variância indicou diferença estatisticamente significativa entre os tipos de materiais ($F = 4,511$; $p = 0,01441$), sendo essa diferença observada principalmente entre plástico e vidro ($p = 0,01754$). A maior ocorrência de plásticos está associada ao seu amplo uso e elevada persistência ambiental, características que favorecem sua acumulação em ambientes subterrâneos. Por outro lado, o vidro, embora presente, apresentou menor frequência, possivelmente devido à sua maior densidade e menor mobilidade, o que limita sua dispersão ao longo das cavernas (Balestra & Bellopede, 2023; Piccardo & Bevilacqua, 2024).

Quanto à origem dos resíduos, observou-se predominância da categoria urbana (n = 59), seguida por resíduos domésticos (n = 46), sem diferença estatisticamente significativa entre essas categorias ($F = 0,1504$; $p = 0,704$). Esse resultado indica que a presença de resíduos não está associada a uma única fonte, mas sim a diferentes formas de uso e ocupação do entorno. De forma semelhante, a comparação entre cavernas turísticas e não turísticas não revelou diferença significativa ($F = 0,4393$; $p = 0,5321$), sugerindo que a ocorrência de resíduos não depende exclusivamente da visitação direta, podendo estar relacionada a fontes difusas, como o transporte indireto de materiais (Cigna et al., 2013).

A análise comparativa entre as cavernas também não indicou diferença estatisticamente significativa ($F = 2,446$; $p = 0,06565$), evidenciando que os resíduos sólidos ocorrem de forma generalizada nos ambientes estudados. Esse padrão indica que a presença desses materiais independe do tipo de caverna ou do nível de uso, reforçando a ideia de que os impactos antrópicos atingem amplamente os sistemas cavernícolas.

Considerações Finais

Os resultados deste estudo evidenciam que os resíduos sólidos estão amplamente distribuídos nas cavernas analisadas, com predominância de materiais plásticos e forte influência de fontes antrópicas, especialmente de origem urbana e doméstica. A maior concentração de resíduos na zona de penumbra, associada à presença desses materiais em todas as zonas ambientais, inclusive na zona afótica, reforça a elevada vulnerabilidade dos ambientes cársticos à poluição. Esse cenário pode ser atribuído tanto ao uso direto das cavernas quanto a processos indiretos, como o transporte de resíduos a partir do entorno.

A ausência de diferenças significativas entre categorias de resíduos, tipos de cavernas e zonas ambientais indica que a presença de resíduos sólidos ocorre de forma generalizada, não estando restrita a condições específicas. Por outro lado, a diferença significativa observada entre os tipos de materiais, especialmente entre plástico e vidro, evidencia o papel predominante do plástico como principal resíduo nesses ambientes, destacando sua maior persistência e capacidade de dispersão.

Dessa forma, os resultados obtidos reforçam a necessidade de estratégias integradas de monitoramento, manejo e conservação. Considerando a fragilidade dos ecossistemas cavernícolas e sua relevância ecológica, hidrológica e científica, a compreensão dos efeitos

da poluição por resíduos sólidos torna-se fundamental para subsidiar ações eficazes de gestão ambiental. Nesse contexto, medidas como o controle do uso do entorno, a promoção da educação ambiental e o monitoramento contínuo são essenciais para mitigar os impactos antrópicos e garantir a preservação dos ambientes subterrâneos frente às crescentes pressões humanas.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas integrais concedidas aos três primeiros coautores; à Pontifícia Universidade Católica de Goiás pelo recurso de pesquisa concedido ao último coautor (Edital Nº 001/2024 GAB/R – Programa Institucional de Apoio à Pesquisa da PUC Goiás (PAP/PUC Goiás), Processo 2024.01.20041316); à Universidade Estadual de Goiás e ao Emílio Manoel Calvo pelo apoio logístico.

Referências Bibliográficas

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

BALESTRA, Valentina; BELLOPEDE, Rossana. Microplastics in caves: A new threat in the most famous geo-heritage in the world. Analysis and comparison of Italian show caves deposits. Journal of Environmental Management, v. 342, p. 118189, 2023.

BELARMINO, P. H. P.; SILVA, S. M.; RUFENER, M.-C.; ARAÚJO, M. C. B. Resíduos sólidos em manguezal no rio Potengi (Natal, RN, Brasil): relação com a localização e usos. Revista de Gestão Costeira Integrada, v. 14, n. 3, p. 447–457, 2014.

BRASIL. Presidência da República. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. 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, 2010. Disponível em:<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/ l12305.htm>. Acesso em: 18 de março de 2026.

CIGNA, Arrigo A. et al. Caves: the most important geotouristic feature in the world. Tourism and Karst areas, v. 6, n. 1, p. 9-26, 2013.

FERREIRA, Verónica. Macroplastic litter colonization by stream macroinvertebrates relative to that of plant litter: a meta-analysis. Environmental Pollution, v. 342, p. 123108, 2024.

FORD, Derek; WILLIAMS, Paul D. Karst hydrogeology and geomorphology. John Wiley & Sons, 2007.

LOBO, Heros Augusto Santos; DE JESUS PERINOTTO, José Alexandre; BOGGIANI, Paulo César. Espeleoturismo no Brasil: panorama geral e perpectivas de sustentabilidade. Revista Brasileira de Ecoturismo (RBEcotur), v. 1, n. 1, 2008.

PICCARDO, Manuela; BEVILACQUA, Stanislao. Lost in the dark: current evidence and knowledge gaps about microplastic pollution in natural caves. Environments, v. 11, n. 11, p. 238, 2024.

RIBEIRO, J.F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do Bioma Cerrado. S.M. Sano, S.P. Almeida, J.F. Ribeiro (Eds.), Ecologia e Flora. Planaltina (2008).

ROHLF, F. et al. Biometry the principles and practice of statistics in biological research. 1981.

SANO, Sueli Matiko. Cerrado: ecologia e flora. Embrapa Informação Tecnológica: Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008.
SANTOS LOBO, Heros Augusto; BOGGIANI, Paulo Cesar. Caves as geological heritage. Boletim Paranaense de Geociências, v. 70, p. 190-199, 2013.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika, v. 52, n. 3–4, p. 591–611, 1965.

TRAJANO, Eleonora; BICHUETTE, Maria Elina. Relevância de cavernas: porque estudos ambientais espeleobiológicos não funcionam. Espeleo-Tema, v. 21, n. 1, p. 105-112, 2010.

WHITE, William B.; WHITE, Elizabeth L. Geomorfologia Karst. Em: Cavernas e Karst do Vale Greenbrier na Virgínia Ocidental. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 45-62.

ZAR, Jerrold H. Biostatistical analysis. Pearson Education India, 1999.

REAPROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1 Ana Karla Vieira Santos, 2 Gleyson Tadeu de Almeida Santos, 3 Vanessa Lima de Souza, 4 Rosane Freire Boina, 5 Agda Eunice de Souza Albas, 6 Silvio Rainho Teixeira.

1 Faculdade de Ciência e Tecnologia (FCT) da Unesp, e-mail: ak.santos@unesp.br; 2 FCT Unesp, e-mail: gleyson.santos@unesp.br; 3 FCT Unesp, e-mail: vl.souza@unesp.br; 4 FCT Unesp, e-mail: rosane.freire@unesp.br; 5 FCT Unesp, e-mail: agda.souza@unesp.br; 6 FCT Unesp, e-mail: silvio.rainho@unesp.br.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição; revisão bibliográfica.

Introdução

Atualmente, a produção de cimento Portland é responsável por cerca de 8% do total anual de emissões de CO_2 em todo o mundo. A indústria também é contribuinte majoritária das taxas de emissão de outros gases de efeito estufa como, NO_X, SO_X, CO, H_2S, VOCs, dioxinas, furanos e material particulado (Habert *et al.*, 2020). Essa cadeia produtiva de grande magnitude, além da geração de gases que contribui com mais de 33% das emissões globais de CO_2, é responsável pela disposição de um alto volume de resíduos sólidos, diminuindo proporcionalmente a vida útil de aterros sanitários (Akhtar e Sarmah, 2018). Ocasionando a geração dos denominado resíduos de construção e demolição (RCD), que sobrecarregam o sistema de tratamento de resíduos devido ao seu alto volume e densidade (Liu *et al*., 2025).

Em 2024, o Brasil gerou cerca de 100,8 milhões de toneladas de RCD (ABREMA, 2026). Atualmente, no país, esses resíduos são classificados como resíduos inertes de Classe A, de acordo com a Resolução CONAMA 307/2002. Normalmente, o RCD brasileiro tende a conter compostos como o dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de cálcio (CaO), derivados de agregados de quartzo e pastas cimentícias (Komnitsas *et al*., 2015). Comumente, predominam nestes elementos as fases cristalográficas do quartzo, o silicato de cálcio hidratado e a calcita; elementos muito utilizados para o desenvolvimento de novos materiais para a mesma indústria (Bianchini *et al*., 2005).

O setor tem significativa participação no Produto Interno Bruto (PIB) de diversos países, sendo um alto consumidor de matéria prima. Estudos mostram que o consumo é de até 50% dos recursos minerais naturais mundialmente, o que gera até 35% dos resíduos totais que são direcionados a aterros sanitários, resíduos provindos de infraestrutura urbana, rodovias, pontes, viadutos e outros (Ajayi *et al*., 2015).

Com o objetivo de utilizar resíduos de construção e demolição e desenvolver novos materiais para a mesma indústria buscou analisar o avanço dos estudos número de estudos e novas tecnologias que estão sendo aplicadas para o reaproveitamento de RCD. Este trabalho teve como objetivo apresentar resultados que possam complementar os dados da literatura e contribuir para propostas de redução das emissões de gases de efeito estufa e da geração de resíduos sólidos, bem como da exploração intensiva de recursos naturais.

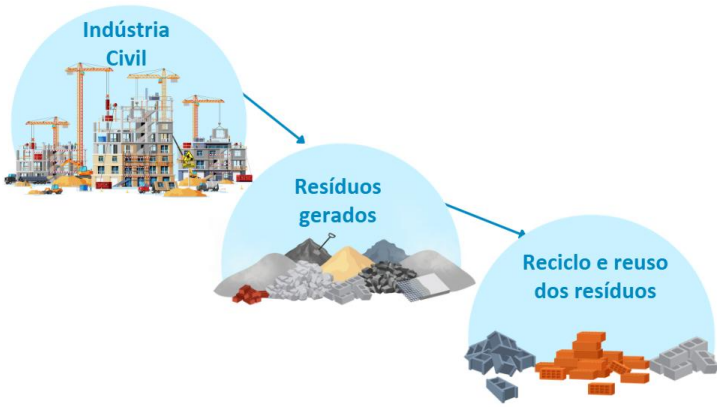


Figura 1 – Esquema de segmento da geração, disposição e reutilização dos RCD

Metodologia

Para realização do levantamento das bibliografias competentes à esta revisão foram realizadas buscas na base de dados Portal de Periódicos CAPES. As produções científicas apresentadas englobaram buscas de ordem de publicações internacionais e nacionais, selecionando trabalhos que apresentassem o RCD como tema principal, e posteriormente utilizado como materia prima na produção de novos materiais. Para seleção de trabalhos utilizou-se da palavra-chave "Construction and demolition waste".

Em seguida, foram filtrados os trabalhos de publicação internacional e depois os nacionais. A partir disso, foram inclusos nas pesquisas trabalhos científicos e técnicos, como artigos, revisões, dissertações, capítulos de livros, livros, etc., publicados entre os anos de 2001 a 2026, totalizando produções científicas dos últimos 25 anos.

Assim, após as buscas, os trabalhos encontrados foram analisados com o objetivo de selecionar aqueles em que o RCD foi aplicado no desenvolvimento e produção de novos materiais para a industria da construção civil. Os resultados obtidos foram organizados em tabelas, separando-os conforme a sua temática.

Resultados e Discussão

Análise da escala temporal

A pesquisa pelo termo "Construction and demolition waste" referente ao RCD mostrou um número grande de trabalhos publicados, sendo àqueles de origem internacional (3586) muito maiores que as produções nacionais (286). Ao se analisar a gama de publicações em blocos temporais, feitos em intervalos de 5 anos ao longo dos 25 anos totais, os últimos 10 anos, a partir de 2016, demonstraram uma taxa crescente de pesquisas relacionadas à temática proposta, como mostrados nas tabelas 1 e 2. pesquisas relacionadas à temática proposta, como mostrados nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Trabalhos sobre o RCD publicados internacionalmente

Tipo de publicação	N° total 2001-2026	2001-2006	2007-2011	2012-2016	2017-2021	2022-2026
Artigo	3378	106	182	351	910	1829
Capítulo de livro	3	-	-	1	1	1
Paratexto	1	1	-	-	-	-
Revisão	196	2	3	14	51	126
Pré-print	-	-	-	-	-	-
Livro	5	2	3	-	-	-
Dissertação	3	1	1	1	-	-
Conjunto de dados	-	-	-	-	-	-
Total	3586	112	189	367	962	1956

Tabela 2 – Trabalhos sobre o RCD publicados nacionalmente

Tipo de publicação	N° total 2001-2026	2001-2006	2007-2011	2012-2016	2017-2021	2022-2026
Artigo	274	3	17	31	99	124
Capítulo de livro	-	-	-	-	-	-
Paratexto	-	-	-	-	-	-
Revisão	12	-	-	-	4	8
Pré-print	-	-	-	-	-	-
Livro	-	-	-	-	-	-
Dissertação	-	-	-	-	-	-
Conjunto de dados	-	-	-	-	-	-
Total	286	3	17	31	103	132

A partir dos resultados do número de estudos que abordam os RCD observa-se, especialmente nos últimos 10 anos, uma clara tendência de amadurecimento científico neste campo. Esse crescimento reflete não apenas os avanços tecnológicos nas técnicas de reciclagem, como trituração, peneiramento e produção de agregados reciclados, mas também a pressão regulatória e ambiental global para mitigar as emissões de CO_2 e o esgotamento dos recursos naturais.

Os dados das Tabelas 1 e 2 indicam que predominam os artigos científicos tanto nos estudos internacionais quanto nos nacionais, sinalizando robustez metodológica e a aplicação prática de RCD em concreto, blocos e pavimentos etc. No contexto brasileiro, onde 100,8 milhões de toneladas de RCD foram geradas em 2024, a baixa proporção de publicações nacionais sugere oportunidades para pesquisas locais que abordem a reutilização deste tipo de resíduo.

Em comparação com a literatura internacional, os estudos nacionais concentram-se mais em aplicações práticas e regionais, mas carecem de revisões sistemáticas recentes, o que reforça a necessidade de integração entre a academia, a indústria e as políticas públicas para ampliar a reutilização e alinhar o país com políticas e ações alinhadas a sistemas como a economia circular. Assim, os resultados podem ajudar a aumentar o potencial dos RCD como matéria-prima sustentável, exigindo investimento em padronização e inovação para melhorar nos setores técnicos e econômicos.

Conclusões

Esta revisão pôde demonstrar que houve sim um aumento nas pesquisas sobre a reutilização dos RCD nos últimos 25 anos, com 3.586 publicações internacionais e 286 nacionais identificadas entre 2001 e 2026, sendo que os números aumentaram no período de 2017 a 2026. Esse aumento pode refletir em avanços tecnológicos e em uma maior aplicação de políticas e modelos produção e negócios atualmente mais sustentáveis. A partir da substituição de agregados naturais por RCD em concreto, argamassa e produtos pré-moldados etc., reduzindo as emissões de CO_2 pode-se então prolongar a vida útil dos aterros sanitários e amenizar a emissão de gases para a atmosfera.

Apesar do progresso, permanecem desafios, como a variabilidade qualitativa dos RCD, a falta de políticas integradas e a adoção limitada por parte das empresas de construção, exigindo incentivos legislativos, educação ambiental e inovação no processamento. Assim, a reutilização dos RCD surge como uma estratégia essencial para uma economia circular no setor da construção, minimizando os impactos ambientais e explorando os recursos naturais de maneira mais sustentável.

Agradecimentos

Este estudo foi parcialmente financiado pelo CDMF/FAPESP 2013/07296-2 – CEPID. Gostaríamos de agradecer ao Ministério Público do Estado de São Paulo e ao Ministério Público Federal pela implantação do Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos (LCGRS), onde este trabalho foi desenvolvido. O professor S. R. Teixeira agradece ao CNPq/Brasil pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa - PQ2 (306135/2022-1).

Referências bibliográficas

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262-281, 2018.

ABREMA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2025. São Paulo: ABREMA, 2025. Available: https://www.abrema.org.br/panorama/. Accessed: 17 mar. 2026.

BIANCHINI, G. *et al*. Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical–mineralogical appraisal. **Waste Management**, v. 25, n. 2, p. 149-159, 2005.

BRASIL. Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Portal de Periódicos da CAPES. Brasília, DF, 2026. Disponível em: www.periodicos.capes.gov.br. Acesso em: 02 mai. 2026.

CONAMA (Brasil). Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 7 jul. 2002.

HABERT, G. *et al*. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 11, p. 559-573, 2020.

KOMNITSAS, K. *et al*. Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers. **Advanced Powder Technology**, v. 26, n. 2, p. 368-376, 2015.

LIU, Y. *et al*. Overview of waste generation and carbon emissions in the construction industry. In: Wastes to Low-Carbon Construction Materials. **Woodhead Publishing**, 2025. p. 3-27.

UMA ANÁLISE COMPARATIVA SOBRE A GESTÃO DE RESÍDUOS RECICLÁVEIS NO BRASIL E EM PAÍSES DESENVOLVIDOS

1 Ana Paula Pastrez, 2 Bruna Rocha de Oliveira Avellar, 3 Edna Batista Rocha, 4 Jessica Luiza Bueno Trevizani, 5 Daiane Cristina de Freitas

1 Centro Universitário Internacional, e-mail: pastrezanapaula01@gmail.com; 2 Centro Universitário Internacional, e-mail: bruna.av@uninter.com; 3 Centro Universitário Internacional, e-mail: edna.ro@uninter.com; 4 Centro Universitário Internacional, e-mail: jessica.t@uninter.com; 5 Centro Universitário Internacional, e-mail: daiane.fr@uninter.com

Palavras-chave: Resíduos sólidos; Destinação ambientalmente adequada; Responsabilidade cidadã.

Introdução

A transição de uma sociedade agrária para uma sociedade industrializada resultou no aumento expressivo da produção de bens e, consequentemente, na intensificação da geração de resíduos sólidos. Esse processo passou a demandar maior atenção a partir do momento em que seus impactos ambientais e sociais se tornaram evidentes, o que impulsionou o desenvolvimento de sistemas de gestão de resíduos (WILSON, 2007). No Brasil, a estruturação institucional do setor foi fortalecida com a criação do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB), em 2007. Posteriormente, com a instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), por meio da Lei nº 12.305/2010, que estabeleceu diretrizes específicas e responsabilidades compartilhadas para a gestão e destinação ambientalmente adequada dos resíduos sólidos (BRASIL, 2007; 2010). Embora existam esses avanços normativos, a gestão de resíduos recicláveis no país ainda apresenta limitações significativas, especialmente no que se refere à eficiência da coleta seletiva, à segregação na fonte e à recuperação de materiais. Nesse contexto, torna-se fundamental analisar o desempenho do modelo brasileiro na gestão de resíduos, comparando-o com modelos já implementados em países desenvolvidos, de forma a subsidiar propostas posteriores de aprimoramento ao modelo brasileiro.

Materiais e Métodos

Este estudo caracterizou-se como uma pesquisa de abordagem qualitativa, baseada em análise bibliográfica e documental. Foram selecionadas publicações científicas, legislações, relatórios institucionais e documentos oficiais relacionados à gestão de resíduos recicláveis no Brasil e nos países desenvolvidos selecionados para o trabalho: Japão, Suécia e Alemanha.

O levantamento de dados abrangeu publicações compreendidas entre os anos de 2000 e 2025. As bases de pesquisa consultadas incluíram SciELO, Google Acadêmico e repositórios institucionais de órgãos de relevância técnica, como a Associação Brasileira de Empresas de Resíduos e Limpeza Pública (ABREMA), antiga (ABRELPE) e o Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA).

Também foram consultados e incluídos na análise: bases de dados internacionais e portais oficiais dos países desenvolvidos, tais como relatórios da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD), da Associação de Cidades e Regiões para a Gestão Sustentável de Recursos (ACR+), da Comissão Europeia, da Umweltbundesamt (Alemanha), da Avfall Sverige (Suécia) e do Ministério do Meio Ambiente do Japão (MOEJ), além da Diretiva 1999/31/EC da União Europeia.

As buscas bibliográficas foram realizadas por meio de combinações de termos em português e inglês, selecionados de acordo com os eixos temáticos da pesquisa, que envolvem a gestão de resíduos recicláveis, instrumentos de política pública e modelos internacionais de referência. Foram utilizadas as seguintes buscas: “resíduos recicláveis”, “Política Nacional de Resíduos Sólidos”, “logística reversa”, “coleta seletiva”, “solid waste management”, “recycling municipal waste”, “deposit-refund systems”, “extended producer responsibility”, “waste management in Sweden”, “German recycling system” e “Japan recycling system”. A utilização desses termos permitiu a identificação de estudos, relatórios técnicos e documentos normativos relevantes para a análise comparativa. As legislações brasileiras especialmente a Lei nº 12.305/2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos), o Decreto nº 7.404/2010 e o Decreto nº 10.936/2022 foram utilizadas como referência normativa principal, complementadas por normativas internacionais, como a Diretiva 1999/31/EC da União Europeia.

Foram considerados como parâmetros: a composição gravimétrica dos resíduos, o potencial de reciclabilidade em relação às taxas efetivas de recuperação, o índice de acesso da população aos serviços de coleta e as formas de destinação final adotadas. Também foram analisados aspectos inerentes à organização dos sistemas de coleta seletiva, à presença de mecanismos de responsabilidade estendida do produtor e à adoção de instrumentos econômicos e normativos que influenciam a segregação na fonte. Esses critérios tiveram o objetivo de identificar as diferenças na eficiência e na estrutura dos modelos analisados.

Resultados e Discussões

Os parâmetros de referência para a análise comparativa do modelo brasileiro de gestão de resíduos sólidos, permitiram estabelecer um paralelo com experiências internacionais, evidenciando discrepâncias na eficiência e na organização dos sistemas de gestão.

A análise da composição gravimétrica dos resíduos sólidos recicláveis no Brasil indica que materiais recicláveis secos, como vidro, metal, plástico e papel, correspondem a aproximadamente 31% do total coletado. Considerando a produção anual de 88,11 milhões de toneladas. Isso equivale a 27.31 toneladas de reciclagem. No entanto, 23,2% da massa total coletada não é recuperada por diversos fatores, entre eles: falhas na coleta regular, ausência de segregação na fonte e destinação a aterros em

decorrência da coleta indiscriminada. Além disso, apenas 1,17 milhão de toneladas/ano de recicláveis secos são efetivamente recuperadas, evidenciando perdas expressivas de materiais com valor econômico e ambiental (SINISA, 2024).

Além disso, 8,9% da população brasileira, equivalente a aproximadamente 18,3 milhões de habitantes, ainda não possui acesso à coleta regular, permanecendo à margem do sistema formal de gestão, o que implica na destinação inadequada dos resíduos e na perda do potencial de reaproveitamento desses materiais (SINISA, 2024).

No que se refere à destinação final, 74,4% dos resíduos coletados são encaminhados para aterros sanitários. Embora represente uma melhoria em relação a cenários anteriores, esse dado não reflete uma gestão plenamente eficiente, uma vez que materiais recicláveis continuam sendo destinados à disposição final, em desacordo com a hierarquia estabelecida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010; SINISA, 2024).

No contexto internacional, observam-se diferenças estruturais relevantes nos sistemas de gestão de resíduos. Na Alemanha, a taxa de reciclagem de resíduos municipais atingiu 67,2% em 2023, resultado da combinação entre coleta seletiva estruturada, triagem avançada e instrumentos econômicos associados à responsabilidade estendida ao gerador (UMWELTBUNDESAMT, 2023). Destaca-se, nesse contexto, a aplicação do sistema de depósito e retorno, que proporciona taxas superiores a 90% de retorno de embalagens como PET e alumínio, assegurando elevada qualidade dos materiais reciclados (OECD, 2022; ACRPLUS, 2023; EUROPEAN COMMISSION, 2021).

No Japão, a gestão de resíduos sólidos urbanos é caracterizada pela obrigatoriedade da segregação na fonte, organizada em múltiplas categorias e aliada a políticas consistentes de educação ambiental e fiscalização. Esse modelo contribui para a melhoria da qualidade dos materiais recicláveis e para maior eficiência operacional do sistema (MOEJ, 2016). Adicionalmente, fatores territoriais, como a elevada densidade populacional e a limitação de áreas para disposição final, influenciam na adoção de uma ampla infraestrutura de incineração, com aproximadamente 1900 unidades em operação. Isso permite a redução significativa do volume de resíduos e a recuperação energética associada ao processo (LIMA R.; GOMES, 2005; SILVA et al., 2018).

Na Suécia, observa-se um modelo consolidado que integra reciclagem do material e recuperação energética, orientado pela hierarquia de gestão de resíduos estabelecida em sua política nacional. Desde 2002, o país adotou medidas restritivas à disposição em aterros, como a proibição do envio de resíduos orgânicos e o pagamento de taxas pela disposição (atrelado ao peso em tonelada). Assim, ocorre o incentivo ao direcionamento dos resíduos para reciclagem e incineração com aproveitamento energético. Dessa forma, o sistema sueco de gestão de resíduos combina coleta seletiva, triagem mecanizada e geração de energia, sendo respaldado por diretrizes nacionais e europeias (AVFALL SVERIGE, 2023; EUROPEAN UNION, 1999).

A comparação entre os contextos mostra diferenças significativas na eficiência dos sistemas de gestão de resíduos, associadas principalmente ao grau de estruturação da coleta seletiva, à qualidade da segregação na fonte e à presença de instrumentos econômicos e normativos que influenciam o comportamento dos geradores de resíduos.

Destaca-se, ainda, a importância da incorporação de instrumentos que promovam a responsabilidade cidadã, por meio de incentivos econômicos e de educação ambiental, como elemento central para o aumento da taxa de recuperação de recicláveis e para a construção de um sistema mais eficiente e alinhado às práticas sustentáveis internacionais.

Os resultados indicam que a predominância da coleta indiferenciada, a baixa segregação na fonte e a fragilidade dos instrumentos de incentivo resultam em taxas de recuperação significativamente inferiores às observadas em países desenvolvidos.

Conclusão

A análise realizada mostrou que, mesmo diante dos avanços normativos proporcionados pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, a gestão de resíduos recicláveis no Brasil ainda apresenta limitações estruturais que comprometem o aproveitamento do potencial de reciclabilidade existente no país.

Existe a predominância da coleta indiferenciada, a baixa segregação na fonte e a fragilidade dos instrumentos de incentivo que resultam em taxas de recuperação inferiores às observadas em países desenvolvidos.

Dessa forma, concluiu-se que o aprimoramento da gestão de resíduos recicláveis no Brasil depende da articulação entre políticas públicas eficazes, investimentos em infraestrutura e ampliação dos mecanismos de responsabilidade estendida do produtor.

Referências Bibliográficas

ABREMA. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024: ano-base 2023. São Paulo: Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, 2024. Disponível em: https://www.abrema.org.br/panorama/. Acesso em: jun. 2025.

ACRPLUS. Deposit-Return Systems in the EU – 2023 Update. Bruxelas: Association of Cities and Regions for Sustainable Resource Management, 2023. Disponível em: https://www.acrplus.org/media/origin/images/technical-reports/2023_ACR_Deposit_Refund_Systems_EU_Report.pdf?utm_source. Acesso em: set. 2025.

AVFALL SVERIGE - SWEDISH WASTE MANAGEMENT. Swedish Waste Management 2023. Malmö: Avfall Sverige, 2023. Disponível em: https://www.avfallsverige.se/media/cwibhsx2/svensk_avfallshantering_2023_en.pdf?utm_source. Acesso em: set. 2025.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: jul. 2025.

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. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: ago. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. Deposit Refund Schemes: factsheet. Bruxelas: European Commission, 2021. Disponível em: https://environment.ec.europa.eu/system/files/2021-10/Deposit%20Refund%20Schemes.pdf?utm_source. Acesso em: set. 2025.

EUROPEAN UNION. Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste. Official Journal of the European Communities, 1999. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31999L0031. Acesso em: set. 2025.

LIMA, R.; GOMES, Helder; RANGEL, Nelson. O tratamento dos resíduos sólidos urbanos no Japão: caso particular da incineradora de Toshima. Indústria e Ambiente, n. 37, p. 10-17, 2005.

MINISTRY OF THE ENVIRONMENT OF JAPAN (MOEJ). Establishing a Sound Material-Cycle Society. Tokyo: MOEJ, 2016. Disponível em: https://www.env.go.jp/content/900453393.pdf?utm_source. Acesso em: set. 2025.

OECD - ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. Deposit-refund systems and the interplay with additional mandatory Extended Producer Responsibility policies. Paris: OECD, 2022. Disponível em: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2022/12/deposit-refund-systems-and-the-interplay-with-additional-mandatory-extended-producer-responsibility-policies_c92a063b/a80f4b26-en.pdf?utm_source. Acesso em: set. 2025.

SILVA, Tamires Raquel; VENÂNCIO, Taís Mota; BRITTO JÚNIOR, Antônio Olívio Silveira; DE CARVALHO JUNIOR, Francisco Humberto. Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos no Japão: história e atualidade. Conexões - Ciência e Tecnologia, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 72–78, 2018. DOI: 10.21439/conexoes.v12i1.1082. Disponível em: https://doi.org/10.21439/conexoes.v12i1.1082 . Acesso em: nov. 2025.

UMWELTBUNDESAMT. Indicator: Recycling municipal waste. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2025. Disponível em: https://www.umweltbundesamt.de/en/data/environmental-indicators/indicator-recycling-municipal-waste. Acesso em: nov. 2025.

WILSON, David C. Development drivers for waste management. Waste Management & Research, v. 25, n. 3, p. 198–207, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/6226122_Development_drivers_for_waste_management. Acesso em: mai. 2025.

PRODUÇÃO DE FIBRAS POLIMÉRICAS A PARTIR DE COPOS DESCARTÁVEIS DE POLIESTIRENO COM ADIÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO

1 Beatriz Marques Carvalho, 2 Gabriel da Cruz Dias, 3 Vitor Hugo Uzeloto Fernandes Mingroni, 4 Thuany Maraschin, 5 Rosane Freire Boina, 6 Deuber Lincon da Silva Agostini

1 Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNESP, campus de Presidente Prudente - SP, e-mail: beatriz.carvalho@unesp.br; 2 Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá - PR, e-mail: gcdias@uem.br; 3 Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNESP, campus de Presidente Prudente - SP, e-mail: v.mingroni@unesp.br; 4 Faculdade de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS), email: thuany.maraschin@hotmail.com; 5 Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNESP, campus de Presidente Prudente - SP, e-mail: rosane.freire@unesp.br; 6 Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNESP, campus de Presidente Prudente - SP, e-mail:deuber.agostini@unesp.br

Palavras-chave: Poliestireno; Eletrofiação; Óxido de grafeno.

Introdução

O aumento da geração de resíduos plásticos tem se consolidado como um dos principais desafios ambientais da atualidade, especialmente devido à elevada durabilidade desses materiais e à dificuldade de degradação no meio ambiente [1]. Dentre os polímeros amplamente utilizados, o poliestireno (PS) destaca-se pela sua aplicação em produtos descartáveis, como copos e embalagens, por ser de boa processabilidade, baixo custo, rigidez e transparência [2]. O copo descartável um dos plásticos mais utilizados no cotidiano das pessoas, por ser descartado logo após seu uso, resulta em volumes significativos de resíduos gerados [3]. Nesse contexto, estratégias que promovam a reciclagem e a valorização desses materiais tornam-se fundamentais para a mitigação dos impactos ambientais associados ao seu descarte inadequado.

A eletrof iação tem se destacado como uma técnica simples, versátil e eficiente para a produção de fibras poliméricas com diâmetros na escala micro e nanométrica. O processo baseia-se na aplicação de um campo elétrico de alta tensão para a formação de jatos poliméricos que se solidificam, produzindo fibras com elevada área superficial e alta porosidade. [4]. Essas características tornam os materiais eletrofiados altamente promissores para diversas aplicações, especialmente na área ambiental, como na remoção de contaminantes por adsorção.

Além dos materiais poliméricos, a incorporação de nanomateriais, como o óxido de grafeno (GO), tem sido explorada com o objetivo de modificar as propriedades estruturais e superficiais das fibras, promovendo melhorias na uniformidade, na área específica e na interação com diferentes tipos de contaminantes [5]. O GO, destaca-se por sua elevada área superficial e pela presença de grupos funcionais oxigenados, que favorecem interações físico-químicas com diversas substâncias [6].

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo produzir fibras eletrofiadas a partir de poliestireno reciclado proveniente de copos descartáveis, com e sem a incorporação de óxido de grafeno, visando avaliar a influência desse nanomaterial na morfologia das fibras obtidas. A caracterização foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e posteriormente pelo *software* livre *Image J*, permitindo a análise do diâmetro médio das fibras.

Material e Método

Materiais

Neste trabalho utilizou-se copos descartáveis transparentes feitos de poliestireno (PS), o aditivo óxido de grafeno (GO) que foi sintetizado pela Dra. Thuany Maraschin da Faculdade de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS), junto ao Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais e o solvente N,N-dimetilformamida (DMF) (99,8%), comercializado pela Synth.

Métodos

Inicialmente, foram preparadas as soluções poliméricas em duplicata a partir de copos descartáveis transparentes de poliestireno (PS). O material foi previamente cortado em fragmentos menores, a fim de facilitar sua dissolução no solvente. Em seguida, o material foi dissolvido em N,N-dimetilformamida (DMF), obtendo-se soluções com concentração de 30% (m/m), mantidas sob agitação magnética por 2 horas, à temperatura ambiente (25 ºC), até completa homogeneização.

Para a obtenção da solução modificada, adicionou-se óxido de grafeno (GO) em concentração de 4% em relação à massa de poliestireno em uma das soluções preparadas. Em seguida, a dispersão foi submetida à sonicação por meio de ultrassom de ponta por 25 minutos, com o objetivo de promover a adequada dispersão do nanomaterial na matriz polimérica.

Após a preparação das soluções, iniciou-se a etapa de produção das fibras por eletrofiação. Para isso, utilizou-se uma tensão elétrica de 10 kV, um fluxo de vazão da solução de 1 mL/h e distância de 12 cm entre a ponta da agulha e o coletor rotativo. O coletor foi operado a uma velocidade de rotação de 215 rpm. O processo ocorreu em temperatura ambiente (25 ºC) e uma umidade relativa de 70%. As fibras formadas foram depositadas sobre um coletor rotativo revestido com papel alumínio, com dimensões de 12 × 12 cm, para realização da caracterização morfológica por MEV.

Resultados e Discussão

A análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV) confirmou a formação de fibras contínuas em ambas as amostras. As fibras de PS puro apresentaram superfície relativamente uniforme e ausência de defeitos estruturais significativos. Já as fibras contendo 4% de GO apresentaram morfologia semelhante, porém com a presença pontual de *beads,* distribuídos ao longo da estrutura fibrosa.

A análise da distribuição dos diâmetros revelou diferenças importantes entre as amostras. As fibras de PS puro apresentaram diâmetro médio de 3,27 µm, com variação entre 1,5 e 5,5 µm. Por outro lado, as fibras contendo GO apresentaram diâmetro médio reduzido, de aproximadamente 2,20 µm, com distribuição entre 1 e 4 µm, evidenciando a formação de fibras mais finas e com menor dispersão de diâmetros.

Essa redução nos diâmetros pode ser explicada por alguns fatores. Primeiramente, a formação de *beads* implica concentração localizada de material polimérico, reduzindo a quantidade de material disponível ao longo do jato para o estiramento mecânico, contribuindo, assim, para a formação de fibras mais finas. Adicionalmente, a presença do GO aumenta a condutividade elétrica da solução, favorecendo a mobilidade de cargas sob a ação do campo elétrico aplicado. Esse efeito intensifica as forças eletrostáticas atuantes no jato durante o processo de eletrofiação, promovendo maior alongamento e, consequentemente, a formação de fibras com diâmetro reduzido [7].

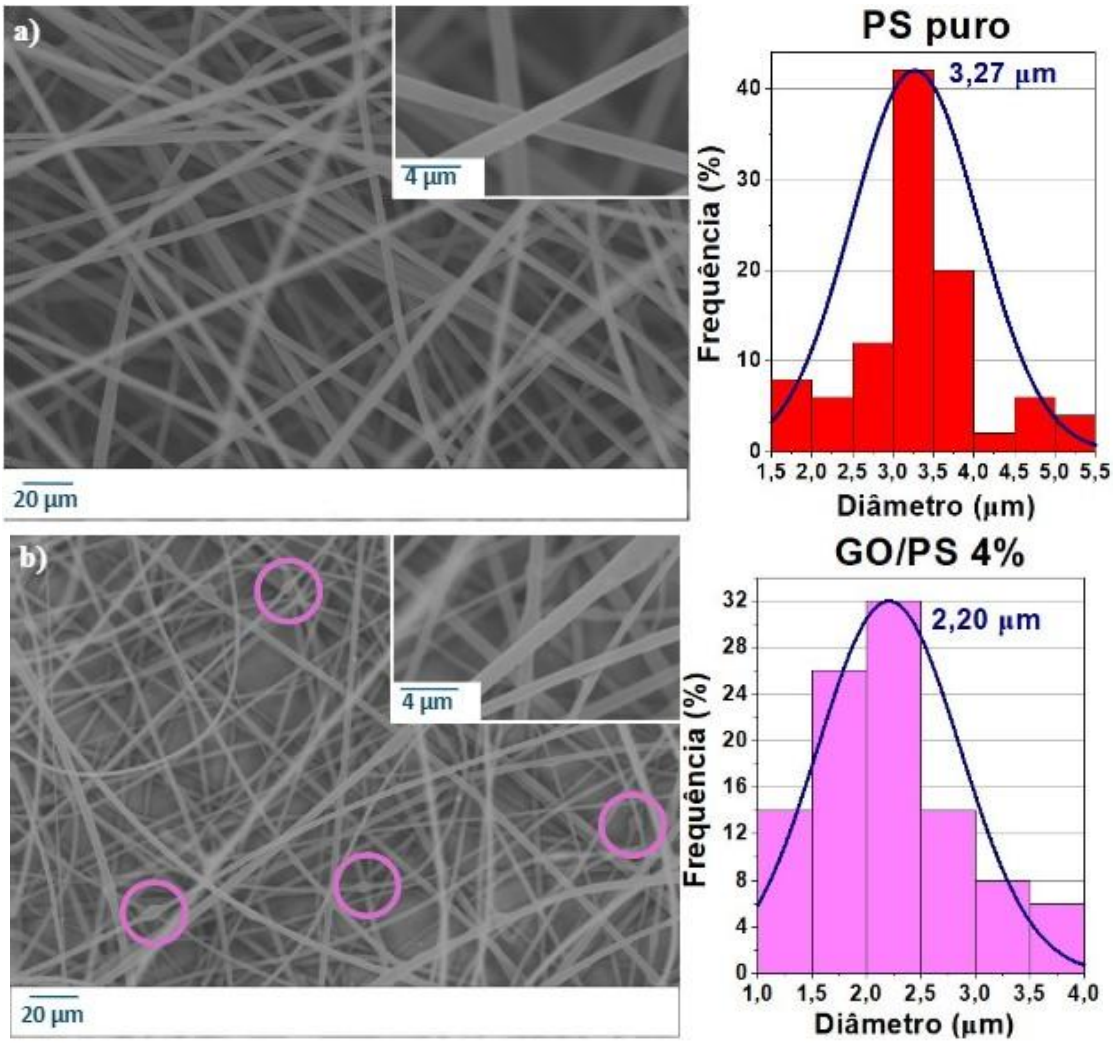


Figura 1: Imagens de MEV das fbras de poliestireno puro (a) e com 4% de óxido de grafeno (b). Fonte: O Autor (2026).

Considerações Finais

Pode-se concluir que é possível produzir fibras do polímero poliestireno proveniente de copos descartáveis usando a técnica de eletrofiação. As fibras obtidas apresentaram morfologia contínua, com diâmetros na escala micrométrica, confirmando a eficiência do processo nas condições empregadas. A incorporação de óxido de grafeno influenciou diretamente as características morfológicas das fibras, promovendo a redução do diâmetro médio e contribuindo para uma distribuição mais homogênea, ainda que com a presença pontual de *beads*. Como perspectiva futura, pretende-se aprofundar os estudos de adsorção, com foco na remoção de contaminantes oleosos.

Agradecimentos

Os Autores agradecem ao CNPq, LabMEV – FCT/Unesp, INEO e FAPESP. Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências Bibliográficas

PERTUSSATTI, Caroline Alvarenga. GESTÃO AMBIENTAL DE RESÍDUOS PLÁSTICOS NO BRASIL: Subsídios para uma Diretriz Nacional. Brasília- DF, abril de 2020.

TRINDADE, L. C. Influência da extrusão no stress cracking de filmes de poliestireno. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande.

VASCONCELOS, Yuri. Planeta Plástico. Revista Pesquisa Fapesp, Edição 281, jul. 2019. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/planeta-plastico/. Acesso em: 28 out. 2025.

XUE, Jiajia et al. Electrospinning and electrospun nanofibers: Methods, materials, and applications. Chemical reviews, v. 119, n. 8, p. 5298-5415, 2019.

AKANJI, Isaiah Olufemi et al. Polystyrene-reduced graphene oxide composite as sorbent for oil removal from an Oil-Water mixture. Chemical Engineering Science, v. 298, p. 120383, 2024.

SHAH, Rahim et al. Progression from graphene and graphene oxide to high performance polymer-based nanocomposite: A review. Polymer-Plastics Technology and Engineering, v. 54, n. 2, p. 173-183, 2015.

COSTA, Rodrigo GF; RIBEIRO, Caue; MATTOSO, Luiz HC. Preparation and Characterization of PVA–Ag Nanocomposite Fibers with Antibacterial Activities. Science of Advanced Materials, v. 2, n. 2, p. 157-162, 2010.

COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS EM EVENTO DE CORRIDA DE RUA

1Anita Loyane Mendonça de Souza, 2Kelly Isabel Werneck de Oliveira, 3Noémia Antónia Afonso Mavinga, 4Larissa Rodrigues Souza Costa, 5Bruna Fernanda Faria Oliveira, 6Sueli Moura Bertolino

1 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: anita.loyane@ufu.br; 2 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: kelly.oliveira@ufu.br; 3 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: noemia.mavinga@ufu.br; 4 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: bruna.faria@ufu.br; 4 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: suelibertolino@ufu.br

Palavras-chave: resíduos sólidos; eventos de corrida de rua; sustentabilidade;

Introdução

A corrida de rua, antes vista como uma prática esportiva individual e acessível, passou a ter maior relevância social, econômica e ambiental nas últimas décadas (Delfs, 2025). Esse crescimento aumentou a necessidade de discutir os impactos desses eventos, principalmente sobre a perspectiva da sustentabilidade. Segundo Hugaerts et al. (2021), o esporte pode contribuir para o desenvolvimento sustentável ao incentivar práticas mais responsáveis de consumo e produção. Assim, torna-se essencial incorporar ações sustentáveis em eventos esportivos, já que eles envolvem uso intenso de recursos e geração significativa de resíduos em pouco tempo (Silva, 2022). Entre os principais impactos ambientais das corridas de rua, destaca-se a geração de resíduos sólidos. Sua gestão adequada é fundamental para reduzir danos ao meio ambiente, devendo seguir uma hierarquia que prioriza redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final adequada (Galavote et al., 2023).

Dessa forma, analisar a geração de resíduos em eventos esportivos auxilia tanto no diagnóstico ambiental quanto no planejamento de estratégias mais eficientes, alinhadas à economia circular (Silva, 2022), contribuindo para a redução de impactos ambientais, otimização do uso de recursos e promoção de práticas sustentáveis que podem ser replicadas em diferentes contextos e escalas de eventos. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo caracterizar a geração de resíduos sólidos na 10ª Corrida da AME (Atrofia Muscular Espinhal), incluindo sua composição gravimétrica e geração per capita, além de estabelecer comparações com dados disponíveis na literatura.

Material e Métodos

O estudo foi realizado durante a 10ª Corrida da AME, no dia 11 de agosto de 2024, nas imediações do Parque do Sabiá, no município de Uberlândia. Os dados referentes à geração de resíduos sólidos foram fornecidos pela organização do evento, o Instituto Viva Iris, sendo originalmente obtidos por meio de levantamento realizado por empresa terceirizada especializada, responsável pela quantificação das frações geradas durante a corrida.

A empresa responsável disponibilizou infraestrutura adequada para segregação na fonte. A Figura 01 apresenta o coletor com capacidade de 500 L equipado com bag e destinado aos resíduos recicláveis. Também foram utilizadas bombonas de 100 L para acondicionamento de resíduos orgânicos e rejeitos.



Figura 01: Coletor de 500L para recicláveis
Fonte: Instagram Seu Lixo Coleta

A disposição dos coletores foi planejada estrategicamente ao longo do percurso da corrida e na arena pós-prova, com o objetivo de facilitar o descarte adequado pelos participantes. Considerando as características do evento, eram esperadas as seguintes tipologias de resíduos: resíduos orgânicos, compostos principalmente por cascas de frutas; rejeitos, incluindo sachês de gel isotônico, embalagens engorduradas e materiais laminados; e resíduos recicláveis, como papel, plástico e metal.

Ao término do evento, todos os coletores foram recolhidos pela empresa responsável e encaminhados a um depósito para realização da pesagem e triagem dos materiais coletados. Após a segregação, os resíduos recicláveis foram destinados à reciclagem, os resíduos orgânicos à compostagem e os rejeitos encaminhados para disposição final em aterro sanitário.

Resultados e Discussão

A Tabela 01 apresenta os resultados referente à quantificação gravimétrica do evento.

Composição Gravimétrica							
Frações	Papelão	Copos de água mineral	PET	Plástico cristal	Alumínio	Orgânicos	Total
Peso (kg)	119	13,3	9	9	0,6	33	183,9

Tabela 01: Quantificação gravimétrica da 10ª Corrida da AME.
Fonte: Relatório de Coleta Seu Lixo.

A Figura 03 apresenta a composição gravimétrica dos resíduos do evento.

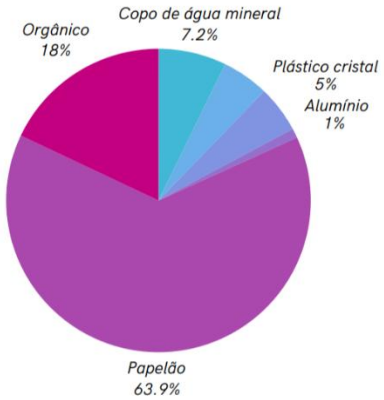


Figura 03: Composição Gravimétrica dos resíduos do evento.
Fonte: Relatório de Coleta Seu Lixo.

A composição gravimétrica dos resíduos evidenciou predominância da fração reciclável, com destaque para o papelão. A elevada contribuição do papelão está associada às atividades logísticas do evento, especialmente ao acondicionamento e transporte de insumos, como água mineral, alimentos, brindes, troféus, medalhas, entre outros. Esse resultado indica que parcela significativa dos resíduos gerados está relacionada às etapas operacionais do evento, e não exclusivamente ao consumo dos participantes.

Os resíduos orgânicos corresponderam a 18% do total, sendo provenientes principalmente do consumo de frutas e restos de alimentos. No contexto urbano brasileiro, apenas 0,4% dos resíduos sólidos são destinados à compostagem (ABREMA, 2025), o que evidencia a predominância de sua disposição em aterros sanitários. Por se tratar da segunda fração mais representativa no presente estudo, destaca-se o elevado potencial de valorização desses materiais. Nesse sentido, a compostagem adotada pela empresa responsável configura-se como uma estratégia adequada de gestão, contribuindo para o desvio de aterro.

Embora a fração plástica não tenha sido a predominante em termos de massa, sua relevância ambiental é significativa, sobretudo em função de sua baixa degradabilidade e do longo tempo de permanência no ambiente (Foresti; Oliveira; Jacques, 2020). Os resíduos plásticos gerados de uso único, como copos descartáveis, possuem relevante potencial de impacto ambiental.

Nesse contexto, destaca-se a importância da implementação do gerenciamento adequado de resíduos. A adoção de estratégias como a segregação na fonte, realizada no evento por meio da separação entre resíduos orgânicos e recicláveis ainda no local de geração, favorece o encaminhamento correto dos materiais. Essa prática viabiliza a reciclagem dos resíduos secos e a compostagem dos orgânicos, contribuindo para a redução do volume destinado a aterros sanitários e para uma destinação final ambientalmente adequada

Segundo a organização do evento, a 10ª edição contou com 1215 inscritos, sendo que, ao considerar voluntários e demais participantes, estima-se um público ainda maior. Considerando o número de inscritos e a quantidade total de resíduos, a geração per capita foi de 0,15 kg/pessoa. A Tabela 02 apresenta a comparação desse indicador com valores reportados na literatura para eventos de corrida (Puangmanee; Saearlee, 2021) e na literatura cinzenta, por meio de dados obtidos nos sites de eventos de corrida (London Marathon Events, 2023) (Run Rome Marathon, 2025).

Evento de corrida	Geração per capita (kg/pessoa.dia)
10ª Corrida da AME	0,15
Maratona Internacional em Phuket (2019)	0,31 - 0,37
Maratona de Londres (2023)	0,58
Maratona Run Rome (2025)	0,64

Tabela 02: Geração per capita de eventos de corrida.
Fonte: Elaborado pelos autores com base em Puangmanee e Saearlee (2021), London Marathon Events (2023) e Run Rome Marathon (2025).

O evento de corrida objeto de estudo apresentou geração per capita inferior à observada em eventos internacionais, o que pode ser atribuído a diversos fatores. Dentre eles, destaca-se a adoção, por parte da organização, de estratégias de redução na fonte, como a não utilização de sacos plásticos para embalar as frutas e o diálogo com patrocinadores visando à diminuição do uso de plásticos nos produtos distribuídos. Tais iniciativas podem ter contribuído para os menores valores registrados. Segundo Mair e Laing, (2012), as opiniões e valores de organizadores de eventos em relação à sustentabilidade ambiental são fatores determinantes para a efetividade das estratégias de gestão implementadas.

Apesar disso, a menor geração per capita não implica ausência de impacto ambiental. Eventos de pequeno e médio porte são mais numerosos e ocorrem com maior frequência, de modo que, em uma perspectiva global, podem representar um impacto ambiental potencialmente superior ao dos eventos de grande escala (Alguacil et al., 2026)**.** Destaca-se a importância de analisar os impactos ambientais de eventos de pequeno porte, especialmente em função de suas características e da recorrência com que são realizados (Mchunu, 2021).

Nesse contexto, embora a menor geração per capita observada não elimine a necessidade de avaliação contínua e da adoção de práticas sustentáveis, diante do potencial de impactos acumulados ao longo do tempo, o evento pode configurar-se como uma referência relevante para iniciativas semelhantes, especialmente para eventos de pequeno porte.

Considerações finais

A caracterização gravimétrica e a análise da geração per capita evidenciaram a relevância do gerenciamento adequado de resíduos sólidos na condução de eventos esportivos, destacando seu papel na mitigação dos impactos ambientais decorrentes de sua geração. A composição gravimétrica mostrou-se uma ferramenta importante não apenas para quantificar as frações geradas, mas também para subsidiar decisões mais eficientes de gestão.

Na 10ª Corrida da AME, a predominância de materiais recicláveis, especialmente o papelão, demonstra que parcela significativa dos materiais descartados está associada à estrutura logística do evento, evidenciando que a sustentabilidade deve ser incorporada desde as etapas de planejamento, aquisição de insumos e organização operacional. Somado a isso, a segregação na fonte, a destinação adequada dos recicláveis e a compostagem da fração orgânica evidenciam a adoção de estratégias ambientalmente adequadas, refletidas em um gerenciamento eficiente, compatível com as características das diferentes frações geradas.

O evento adotou estratégias relevantes para a mitigação dos impactos ambientais decorrentes da geração de resíduos, especialmente por meio da segregação adequada, do encaminhamento correto das frações geradas e da destinação final ambientalmente adequada. Tais ações contribuem para o desvio de resíduos de aterros sanitários e para o fortalecimento de iniciativas voltadas à valorização e recuperação de materiais em eventos esportivos. Ademais, a baixa geração per capita observada, reforça a efetividade das estratégias ambientais adotadas e evidencia o potencial da Corrida da AME em consolidar-se como referência para iniciativas semelhantes, especialmente no contexto de eventos esportivos de pequeno porte. Dessa maneira, eventos de corrida de rua demonstram potencial para atuar como importantes espaços de disseminação de práticas sustentáveis, contribuindo para a redução dos impactos ambientais relacionados à sua realização.

Assim, conclui-se que a caracterização dos resíduos sólidos na 10ª Corrida da AME possibilitou a análise da composição gravimétrica, por meio da avaliação das frações predominantes e das etapas de gerenciamento, além de estimar a geração per capita e compará-la com dados da literatura, contribuindo para o avanço das discussões sobre a geração de resíduos em eventos de corrida de rua.

Contribuições futuras devem concentrar-se na ampliação dos estudos sobre a gestão de resíduos sólidos em eventos de corrida, abrangendo não apenas as etapas de gerenciamento pós-geração, mas também estratégias preventivas voltadas à redução na fonte, à educação ambiental e ao planejamento sustentável dos eventos. Além disso, destaca-se a necessidade de maior produção científica sobre a geração de resíduos em eventos esportivos de pequeno e médio porte, considerando sua elevada frequência de realização e seu potencial de impacto ambiental acumulado ao longo do tempo.

Agradecimentos

Primeiramente, agradecemos a Deus pela graça e perseverança. Somos gratos aos organizadores e colaboradores da 10ª Corrida da AME pelo apoio e contribuição. Agradecemos às Prof.ªs Dr.ªs Bruna Faria e Sueli Bertolino pelas orientações valiosas, à FAPEMIG e ao Empreendedorismo Ambiental pelo incentivo.

Referências Bibliográficas

ALGUACIL, Mario et al. Environmental impacts of participants in small-scale sporting events. Humanities and Social Sciences Communications, v. 13, n. 1, 1 dez. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE (ABREMA). PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL. 2025. Disponível em https://www.abrema.org.br/panorama/ Acesso em 23 abr. 2025.

DELFS, Yasmin. Corrida de rua: O esporte incentivador da economia, da saúde pública, do turismo e do desenvolvimento de tecnologia.2025, p.91. TCC (Graduação) - Ciências Econômicas, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2025

FORESTI, Teofanes; OLIVEIRA, Branca Freitas de; JACQUES, Jocelise Jacques de. ANÁLISE COMPARATIVA DA DEGRADABILIDADE DE COPOS DESCARTÁVEIS UTILIZANDO O MÉTODO G160 DA ASTM. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 9, n. esp., p. 287-303, 18 ago. 2020.

GALAVOTE, Tânia et al. Assessment of the effect of strengthening selective collection in the municipal solid waste management costs. Urbe, v. 15, 2023.

LONDON MARATHON EVENTS. London Marathon Events Environmental Report 2023. 2023. About us, Sustainability. Disponível em: https://xd.adobe.com/view/3b3f2866-8527-4e74-9679-16051dfd9203-6e6c/?fullscreen Acesso em 24 abr. 2025.

MAIR, Judith; LAING, Jennifer. The greening of music festivals: Motivations, barriers and outcomes. Applying the Mair and Jago model. Journal of Sustainable Tourism, v. 20, n. 5, p. 683–700, jun. 2012.

MCHUNU, Ayanda. Environmental Impacts of Small-Scale Sporting Events. School of Tourism and Hospitality, College of Business and Economics, University of Johannesburg, nov. 2021.

PUANGMANEE, Sineenart; SAEARLEE, Malik. MANAGEMENT OF SOLID WASTE FROM PHUKET INTERNATIONAL MARATHON RUNNING EVENT. International Journal of Environmental Impacts, v. 4, n. 3, p. 289–301, 1 set. 2021.

RUN ROME THE MARATHON. Discover all the sustainability initiatives of Acea Run Rome The Marathon. 2025. Sustainability. Disponível em: https://www.runromethemarathon.com/en/home-2025-en-2/sostenibilita-en/ Acesso em 24 abr. 2025.

SILVA, Anderson Lauren da. Conexão esportes e sustentabilidade: Plogging como ferramenta de gestão ambiental. 2022, p.30. TCC (Bacharelado) - Gestão Ambiental, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, São Francisco de Paula, 2022

HUGAERTS, Ine et al. Sustainability in participatory sports events: The development of a research instrument and empirical insights. Sustainability (Switzerland), v. 13, n. 11, 1 jun. 2021.

ELETRORRECUPERAÇÃO DE COBRE A PARTIR DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI)

1 Isabelly dos Santos Lino, 2 Danilo Gomes Almeida, 3 Bruna Oliveira Hermenegildo, 4 Tatiane Benvenuti, 5 Tacia Costa Veloso

1 Universidade Federal do Sul da Bahia, e-mail: isabelly.lino@gfe.ufsb.edu.br 2 Universidade Federal do Sul da Bahia, e-mail:danilo.gomes@gfe.ufsb.edu.br; 3 Universidade Federal do Sul da Bahia, e-mail: oh.bruna.oh@gmail.com;; 4 Ministério da Ciência e Tecnologia; *5Universidade Federal do Sul da Bahia, e-mail: taciaveloso@yahoo.com.br*

Palavras-chave: Eletrodeposição de cobre; mineração urbana; reciclagem de metais.

Introdução

Os avanços tecnológicos das últimas décadas têm impulsionado o crescimento acelerado da automação e da urbanização, atendendo às demandas do mercado global e, como consequência, contribuindo para o aumento expressivo da geração de resíduos sólidos (LU *et al*., 2022). Estima-se que municípios em todo o mundo gerem mais de 2 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) por ano, com projeções de crescimento contínuo nas próximas décadas (SIWAL *et al.*, 2023; COOK *et al*., 2026). Esse cenário representa um desafio ambiental significativo, uma vez que o descarte inadequado desses resíduos pode causar impactos severos à biota e à saúde pública (SIWAL *et al*., 2023).

Mudanças recentes na dinâmica social também têm contribuído para a intensificação desse problema. A pandemia de COVID-19, iniciada em 2019, acelerou a adoção do trabalho remoto e ampliou a demanda por equipamentos eletroeletrônicos, resultando em um aumento expressivo na geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) (DUTTA *et al*., 2022). Diante desse cenário, o Brasil ocupa a quinta posição entre os maiores geradores desse tipo de resíduo no mundo, sendo o maior da América Latina, com cerca de 2,4 milhões de toneladas anuais (BALDÉ *et al*., 2024).

Os REEE apresentam elevado potencial de reaproveitamento, uma vez que contêm metais de alto valor agregado, como ouro (Au), prata (Ag) e cobre (Cu) (MOHAMED *et al*., 2025). Nesse contexto, a mineração urbana surge como uma alternativa estratégica para a recuperação desses materiais, reduzindo a dependência da mineração primária e seus impactos ambientais (ERDIAH-KWASIE *et al*., 2024). A hidrometalurgia tem se destacado como uma abordagem promissora para esse fim, devido à sua eficiência na extração de metais e ao menor impacto ambiental associado (PICAZO-RODRÍGUEZ *et al*., 2025; SETHURAJAN *et al*., 2019).

Entretanto, observa-se na literatura que a maioria dos estudos concentra-se na etapa de lixiviação dos metais, com ênfase na eficiência de extração (SETHURAJAN *et al*., 2019; GOULART *et al*., 2025). Em contrapartida, as etapas subsequentes de recuperação, especialmente a eletrodeposição em soluções contendo agentes complexantes, ainda são pouco exploradas, configurando uma lacuna relevante no desenvolvimento de rotas integradas e sustentáveis para o tratamento de REEE.

Diante desse contexto, este trabalho propõe investigar a recuperação de cobre por eletrodeposição a partir de soluções obtidas pela lixiviação de placas de circuito impresso (PCIs) utilizando o ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) como agente complexante. O EDTA destaca-se por sua elevada capacidade de complexação de íons metálicos e menor agressividade ambiental quando comparado a lixiviantes convencionais, como o ácido sulfúrico, tornando-se uma alternativa promissora para processos hidrometalúrgicos mais sustentáveis (GOULART *et al*., 2025).

Material e Métodos

As amostras de Placas de Circuito Impresso (PCIs) foram previamente moídas em moinho de facas (GOULART et al., 2025). Inicialmente, realizou-se o peneiramento do material visando à obtenção de partículas com granulometria inferior a 65 mesh. Para isso, utilizou-se um agitador eletromagnético de peneiras (Bertel), equipado com peneiras de malhas quadradas dispostas em ordem decrescente de abertura. O sistema foi operado por 10 minutos.

A lixiviação foi realizada com base em metodologia previamente desenvolvida pelo grupo de pesquisa (GOULART et al., 2025), empregando solução de ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) em meio alcalino. A solução lixiviante foi preparada utilizando 1800 mL de água destilada, 0,5 mol·L^{-1} de hidróxido de sódio (NaOH) e 0,27 mol·L^{-1} de EDTA. Após completa dissolução dos reagentes, foram adicionados 100 g de PCI à solução, mantendo-se o sistema sob agitação em agitador magnético com aquecimento (Faithful, modelo SH-2).

Após 5 minutos de agitação, foram adicionados 100 mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2). Após 45 minutos, foram adicionados mais 100 mL da mesma substância, totalizando 200 mL de H_2O_2 por batelada. A lixiviação foi conduzida sob agitação constante, a 60 °C, por aproximadamente 2 h e 30 min. O processo foi conduzido em nove bateladas, totalizando, ao final, aproximadamente 900 g de PCI processados, com consumo de cerca de 2007 g de EDTA, 360 g de NaOH, 16.200 mL de água destilada e 1800 mL de H_2O_2. As soluções lixiviadas foram transferidas para um recipiente plástico com tampa (capacidade de 30 L) e armazenadas para utilização na etapa subsequente de eletrodeposição. Os resíduos sólidos retidos nos filtros foram encaminhados à estufa para secagem e posterior armazenamento, visando análises futuras e controle gravimétrico.

A recuperação do cobre foi realizada por eletrodeposição em uma célula eletrolítica composta por dois ânodos de chumbo (Pb) e um cátodo de aço inoxidável, todos com dimensões de 3,5 × 5,0 cm conforme mostrado na Figura 1. Os

eletrodos foram fixados em um recipiente de vidro com capacidade de 800 mL, mantendo-se uma distância aproximada de 1,0 cm entre eles.

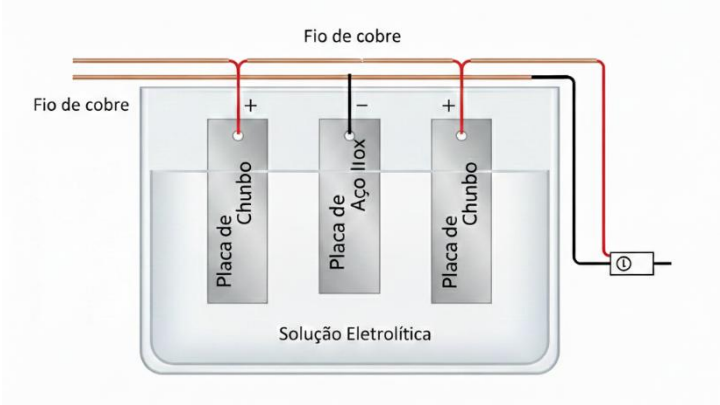


Figura 2: Esquema da montagem da célula.
Fonte: Imagem criada através de recursos de Inteligência Artificial, 2026.

A corrente elétrica foi fornecida por uma fonte de alimentação digital regulável (Minipa, modelo MPC-3005), operando em corrente contínua. Os ensaios foram conduzidos com corrente de aproximadamente 0,61 A, correspondente a uma densidade de corrente de 350 $A \cdot m^{-2}$, e tensão em torno de 1,4 V.

O pH da solução foi avaliado como variável experimental devido à sua influência na dissociação do complexo metálico e na eficiência da deposição. Inicialmente, os ensaios foram realizados no pH natural da solução (≈ 8,5). Em seguida, o pH foi ajustado para 4,5, 2,5 e 0, por meio da adição de ácido sulfúrico (H_2SO_4), utilizando-se aproximadamente 15 mL, 26 mL e 200 mL, respectivamente.

Durante os ensaios, a solução foi mantida sob agitação constante, e os depósitos metálicos formados no cátodo foram posteriormente avaliados quanto aos aspectos visuais e massa depositada.

Resultados e Discussão

Nos ensaios conduzidos em pH 8,5, não foi observada deposição de cobre no cátodo de aço inoxidável. Em contrapartida, verificou-se a formação de um material escuro aderido à superfície do eletrodo, cuja composição ainda será determinada. Esse comportamento pode estar associado à forte complexação do cobre pelo EDTA em meio alcalino, reduzindo a disponibilidade de íons Cu^{2+} livres para a redução eletroquímica (NORKUS *et al*., 1996).

Nos experimentos realizados em pH 4,5, foi observada a deposição de material com coloração característica de cobre nas placas de chumbo, utilizadas como ânodos, conforme evidenciado nas imagens obtidas após os ensaios. Em contrapartida, não foi verificada deposição significativa no cátodo de aço inoxidável. Adicionalmente, observou-se a presença de um material escuro aderido ao cátodo, semelhante ao verificado nos ensaios conduzidos em pH 8,5, cuja composição ainda não foi determinada. Esse comportamento indica um desvio do mecanismo esperado de deposição exclusivamente catódica, sugerindo a ocorrência de fenômenos adicionais no sistema, como reações secundárias (OLIVEIRA *et al*., 2019) ou possíveis inversões locais de polaridade (VILLANI; INAGI, 2025). Além disso, os resultados indicam que, nessa condição de pH, o sistema ainda não favorece adequadamente a deposição catódica do cobre.

Para os ensaios em pH 2,5, foi observada a precipitação do EDTA durante o processo de acidificação da solução. Nessa condição, o agente complexante encontra-se predominantemente em formas protonadas, o que reduz sua solubilidade e sua capacidade de complexação com íons metálicos (KARHU *et al*., 1999). Apesar disso, não foi verificada deposição de cobre no cátodo de aço inoxidável. Esse comportamento sugere que, mesmo com a redução do pH, a descomplexação do cobre não foi suficiente para gerar concentração adequada de íons Cu^{2+} livres em solução, limitando sua redução eletroquímica.

Na condição de pH 0, também foi observada a precipitação do EDTA, indicando a predominância de formas altamente protonadas e de baixa solubilidade em meio fortemente ácido (KARHU *et al*., 1999). Ainda assim, verificou-se deposição de cobre no cátodo de aço inoxidável. Esse comportamento sugere que a dissociação do complexo Cu–EDTA, associada à precipitação do agente quelante, favoreceu a liberação de íons Cu^{2+} livres em solução, permitindo sua redução eletroquímica e subsequente deposição metálica (RAMASUBRAMANIAN *et al*., 1998). Esse resultado evidencia o papel crítico do equilíbrio entre complexação e disponibilidade iônica no controle da eletrodeposição

Considerações Finais

Os resultados demonstram a forte influência do pH na eletrodeposição de cobre a partir de soluções contendo EDTA, evidenciando que a estabilidade do complexo Cu–EDTA em meio alcalino limita a disponibilidade de íons Cu^{2+} livres e impede a deposição. Assim, embora o EDTA seja eficiente na lixiviação, sua elevada capacidade de complexação dificulta a etapa de recuperação, destacando a necessidade de estratégias de descomplexação para viabilizar o processo.

Referências Bibliográficas

BALDÉ, C. P. et al. Global E-waste Monitor 2024. Geneva/Bonn: International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), **2024**.

COOK, E. et al. What a Waste 3.0: Global Snapshot of Solid Waste Management toward Circularity until 2050. Washington, DC: World Bank, **2026**.

DUTTA, D. et al. Electronic waste pollution and the COVID-19 pandemic. Environmental Chemistry Letters, v. 20, p. 971-974, **2022**.

ERDIAH-KWASIE, M. O.; ABUNYEVAH, M.; BAAH, C. A systematic review of the factors - Barriers, drivers, and technologies - Affecting e-waste urban mining: On the circular economy future of developing countries. Journal of Cleaner Production, v. 464, 140645, **2024**.

GOULART, A. O. et al. Extraction of Copper from Printed Circuit Boards in an Alkaline Solution Using EDTA. Minerals, v. 15, n. 4, p. 409, **2025**.

KARHU, J.; HARJU, L.; IVASKA, A. Determination of the solubility products of nitrilotriacetic acid, ethylenediaminetetraacetic acid and diethylenetriaminepentaacetic acid. Analytica Chimica Acta, v. 380, n. 1, p. 105-111, **1999**.

LU, M. et al. Worldwide scaling of waste generation in urban systems. arXiv [preprint], **2022**. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2208.07917. Acesso em: 1 maio 2026.

MOHAMED, D. et al. The Role of E-Waste in Sustainable Mineral Resource Management. Waste, v. 3, n. 3, **2025**.

NORKUS, E.; VAŠKELIS, A.; ŽAKAITĖ, I. Influence of ionic strength and OH^- ion concentration on the Cu(II) complex formation with EDTA in alkaline solutions. Talanta, v. 43, n. 3, p. 465-470, **1996**.

OLIVEIRA, V. A. A. et al. Kinetics of copper and cadmium cementation by zinc powder. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 255-262, **2019**.

PICAZO-RODRÍGUEZ, N. G. et al. E-waste recycling: an overview of hydrometallurgical processes used for metal extraction. Hemijska Industrija, v. 79, n. 4, p. 191-207, **2025**.

RAMASUBRAMANIAN, M. et al. Equilibrium characteristics of tartrate and EDTA-based electroless copper deposition baths. Albuquerque: Sandia National Laboratories, **1997**.

SETHURAJAN, M. et al. Recent advances on hydrometallurgical recovery of critical and precious elements from end of life electronic wastes - a review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v. 49, n. 3, p. 212-275, **2019**.

SIWAL, S. S. et al. A review on electrochemical techniques for metal recovery from waste resources. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, v. 39, 100722, 2023. VILLANI, E.; INAGI, S. Experimental Methods for Measuring Potential and Current Density Distributions at Bipolar Electrodes. Analytical Chemistry, v. 97, n. 12, p. 5837-5846, **2025**.

REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL COMO FORRO DE ACESSO EM OBRAS DE INFRAESTRUTURA

1 Sueli Imaculada dos Santos 2 João Carlos Araújo Silva Neto, 3 Wallace Gonçalves Botelho, 4 Tiago Correa Rodolphi, 5 Sergio Silva Rodrigues, 6 Kelvin Rodrigo Drumond, 7 Guilherme Hoffmann, 8 Antônio Noronha Penna Júnior

1 Vale S.A, e-mail:sueli.santos1@vale.com; 2 Vale S.A, e-mail: joao.carlos.neto@vale.com; 3 Vale S.A, e-mail: wallace.botelho@vale.com; 4 Vale S.A, tiago.rodolphi@vale.com, 5 Vale S.A, sergio.rodrigues@vale.com; 6 Timenow, kelvin.drumond@timenow.com.br; Engeform, guilherme.hoffmann@engeform.com.br; 8 Engeform,antonio.junior@engeform.com.br

Palavras-chave: resíduos de construção civil; reciclagem; sustentabilidade.

A geração de resíduos de construção civil (RCC) em obras industriais representa um desafio significativo, especialmente devido aos custos associados ao transporte, à destinação final e aos impactos ambientais decorrentes dessa prática. Diante desse cenário, o reaproveitamento desses resíduos diretamente no canteiro de obras surge como uma alternativa sustentável, capaz de reduzir a demanda por agregados naturais, minimizar emissões veiculares e otimizar recursos logísticos.

O presente trabalho apresenta a aplicação de uma solução sustentável adotada pela Vale durante as obras da Estação de Tratamento de Água (ETA) Rio Tanque, localizada no município de Itabira, Minas Gerais. O material proveniente das demolições das estruturas existentes foi reaproveitado no próprio empreendimento, por meio de processamento mecânico com britador móvel, destinados à produção de material granular para aplicação como base e camada de reforço de vias internas de acesso.

A metodologia empregada envolveu a demolição controlada das estruturas, seguida por uma triagem inicial dos resíduos. Posteriormente, o RCC foi processado com britador móvel acoplado a escavadeira hidráulica, permitindo a fragmentação adequada do material. Durante o processo, realizou-se a separação magnética para retirada de fragmentos metálicos, assegurando a qualidade do agregado reciclado. O material britado foi então transportado internamente e aplicado nas vias de acesso, com posterior espalhamento e compactação conforme as condições operacionais do canteiro.



Figura 01: Demolição estruturas em alvenaria.
Fonte: Vale, (2025)



Figura 02: Britagem do resíduo.
Fonte: Vale, (2025)



Figura 03: Separação magnética.
Fonte: Vale, (2025)

Como resultado, foram reaproveitadas aproximadamente 159 toneladas de resíduos de construção civil, evitando a necessidade de aquisição de agregados naturais e eliminando o transporte para áreas externas de disposição. A iniciativa proporcionou redução de custos operacionais, diminuição do tráfego de caminhões em vias públicas, melhoria das condições de segurança viária e mitigação de impactos ambientais, especialmente relacionados à emissão de poluentes atmosféricos.

Os resultados demonstram que a reciclagem de RCC in situ é tecnicamente viável e ambientalmente vantajosa, representando uma prática alinhada aos princípios da sustentabilidade e da economia circular, com potencial de replicabilidade em outros empreendimentos de infraestrutura.

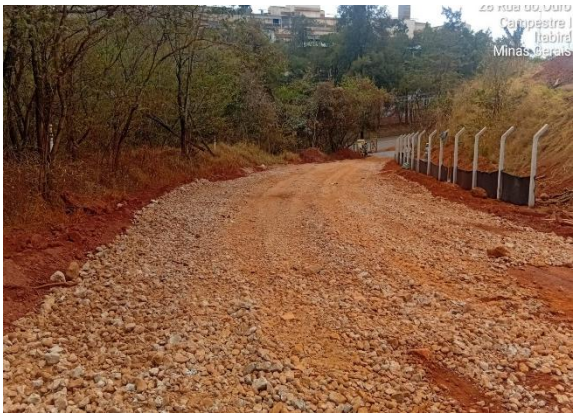


Figura 04: Aplicação nas vias de acesso.
Fonte: Vale, (2025)



Figura 05: Aplicação nas vias de acesso
Fonte: Vale, (2025)

Considerações Finais

A reutilização de resíduos de construção civil no próprio canteiro mostrou-se uma alternativa eficiente para redução de impactos ambientais e otimização de recursos. A prática contribuiu para o uso racional de materiais, diminuição da geração de resíduos e fortalecimento das diretrizes de sustentabilidade corporativa, reforçando a importância de sua adoção em projetos futuros.

Agradecimentos

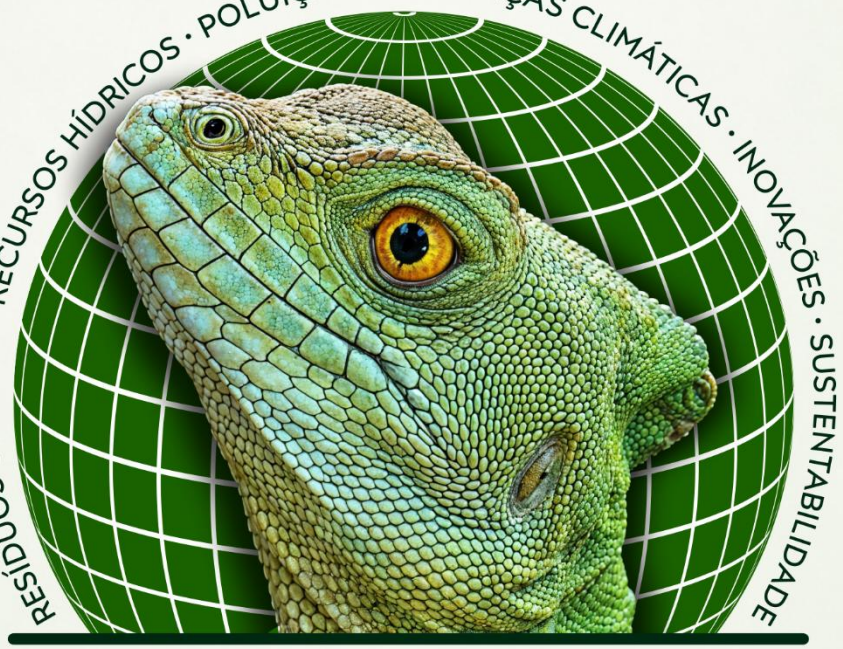
Os autores agradecem à Vale S.A. pelo apoio institucional e incentivo às práticas sustentáveis aplicadas nos empreendimentos de infraestrutura, bem como à equipe de Implantação de Projetos – Corredor Sudeste pelo suporte técnico e operacional durante a execução das atividades.

Referências Bibliográficas

....

ÁREA TEMÁTICA 29

RESÍDUOS SÓLIDOS: TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

ANÁLISE DA CONTAMINAÇÃO E AVALIAÇÃO DO GRAU DE IMPACTO ANTRÓPICO NOS SEDIMENTOS DO RIO SARAPUÍ, RIO DE JANEIRO, BRASIL

1Marllon Evaristo dos Santos de Oliveira, 2Helena Polivanov, 3Márcio Antônio Mendonça de Sousa, 4Emilio Velloso Barroso, 5Mariana Vezzone Tosta Rabello

1 Universidade Federal do Rio de Janeiro, e-mail:emarllon58@gmail.com; 2 Universidade Federal do Rio de Janeiro, e-mail: hpolivanov@gmail.com; 3 Universidade Federal do Rio de Janeiro, e-mail: geosepetiba4@gmail.com; 4 Universidade Federal do Rio de Janeiro, e-mail: emilio@geologia.ufrj.br; 5 Universidade Federal Fluminense, e-mail: mvezzone@gmail.com

Palavras-chave: Rio Sarapuí, Contaminação, Resíduos Sólidos

Introdução

Inserido na Baixada Fluminense, o Rio Sarapuí compõe a bacia hidrográfica do Iguaçu–Sarapuí, drenando uma área altamente urbanizada que abrange municípios da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Essa região concentra elevados índices de densidade populacional e um expressivo polo industrial, configurando um cenário de intensa pressão antrópica sobre os recursos hídricos (Governo do Estado do Rio de Janeiro, 1996). Ao longo do processo histórico de ocupação, especialmente a partir do século XIX, intervenções como a retificação do leito fluvial, a expansão urbana desordenada e a insuficiência de infraestrutura de saneamento contribuíram para o aporte contínuo de esgotos domésticos, efluentes industriais, metais potencialmente tóxicos e resíduos sólidos no sistema fluvial. A ocupação irregular das Áreas de Preservação Permanente intensificou a degradação ambiental, promovendo o assoreamento e a redução da qualidade da água (Costa, 2015). Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a atual condição de poluição do Rio Sarapuí por meio da caracterização dos sedimentos de fundo, visando identificar possíveis fontes de contaminação e os impactos ambientais associados às atividades antrópicas. Os resultados obtidos buscam subsidiar estratégias de gestão ambiental, ações de recuperação do sistema fluvial e o aprimoramento de políticas públicas voltadas à proteção da saúde humana e da biota aquática.

Material e Métodos

O trabalho se iniciou com uma pesquisa bibliográfica voltada à construção do referencial teórico, foi definido estratégia de coletadas de amostras abrangendo locais considerados representativos ao longo do Rio Sarapuí. Foram coletadas nos sedimentos de fundo 14 amostras deformadas nos pontos (1,2,3,4,6,9,12,14,16,17,18,18A,18B e 19) abrangendo a montante e até a foz do rio (figura 01). Em cada ponto foram obtidos 20kg de material.

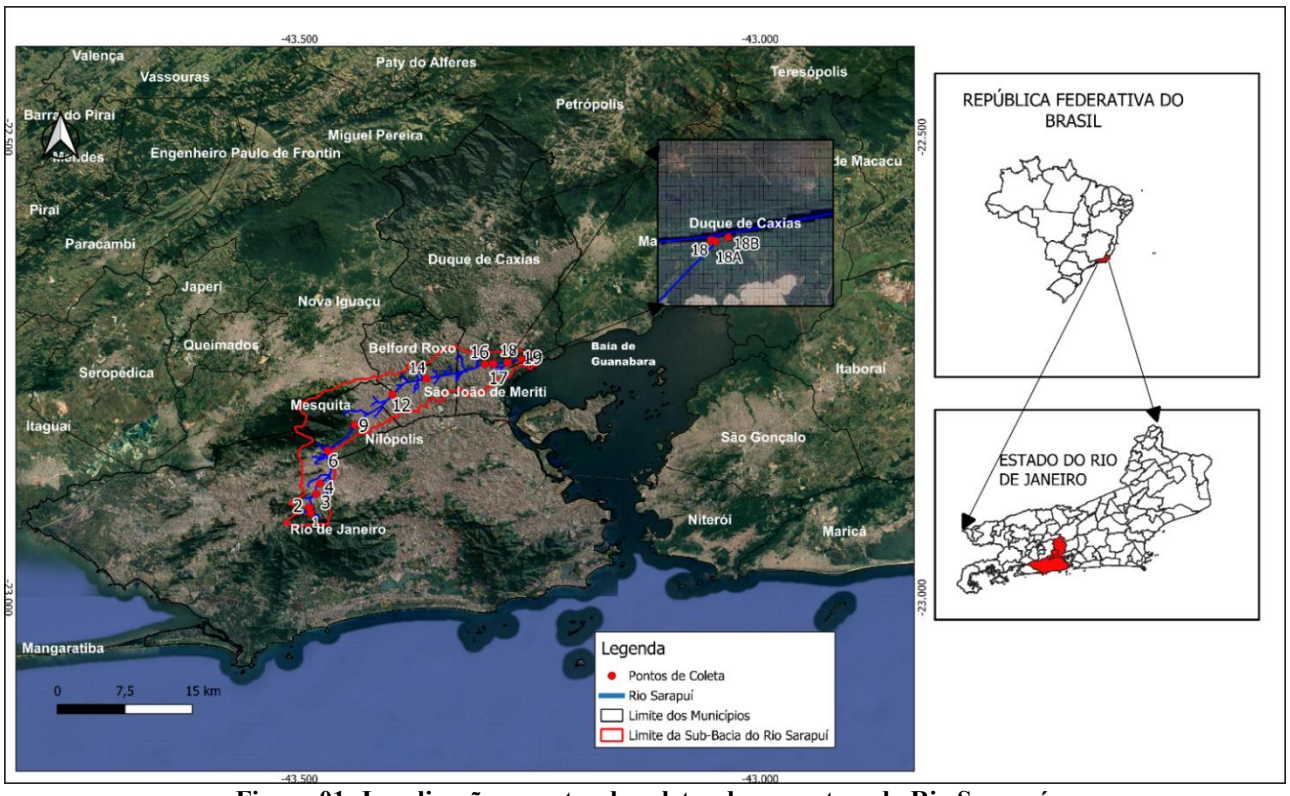


Figura 01: Localização e pontos de coletas das amostras do Rio Sarapuí.

Análises Físicas dos Sedimentos

Foram realizadas as análises físicas como umidade higroscópica ABNT (NBR-6458, 2016), massa específica dos grãos ABNT (NBR-6458, 2016) e granulometria por peneiramento e sedimentação ABNT (NBR-7181, 2016).

Análise Físico-Química e Química

A análise do carbono orgânico total (COT) nos sedimentos foi conduzida conforme a norma NCEA-C- 1282 (USEPA 2002), que prosseguem etapas de remoção dos carbonatos por meio de acidificação, aquecimento da matéria orgânica que converte em dióxido de carbono (CO_2), que é quantificada por um sensor infravermelho. A matéria orgânica é obtida através do valor do (COT), multiplicado por 1,724.

Foi determinado o pH (potencial hidrogeniônico) conforme a (Embrapa, 1997), para distinguir a acidez ou alcalinidade dos sedimentos.

A determinação dos metais nos sedimentos foi determinada por meio da espectrometria de fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda (WDXRF). Foram determinados os teores de alumínio (Al), cromo (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), fósforo (P), manganês (Mn), níquel (Ni) e zinco (Zn). Os resultados obtidos foram comparados aos valores orientadores estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 454/2012, que define diretrizes e procedimentos para o gerenciamento de material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. De acordo com essa normativa, as amostras são classificadas em Nível 1, associado à baixa probabilidade de efeitos tóxicos à biota, e Nível 2, relacionado à alta probabilidade de efeitos adversos aos organismos aquáticos.

Determinação dos Índices de Geoacumalação (IGEO) e Fator de Enriquecimento (FE)

A partir dos dados obtidos nas análises químicas, foi determinado o Índice de Geoacumulação (IGEO), proposto por Müller (1969), amplamente utilizado para avaliar o potencial grau de contaminação de sedimentos. Esse índice relaciona as concentrações dos metais determinados nas amostras aos valores de referência geogênicos, geralmente associados a argilas, conforme Malm (1986). O IGEO é classificado em sete classes, variando de sedimentos praticamente não poluídos até extremamente poluídos.

O Fator de Enriquecimento (FE) consiste em uma ferramenta de normalização amplamente empregada em estudos geoquímicos ambientais, permitindo avaliar o potencial do grau de contaminação associado à introdução antropogênica de metais em solos, sedimentos ou corpos d'água (Ghreafat *et al*., 2011). Esse índice é subdividido em cinco classes, que variam desde depleção ou baixo enriquecimento até enriquecimento extremamente alto.

Ensaios de lixiviação e solubilização dos sedimentos

Os extratos lixiviados dos sedimentos foram obtidos conforme a ABNT (NBR-10005, 2004) e seus resultados foram comparados aos valores de referência da norma ABNT (NBR-10004, 2004).

Os extratos solubilizados foram realizados conforme a ABNT (NBR-10006, 2004) e seus resultados foram comparados aos valores de referência da norma ABNT (NBR-10004, 2004).

Análise de Componentes Principais (PCA).

A PCA é uma técnica estatística utilizada para avaliar as relações entre variações, combinar parâmetros ao identificar possíveis conexões entre os dados e classificar as amostras considerando o conjunto completo das informações verificadas

Resultados e Discussões

Análise Física

Os resultados das análises granulométricas indicaram a existência de dois grupos distintos de sedimentos. O primeiro grupo, localizado a montante do rio Sarapuí, apresenta predominância de material arenoso (amostras 1 a 14), com exceção da amostra 3, coletada em um ponto sob forte influência de esgoto, o que resultou em maior proporção de frações finas (silte + argila). O segundo grupo, situado a jusante, caracteriza-se pela predominância de partículas finas (amostras 16 a 19).

A massa específica dos grãos varia de 2,63 g/cm^3 a 2,54 g/cm^3 no grupo arenoso e de 2,47 g/cm^3 a 2,34 g/cm^3 no grupo lamoso. Os menores valores de massa específica dos grãos neste último segmento estão associados à maior presença de matéria orgânica, em razão da menor densidade intrínseca dos compostos orgânicos.

A umidade higroscópica aumenta proporcionalmente ao incremento das frações finas e do teor de matéria orgânica. Essa relação está associada à elevada superfície específica dessas partículas e à presença de cargas e de substâncias húmicas, que favorecem a retenção de água (COSTA, 1982).

Análise Físico-Química e Química

Os valores de pH variaram entre 6,85 e 3,74. Os pontos localizados a montante do rio apresentam valores de pH mais elevados (amostras 1 a 14) em comparação àqueles situados a jusante (amostras 16 a 19). Os valores mais ácidos de pH na porção a jusante podem estar associados à maior concentração de matéria orgânica.

De acordo com Upadhyay *et al*., (2023), o solo terrestre e o esgoto constituem as principais fontes de matéria orgânica (MO) na zona intermediária e na foz do rio. Todos os valores de carbono orgânico total (COT) encontram-se abaixo do limite de 10 (%) estabelecido pela Resolução CONAMA nº 454/2009, não representando, portanto, risco significativo de impacto ao meio ambiente.

A análise química dos metais apresentam aumento progressivo das concentrações de Al, Cu, Cr, Fe, P, Mn, Ni e Zn em direção à jusante, com maiores valores associados às frações finas dos sedimentos. Isso ocorre porque a adsorção é proporcional à área superficial específica das partículas. Assim, sedimentos ricos em silte e argila apresentam maior capacidade de retenção de contaminantes, especialmente metais pesados e compostos orgânicos Nascimento *et al*., (2014).

A análise química dos sedimentos, conforme a Resolução CONAMA nº 454/2012, evidenciou variações associadas à granulometria e à influência antrópica. O Cr apresentou nível 1 (baixa probabilida de efeitos tóxicos à biota) em sedimentos arenosos e nível 2 (alta probabilidade de efeitos tóxicos à biota) nas frações finas, indicando maior potencial de toxicidade a jusante. Cu e Ni permaneceram predominantemente em nível 1, sugerindo (baixa probabilidade de efeitos tóxicos). Já o P ultrapassou o limite de alerta nas áreas mais urbanizadas, que estão localizadas a jusante do rio e o Zn apresentou nível 2 (alta probabilidade de efeitos tóxicos à biota) em vários pontos, indicando risco elevado à biota.

Índices do IGEO e FE

A análise do IGEO indicou variações no grau de contaminação ao longo do rio, com aumento em direção à jusante, associado ao maior teor de frações finas e matéria orgânica. Cr, Cu e P passaram de praticamente não poluídos para pouco a moderadamente poluídos, enquanto o Zn apresentou os maiores níveis, sendo classificado como moderadamente a fortemente poluído nas frações finas. Já Al, Fe, Mn e Ni permaneceram praticamente não poluídos, refletindo origem predominantemente natural podendo ser parcialmente de contaminação.

O fator de enriquecimento (FE) indicou que os elementos Al, Cr, Mn e Ni apresentam origem predominantemente natural e parcialmente antrópico. O Cu mostrou enriquecimento moderado a partir do ponto 12, sugerindo influência antrópica, enquanto o P apresentou enriquecimento moderado a significativa em vários pontos, associado principalmente a esgoto doméstico. O Zn evidenciou forte influência antrópica ao longo do rio, com enriquecimento significativo na foz, relacionado à maior densidade populacional e atividades industriais. De modo geral, o FE revelou que as atividades urbanas e industriais contribuem para o aumento de Cu, P e Zn, enquanto os demais elementos refletem principalmente parcialmente a geologia local.

Extrato Lixiviado e Solubilizado

No extrato lixiviado os dados mostram que nenhuma das amostras excedeu os valores máximos permitidos pela ABNT NBR 10004 (2004). Dessa forma, os materiais analisados são classificados como resíduos sólidos não perigosos, podendo ser enquadrados nas classes II A (não inertes) ou II B (inertes), conforme suas características de biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água.

O extrato solubilizado mostra que, com base na ABNT (NBR-10004, 2004), a amostra 1 foi classificada como resíduo Classe II B (inerte), indicando estabilidade química e baixo potencial de impacto ambiental. A partir da amostra 2, os materiais foram enquadrados como Classe II A (não inertes), apresentando maior reatividade, especialmente após a amostra 14, em função do aumento das frações finas. Esses resíduos possuem características como biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água, o que os torna mais suscetíveis à interação com o meio ambiente.

Análise de Componentes Principais (PCA)

Os resultados demonstraram uma associação direta entre os metais e as frações granulométricas finas, corroborando os dados obtidos pelo FE, IGEO e pelos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 454/2012, além de apresentarem consistência com os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização.

Atividades Antrópicas Potencialmente Poluidoras na Área de Estudo

A identificação dos focos antrópicos evidenciou que áreas com maior concentração de oficinas, indústrias, hospitais e aterros apresentam maior potencial de contaminação por metais como Cu, Cr, Zn, Ni e P. Nos pontos a montante (1, 2 e 9) não foram observadas fontes relevantes, com baixa contaminação e efeitos tóxicos mínimos, conforme a Resolução CONAMA nº 454/2012, IGEO e FE. Já nos pontos intermediários e a jusante, especialmente 14 a 19, observou-se maior influência antrópica, enriquecimento de metais e classificação predominante como resíduos Classe IIA. O ponto 19 destacou-se pela influência do antigo Lixão de Gramacho, com maior risco ambiental. De modo geral, os resultados indicam que a contaminação aumenta em direção à jusante, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo.

Conclusão

O estudo identificou dois grupos de sedimentos no rio Sarapuí: arenosos a montante e lamosos a jusante, sendo estes mais ácidos, ricos em matéria orgânica e com maior capacidade de adsorção de metais. As maiores concentrações de Cr, Cu, P, Ni e Zn e P ocorreram nas frações finas, com níveis que indicam risco ambiental conforme a Resolução CONAMA nº 454/2012, e correlação confirmada pela PCA. O IGEO e o FE apontaram contaminação por Cu, P, e Zn associadas principalmente a fontes antrópicas, como oficinas mecânicas, oficinas de lanternagem e pintura automotiva, serralherias e metalúrgicas e indústrias químicas nas proximidades, que ocasiona eutrofização, assoreamento e dificulta a pesca e balneabilidade. Os sedimentos foram classificados majoritariamente como resíduo Classe II A segundo a ABNT (NBR-10004, 2004), podem apresentar biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água, indicando necessidade de manejo adequado em caso de dragagem. De modo geral, a contaminação aumenta em áreas com maior atividade urbana e industrial, enquanto a granulometria controla a retenção de metais. Os resultados obtidos buscam subsidiar estratégias de gestão ambiental, ações de recuperação do sistema fluvial e o aprimoramento de políticas públicas votadas à proteção da saúde humana e da biota.

Referências Bibliográficas

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos — Classificação. Rio de Janeiro, p. 3-45, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, p. 4-6, 2004. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10006: Resíduos sólidos - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado. Rio de Janeiro, p 1-3, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6458: Solos — Determinação da massa específica dos sólidos, da massa específica aparente e da absorção de água da fração retida na peneira com abertura de 2,0 mm. Rio de Janeiro, p 2-3, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo — Análise granulométrica. Rio de Janeiro, p. 2-6, 2016.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 454, de 1º de novembro de 2012. Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 66-69, 08 nov. 2012. Retificada em 10 jan. 2013.

COSTA, M. A. M. Da lama ao caos: um estuário chamado Baía de Guanabara. Cadernos Metrópole, São Paulo, v. 17, n. 33, p. 15-39, 2015.

COSTA, M. P. Efeito da matéria orgânica em alguns atributos do solo. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, p. 138, 1982.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, p. 212, 1997.

GHREFAT, H.; ABU-RUKAH, Y.; ROSEN, M. Application of geoaccumulation index and enrichment factor for assessing metal contamination in the sediments of Kafrain Dam, Jordan. Environmental Monitoring and Assessment, v. 178, n. 1, p. 95-109, 2011.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Secretaria de Estado de Meio Ambiente. Fundação Superintendência Estadual de Rios e Lagoas (SERLA). Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Iguaçu-Sarapuí: ênfase no controle de inundações. Rio de Janeiro: SERLA, 1996.

MALM, O. Estudo da poluição ambiental por metais pesados no sistema Rio Paraíba do Sul - Rio Guandu (RPSRG) através da metodologia de abordagem pelos parâmetros críticos. Dissertação (Mestrado em Biofísica) - Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 102, 1986.

MÜLLER, G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. GeoJournal. v. 2, n. 2, p. 108-118, 1969.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária da Universidade Federal do Ceará, p .256, 2014.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments. NCEA-C-1282, Ecological Risk Assessment Support Center. Las Vegas: Office of Research and Development, p. 23, 2002.

UPADHYAY, P.; PRAJAPATI, S. K.; KUMAR, A. Impacts of river pollution on greenhouse gas emissions: a comprehensive review. Ecological Indicators, v. 154, p. 1-13, 2023.

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DE SOLO RESIDUAL VISANDO USO COMO BARREIRA DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS

1 Clara Electra Agassi Belda, 2 Jéssica Pelinsom Marques
1 Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (IGc - USP), clara.electra@usp.br; 2 Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (IGc - USP), jessica.pelinsom.marques@usp.br

Palavras chaves: Solos residuais; aterros sanitários; barreira de cobertura.

Introdução

O aumento da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) evidencia a necessidade de uma destinação final ambientalmente adequada e tecnicamente segura. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305 (Brasil, 2010), estabelece que a destinação final dos rejeitos deve ocorrer em condições ambientalmente adequadas. No Brasil, os aterros sanitários constituem o principal sistema utilizado para essa finalidade (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES, 2025). Dentre os componentes desses sistemas, destaca-se a barreira de cobertura, cuja função é controlar a infiltração de água, reduzir a geração de lixiviado e auxiliar no manejo das emissões gasosas (Calijuri & Cunha, 2013). Para isso, são comumente utilizadas camadas compactadas de solos disponíveis na proximidade, devido sua disponibilidade e baixo custo, porém suas características geotécnicas podem variar significativamente.

No entanto, cada solo possui diferentes características morfológicas e geotécnicas, e nem todos os tipos são adequados para esta finalidade (Daniel & Koerner, 1995). Têm-se estudado o desempenho das camadas de cobertura e sua relação com as propriedades geotécnicas dos solos, como granulometria, plasticidade, parâmetros de compactação e permeabilidade (Daniel, 1993; Rowe; Quigley, 1997). Essas características, em solos residuais, principalmente de regiões tropicais, podem variar significativamente de acordo com o grau de intemperismo, a mineralogia e a textura do material. Assim, torna-se essencial realizar a caracterização geológico-geotécnica dos materiais, a fim de avaliar seu potencial de aplicação em sistemas de coberturas de aterro sanitário (Mitchell & Soga, 2005; Vilar, 2013).

Diante disso, este trabalho tem como objetivo caracterizar, do ponto de vista geológico e geotécnico, um solo residual de gnaisse proveniente de um campo experimental localizado no campus Butantã da Universidade de São Paulo, visando avaliar sua aptidão como material de cobertura em aterros sanitários.

Material e Métodos

Coleta e Preparação da amostra de solo

Foi coletada a amostra de um solo residual derivado do intemperismo de gnaisse, localizado em um campo experimental no campus Butantã da Universidade de São Paulo, no município de São Paulo (*Figura 1)*. O material foi obtido a partir de um talude previamente escavado, após a remoção da camada superficial orgânica (*Figura 2)*. O solo analisado é característico de formações residuais associadas ao embasamento cristalino da região, sendo representativo de materiais amplamente distribuídos em áreas tropicais (Oliveira, 2004; Lemos e Marinho, 2018).



Figura 01: Mapa de localização do ponto de coleta de solo.
Fonte: Elaborado pela autora com base em dados do OpenStreetMap (2026).



Figura 02: Coleta do solo

Em laboratório, as amostras foram secas ao ar por sete dias e, em seguida, destorroadas com almofariz e pistilo com ponta emborrachada. Em seguida, o solo foi peneirado em peneira com abertura de 4,75 mm, conforme a ABNT NBR 6457, homogeneizado e quarteado pelo método de pilha alongada.

Teor de umidade

O teor de umidade do solo foi determinado em laboratório como etapa inicial da caracterização geotécnica, visando quantificar a relação entre a massa de água e a massa de solo seco. O teor de umidade foi calculado pela diferença de massa das amostras antes e após secagem em estufa a 105 °C por aproximadamente 48 horas, conforme a ABNT NBR 6457/2024. A determinação foi realizada em triplicata.

Determinação da massa específica dos sólidos

Uma pequena amostra do solo foi passada pela peneira 10# e encaminhada ao Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) da Escola Politécnica da USP, para a determinação da massa específica por meio de ensaio de picnometria com intrusão de gás, com um equipamento da marca Micromeritics, modelo AccuPyc II 1340.

Ensaios em andamento

Para a continuidade do projeto, será ainda realizada a análise granulométrica conjunta e construção da curva granulométrica (conforme ABNT NBR 7181/2025), determinação dos limites de liquidez e plasticidade e cálculo do índice de plasticidade (conforme ABNT NBR 7180/2025 e 6459/2025), análise mineralógica por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), conforme descrito por Velde (1992), e ensaio de compactação Proctor Normal para determinação dos parâmetros ótimos de compactação (conforme ABNT NBR 7182/2025).

As características do solo serão comparadas com requisitos normativos e recomendações da literatura para o desempenho de barreiras hidráulicas em áreas de disposição de resíduos (Daniel, 1993; Rowe; Quigley, 1997; Bonaparte, Daniel, Koerner, 2002), possibilitando avaliar seu potencial de aplicação em sistemas de cobertura de aterros sanitários.

Resultados e Discussão Preliminares

Os resultados preliminares da pesquisa indicam que o solo apresenta características típicas de materiais finos, com predominância de frações silto-argilosas, conforme observado em campo através da análise tátil visual. O teor de umidade determinado em laboratório foi de 7,9 ± 0,1 %. Vale ressaltar que esse valor não representa as condições naturais de umidade em campo, sendo utilizado como referência para os ensaios subsequentes.

A massa específica dos sólidos foi de 2,660 ± 0,001 g/cm³, valor compatível com solos minerais (Mitchell & Soga, 2005). Embora os resultados iniciais forneçam uma caracterização preliminar do material, parâmetros fundamentais para avaliação de seu desempenho como barreira hidráulica, como granulometria, plasticidade e comportamento à compactação, ainda não foram determinados. Nesse sentido, a massa específica dos sólidos, isoladamente, não permite inferir propriedades como permeabilidade ou retenção de água, limitando a análise da aptidão do material para uso em sistemas de cobertura.

Considerações Finais

O solo apresenta características de material fino, com massa específica dos sólidos dentro da faixa esperada para solos minerais e baixa variabilidade nos resultados, indicando boa homogeneidade da amostra, o que constitui uma base inicial consistente para sua caracterização geotécnica. No entanto, os parâmetros obtidos até o momento são insuficientes para avaliar a aptidão do material como barreira de cobertura em aterros sanitários, uma vez que propriedades fundamentais para esse fim, como granulometria, plasticidade e comportamento à compactação, ainda não foram determinadas.

Agradecimentos

As autoras agradecem à Universidade de São Paulo pelo apoio institucional e ao Programa Unificado de Bolsas (PUB) pela bolsa na vertente pesquisa. Agradecem também à Professora Dr. Carina Ulsen, responsável pelo Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da USP.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: solos — preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: solo — determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: solo — determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: solo — análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: solo — ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

BONAPARTE, R.; DANIEL, D. E.; KOERNER, R. M. (ed.). Assessment and recommendations for improving the performance of waste containment systems. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency (EPA), 2002. EPA/600/R-02/099.

BRASIL. Lei n.o 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/residuos/politica-nacional-de-residuos-solidos-pns
Acesso em: 29 dez. 2025.

BNDES — BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. Gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil. Rio de Janeiro: BNDES, 2025.

CALIJURI, M. do C.; CUNHA, D. G. da. Geotecnia ambiental. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

DANIEL, D. E.; KOERNER, R. M. Waste containment facilities: guidance for construction quality assurance and construction quality control of liner and cover systems. Reston: ASCE Press, 1995.

LEMOS, M.; MARINHO, F. A. M. Caracterização geológico-geotécnica do solo residual proveniente de gnaisse migmatítico do Complexo Embu, São Paulo, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (COBRAMSEG), 2018.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. Fundamentals of soil behavior. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.

ROWE, R. K.; QUIGLEY, R. M. Waste disposal facilities: engineered systems for environmental protection. Boca Raton: CRC Press, 1997.

OLIVEIRA, Orlando Martini de. Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado. 2004. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

VELDE, B. Clay minerals: a physico-chemical explanation of their occurrence. Amsterdam: Elsevier, 1992.

VILAR, Orencio Monje. Mecânica dos solos: conceitos básicos e aplicações. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REINCORPORAÇÃO DE RCC CLASSE A POR MEIO DA MODELAGEM BIM

1 Laura Maria Marques Paulo, 2 Giulliana Mondelli,
1 Universidade Federal do ABC, e-mail: lauramarquespaulo@gmail.com; 2 Unesp- Bauru, e-mail: g.mondelli@unesp.br

Palavras-chave: Gestão de resíduos; Economia circular; Reciclagem de RCC.

Introdução

O setor da construção civil apresenta elevado impacto ambiental, associado tanto à intensa exploração de recursos naturais quanto à significativa geração de resíduos da construção civil (RCC). São compostos majoritariamente por materiais de natureza mineral com potencial de reaproveitamento, como concreto, argamassa, cerâmica e solos. Apesar desse potencial, a reincorporação de RCC na cadeia produtiva ainda é limitada, em função de fatores técnicos, logísticos e culturais.

Nesse contexto, a Modelagem da Informação da Construção (*Building Information Modeling* – BIM) tem se destacado como ferramenta capaz de antecipar a geração de resíduos ainda na fase de projeto, permitindo a extração automatizada de quantitativos e a simulação de cenários de reaproveitamento. Entretanto, ainda existem lacunas na integração entre estimativas quantitativas, caracterização dos resíduos e sua efetiva reincorporação nos empreendimentos. Apesar do potencial técnico, a reincorporação de RCC no Brasil ainda é limitada, não apenas por fatores técnicos, mas também por aspectos relacionados à variabilidade do material e às exigências de controle de qualidade do setor produtivo (LEITE, 2001; BEHERA et al., 2016; ABRECON, 2020).

Dessa forma, este estudo tem como objetivo avaliar o potencial de reincorporação de RCC Classe A em componentes construtivos, por meio da integração entre modelagem BIM, dados granulométricos e análise de aplicações técnicas compatíveis.

Materiais e Médotos

A metodologia adotada baseia-se na integração entre modelagem BIM, busca por índices de perdas na literatura e dados experimentais de caracterização de resíduos. O modelo BIM adotado neste estudo foi obtido a partir da biblioteca Bibliocard 2022, um repositório digital de modelos paramétricos voltados à área da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), compatível com o software Autodesk Revit®. A utilização desse modelo permite a padronização geométrica e a extração automatizada de quantitativos, sendo adequada para estudos de estimativa de resíduos em ambiente BIM.

O objeto de estudo consiste em uma edificação residencial hipotética de dois pavimentos com a área construída aproximada de 96 m², com tipologia residencial padrão, composta por sala de estar, cozinha, dois dormitórios, um banheiro e áreas de circulação como mostra a Figura 1.

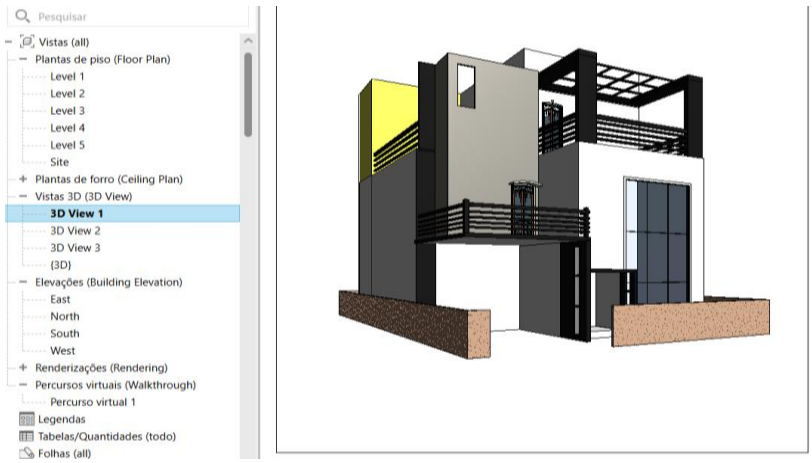


Figura 1: Exemplo de residencia unifamiliar utilizada como modelo do presente estudo.
Fonte: Bibliocard (2026)

O modelo da edificação possui todos os elementos construtivos parametrizados. Assim foram geradas automaticamente as tabelas de quantitativos, incluindo os índices de perdas associados a cada família ou elemento construtivo (como alvenarias e pisos). Esses índices foram multiplicados pelos quantitativos do projeto, possibilitando estimar o volume total de resíduos Classe A previstos para a obra.

Uma vez levantados os índices de perdas (Tabela 1), a estimativa de geração de resíduos será obtida por meio da Equação 1. (MIARA, 2020):

$$W = P \times IP \qquad (1)$$

Onde: W é a quantidade de resíduos gerados; P é a quantidade de material; IP é o índice de perdas (%).

Os volumes obtidos foram associados a índices médios de perdas construtivas, possibilitando a estimativa da geração de RCC Classe A. Paralelamente, foram utilizados dados granulométricos e gravimétricos provenientes de grandes geradores do município de Bauru (SP), representativos da composição típica dos resíduos da construção civil.

Tipo de material / resíduo	Índice de perda adotado	Referências: Rosa (2001); Pinto e González (2005)
Concreto (estrutural e não estrutural)	15 %	10–25%
Argamassas (assentamento e revestimento)	20%	5–30%
Cerâmicas (blocos, tijolos e revestimentos)	18%	10–20%
Elementos de concreto pré-moldado	10%	5-15%

Tabela 1: Índices de perdas adotados
Fonte: Adaptado de Rosa (2001) e Pinto e González (2005)

O modelo considera um balanço entre geração e reincorporação de resíduos, não se restringindo ao reaproveitamento exclusivo do material gerado na própria obra, mas à capacidade de absorção do empreendimento no contexto da cadeia produtiva.

A partir dos quantitativos estimados, foram avaliadas aplicações compatíveis com as propriedades dos resíduos, incluindo camadas de base e sub-base, pavimentação, argamassas de regularização e elementos de vedação, considerando parâmetros normativos e requisitos técnicos.

Um fator determinante para a incorporação de agregados reciclados refere-se às limitações normativas, uma vez que, em geral, os resíduos processados não podem compor integralmente os elementos construtivos (com exceção de aplicações como base e sub-base). Dessa forma, o potencial de reincorporação depende diretamente do tipo de aplicação e dos percentuais máximos permitidos. Conforme apresentado na Tabela 2.

Aplicação	Substituição típica de agregados por RCC	Norma / referência
Sub-base granular	50–100%	DNIT 141/2010
Pavimentação intertravada	30–50%	ABNT NBR 9781
Argamassa de assentamento	20–30%	ABNT NBR 13279
Blocos de concreto	20–40%	ABNT NBR 6136
Blocos cerâmicos reciclados	30–60%	ABNT NBR 15270

Tabela 2: Percentuais normativos permitidos para substituição de agregados naturais por RCC
Fonte: Adaptado de normas ABNT e DNIT (2026)

Resultados e Discussão

A modelagem BIM permitiu a extração dos quantitativos dos principais elementos construtivos, indicando um volume total de aproximadamente **176,46 m³** de RCC Classe A gerado no empreendimento, com predominância de resíduos provenientes de paredes e pisos.

A análise da composição dos resíduos indicou predominância da fração cerâmica, correspondente a aproximadamente 83,9% do volume total, seguida por argamassa e concreto. Essa composição influencia diretamente as possibilidades de aplicação do material reciclado, com base na análise granulométrica e gravimétrica dos residuos.

A demanda de materiais foi estimada com base nos quantitativos extraídos do modelo BIM e em coeficientes técnicos da literatura. Os volumes de base/sub-base e pavimentação foram obtidos pela relação entre área e espessura média adotada. A demanda de blocos de vedação foi determinada a partir do volume total das paredes do modelo, enquanto as argamassas foram estimadas por consumo médio por área. A soma dessas parcelas resultou em aproximadamente 101 m³ de materiais não estruturais. Inicialmente, esse valor corresponde a cerca de 57% do volume total de RCC Classe A gerado, considerando apenas a capacidade de absorção do sistema construtivo.

Entretanto, conforme estabelecido pelas normas técnicas vigentes, a substituição de agregados naturais por reciclados é limitada a percentuais máximos específicos para cada tipo de aplicação, não sendo possível a utilização integral do material reciclado na composição dos elementos construtivos (com exceção de aplicações como base e sub-base). Dessa forma, foram adotados valores **médios** de substituição recomendados pela literatura e pelas normas (Tabela 2), a fim de estimar um volume mais realista de reincorporação dos resíduos no empreendimento

Aplicação	Demanda estimada (m³)	Resíduo disponível (m³)	Potencial de absorção	% substituição RCC	RCC incorporado	Estimativa de RCC absorvido
Base/sub-base interna	30	176,46	17,0%	100%	30	17%
Pavimentação/calçadas	12	176,46	6,8%	40%	4,8	2,7%
Blocos de calçamento	8	176,46	4,5%	40%	3,2	1,8%
Blocos/vedação	45	176,46	25,5%	40%	18	10,2%
Argamassas de regularização	6	176,46	3,4%	25%	1,5	0,9%
TOTAL	101	176,46	57,2%		57,5 m³	**32,6%**

Tabela 3: Potencial de incorporação por tipo de aplicação
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os resultados indicaram que a substituição parcial de agregados naturais por agregados reciclados possibilitou atingir uma taxa de aproximadamente **32% de reincorporação dos resíduos gerados**, considerando limitações técnicas e percentuais de substituição recomendados pela literatura (JOHN, 1999; LEITE, 2001; BEHERA et al., 2016).

A análise também evidenciou que a viabilidade dessa reincorporação depende diretamente do beneficiamento prévio em centros de triagem, responsáveis por processos de britagem, peneiramento e classificação granulométrica, garantindo propriedades adequadas ao uso como agregado.

Do ponto de vista técnico, verificou-se maior viabilidade para aplicações em camadas granulares e elementos não estruturais, enquanto aplicações estruturais apresentam maiores restrições devido à variabilidade do material reciclado.

Considerações Finais

Os resultados obtidos demonstram que a integração entre modelagem BIM e caracterização técnica dos resíduos permite estimar a geração de RCC e avaliar seu potencial de reincorporação ainda na fase de projeto. O modelo proposto possibilitou identificar uma taxa significativa de reaproveitamento, evidenciando que o uso de agregados reciclados pode contribuir para a redução do consumo de recursos naturais, embora ainda exista dependência significativa de agregados naturais, devido às limitações técnicas e normativas de substituição.

Destaca-se que o modelo considera um balanço entre geração e absorção de resíduos no sistema construtivo, podendo ser aplicado a diferentes tipologias de edificações. Entretanto, sua viabilidade prática depende da existência de infraestrutura adequada de beneficiamento e de controle tecnológico dos materiais reciclados.

A análise evidenciou que a viabilidade da reincorporação está condicionada à existência de centros de triagem capazes de realizar processos de britagem, peneiramento e classificação granulométrica, garantindo maior controle tecnológico do material reciclado.

Mesmo havendo potencial técnico para reincorporação de aproximadamente 32% dos resíduos gerados, a viabilidade prática está condicionada à existência de cadeias produtivas capazes de absorver esses materiais com controle de qualidade adequado. Nesse contexto, observa-se que, em aplicações como argamassas e blocos, é mais comum a utilização de agregados reciclados provenientes de fontes externas já beneficiadas, como areia reciclada processada, em função da maior homogeneidade e controle granulométrico do material.

Assim, o estudo contribui para o desenvolvimento de estratégias de gestão de RCC orientadas à economia circular, visando a redução da geração líquida de resíduos Classe A e a valorização de materiais reciclados na construção civil.

Agradecimentos

As Autoras gostariam de agradecer a Universidade Federal do ABC e a UNESP Bauru pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ABRECON. Panorama dos resíduos da construção civil no Brasil. São Paulo, 2020.

AUTODESK. *Revit*. Versão 2025. San Rafael: Autodesk Inc., 2025.

BEHERA, M. et al. Recycled aggregate from construction and demolition waste and its use in concrete. *Construction and Building Materials*, 2016.

BIBLIOCARD. Biblioteca digital de componentes BIM. Disponível em: https://www.bibliocard.com. Acesso em: 2026.

IPEA. Diagnóstico dos resíduos da construção civil no Brasil. Brasília, 2012.

JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos na construção civil. São Paulo: EPUSP, 1999.

LEITE, M. B. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos com agregados reciclados. Porto Alegre: UFRGS, 2001.

MIARA, R. D.; SCHEER, S. S. Optimization of Construction Waste Management Through an Integrated BIM API. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, v. 11, n. 22, p. 110–122, 2019.

EVOLUÇÃO DA GERAÇÃO E GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO NORDESTE BRASILEIRO (2020-2024)

1 Antonio Gabriel Rocha Silva, 2 Davi de Souza Ferreira, 3 Magno Lucas Alcantara Silva, 4 Allandelon Silva Maciel, 5 Fabrissa Cotrim Pires, 6 Danyella Santos Silveira

1 Instituto Federal da Bahia, e-mail: gabrielpessoa541@gmail.com; 2 Instituto Federal da Bahia, e-mail: dsferreira0705@gmail.com; 3 Instituto Federal da Bahia, e-mail: lucasalcantara2501@gmail.com; 4 Instituto Federal da Bahia, e-mail: allandelonmaciel45@gmail.com; 5 Instituto Federal da Bahia, e-mail: fahcotrim4@gmail.com; 6 Instituto Federal da Bahia, e-mail:danyella2024silveira@gmail.com

Palavras-chave: Lixões; Disposição Final

Introdução

Quando alinhamos o atual estilo de vida da sociedade, baseado no consumo exacerbado, com o crescente aumento da população, torna-se nítida a expansão na geração dos resíduos. Nessa perspectiva, se intensifica a exploração de recursos naturais, os quais cada vez mais são tratados com infinitos, a fim de atender a escala de produção necessária para satisfazer as necessidades de consumo adotada pela nova geração (Rangel *et al.*, 2024). Evidenciando assim, a importância de uma gestão e gerenciamento adequado desses resíduos, que tendem a crescer cada vez mais.

Nesse contexto, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos por meio da Lei nº 12305 de 10 de agosto de 2010, a qual vem dispor sobre as diretrizes para gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos. Tendo dentre seus objetivos, garantir a disposição final adequada dos resíduos, incentivar a não geração, a redução e reciclagem, bem como assegurar a saúde pública e qualidade ambiental (Brasil, 2010).

Entende-se por resíduos sólidos os materiais, substâncias, objetos ou bens descartados resultantes de atividades humanas em sociedade, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas características inviabilizam seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d'água, conforme definido pela Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010).

Atualmente um dos grande problemas no gerenciamento dos Resíduos Sólido Urbanos (RSU) é a disposição final, no ano de 2024 cerca de 59,7% dos resíduos gerados no Brasil foram dispostos de maneira adequada, enquanto 40,3% deste montante foram encaminhados para lixões ou aterros controlados (Abrema, 2025). Dizer que um resíduo recebeu uma disposição final ambientalmente adequada implica que ele foi destinado de forma a reduzir possíveis danos à saúde pública e ao meio ambiente, em conformidade com normas técnicas de segurança e com a legislação ambiental, conforme a Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010).

Um dos grandes desafios no gerenciamento dos RSU é a erradicação dos lixões, uma vez que, devido a sua falta de infraestrutura, esses ambientes apresentam grandes riscos à saúde pública e ao meio ambiente, sendo assim, considerado uma forma indiscriminada de descartar os resíduos. Nesse sentido foi criado o programa Lixão Zero pelo Ministério do Meio Ambiente a fim de auxiliar os municípios a procurarem soluções mais adequadas para solucionar esse problema (Ministério do Meio Ambiente, 2019).

Nesse cenário, quando a disposição de resíduos ocorre de maneira indiscriminada, ela gera danos à água, ao solo e ao ar, além de atrair vetores de doenças, tornando-se um problema de saúde pública. Essas enfermidades são comumente denominadas Doenças Relacionadas ao Saneamento Ambiental Inadequado (DRSAI), incluindo doenças de transmissão feco-oral, transmitidas por insetos vetores, associadas ao contato com a água e à falta de higiene (Auad *el al*, 2021). Assim, evidencia-se que esse problema envolve muito mais do que apenas questões ambientais.

No Brasil, a gestão dos RSU ainda apresenta inúmeras fragilidades, como a disposição final inadequada dos resíduos, a coleta seletiva pouco estruturada e a escassez de ações voltadas à educação ambiental, além de outras questões apontadas por Freitas, Pires e Benincá (2024). Nesse contexto, revela-se que o país ainda precisa ultrapassar diversas barreiras antes de alcançar um nível satisfatório de gestão de RSU, sendo a erradicação dos lixões uma das principais metas previstas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2022).

Nessa perspectiva, destaca-se a região Nordeste, que, no ano de 2024, apresentou uma geração superior a 20,2 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, com uma taxa per capita diária de 0,967 kg/hab.dia, posicionando-se como a segunda região que mais produz RSU no Brasil (Abrema, 2025). No estudo realizado por Rodrigues *et al*. (2022), observou-se que, entre os anos de 2010 e 2018, mais da metade dos lixões do país estavam concentrados nesta região. Assim, evidencia-se a necessidade de fortalecimento de políticas públicas, ampliação de investimentos em infraestrutura e incentivo a práticas sustentáveis.

Diante desse contexto de disparidades regionais e desafios normativos, este trabalho tem como objetivo analisar a evolução da geração e gestão dos resíduos sólidos urbanos na região Nordeste no período de 2020 a 2024, em comparação com o cenário nacional buscando contribuir para o debate sobre a sustentabilidade e a saúde pública no contexto regional.

Material e Métodos

A presente pesquisa baseou-se na análise de dados secundários obtidos no Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, documento publicado anualmente pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe) até 2022, e que, a partir de então, passou a ser elaborado pela Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (Abrema). O trabalho consistiu na comparação temporal de dados referentes ao período de 2020 a 2024, a fim de identificar variações na geração de

resíduos sólidos urbanos (RSU) na Região Nordeste em relação ao cenário nacional. Dessa forma, a investigação caracteriza-se como uma pesquisa documental, modalidade que auxilia no entendimento histórico, cultural e científico de um fenômeno em determinado período, contribuindo para o esclarecimento das inquietações que orientam o estudo (Fontana; Pereira, 2023).

Resultados e Discussão

Em 2020, a geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil ultrapassou a marca de 82,5 milhões de toneladas. Um dos fatores que contribuiu para esse cenário foi o período pandêmico vivenciado naquele ano. Em decorrência do isolamento social, ocorreram alterações significativas na dinâmica de produção dos RSU: a geração, antes descentralizada em diversas regiões da cidade, passou a concentrar-se quase exclusivamente nas residências (Abrelpe, 2021).

Somente em meados de 2021 as atividades cotidianas retornaram de forma gradual ao padrão pré-pandemia, o que resultou em novas transformações no setor de limpeza urbana (Abrelpe, 2022). Contudo, foi no ano de 2022 que se observou o reaquecimento da economia e a retomada integral de setores anteriormente suspensos. Deve-se ressaltar que, apesar do retorno às atividades presenciais, houve mudanças permanentes no comportamento da população, como a maior utilização de serviços de entrega (delivery) e a adesão ao trabalho remoto ou híbrido (Abrema, 2023). Ao observar a Figura 01, percebe-se a redução na geração de RSU entre os anos de 2021 e 2022; dentre os fatores que corroboraram esse cenário, destacam-se o fim do isolamento social e o aumento na taxa de desemprego (Abrema, 2023).

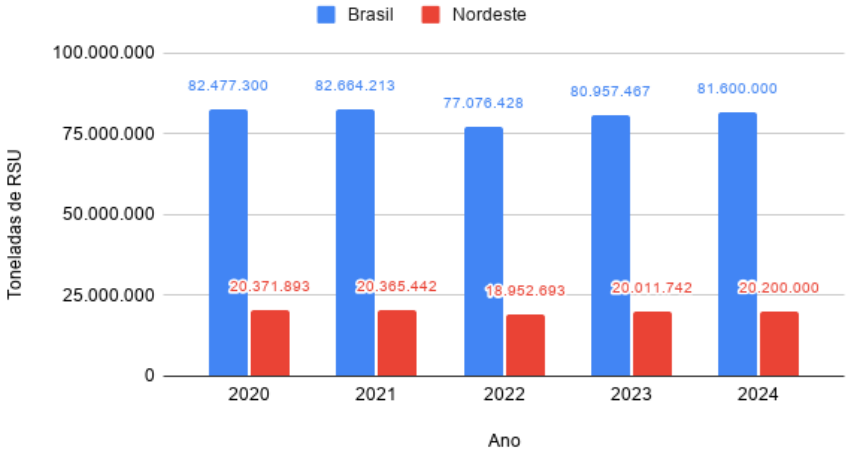


Figura 01: Evolução da Geração de RSU no Brasil e na Região Nordeste no Período de 2020 a 2024.
Fonte: Elaborado pelos autores com base em: ABRALEP (2022; 2021); ABREMA (2023;2024;2025).

Entre os anos de 2023 e 2024, observa-se um aumento na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). Um dos fatores que podem ter contribuído para esse crescimento foi a redução da taxa de desemprego no Brasil, que registrou, em 2023, uma média anual de desocupação de 7,8%, a menor desde 2014 (Ibge, 2024). Contribuindo para o ampliar o poder de compra da população, o que, consequentemente, reflete-se em uma maior geração de resíduos (Abrema, 2024).

De acordo com dados da Abrema (2025), cerca de 76,4 milhões de toneladas de RSU foram coletadas no Brasil em 2024, o que corresponde a aproximadamente 93,7% do total gerado no período. Na região Nordeste, entretanto, a taxa de coleta é inferior, atingindo cerca de 84%, o que a posiciona como a segunda região com menor índice de cobertura. Ao analisar a evolução nos últimos cinco anos, observa-se que a taxa de coleta na região passou de 81,5% para 84%, representando um aumento de apenas 2,5 pontos percentuais (Abralep, 2021; Abrema, 2025) .

Nesse contexto, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2022) estabelece, entre suas metas, a erradicação de lixões e aterros controlados. Para o alcance desse objetivo, a eficiência na coleta é um fator crucial. De acordo com as previsões do Plano, esperava-se que o Nordeste apresentasse percentuais de cobertura de 86,1% em 2020 e 89,6% em 2024. Entretanto, esse cenário não se concretizou, evidenciando os desafios persistentes na universalização dos serviços e na gestão adequada dos resíduos sólidos.

No que se refere à disposição final, cerca de 59,7% dos resíduos no Brasil foram destinados corretamente em 2024, enquanto 40,3% tiveram destinação inadequada (Abrema, 2025). Tais dados reforçam as dificuldades enfrentadas pelos municípios na gestão dos RSU, que envolve diversas variáveis, desde o quantitativo gerado a infraestrutura de transporte e disposição final. Além disso, nota-se que a sensibilização da população quanto à importância da segregação na fonte e da redução no desperdício ainda é insuficiente para que a gestão sustentável seja alcançada (Freitas; Pires; Benincá, 2024).

Em termos de geração, o Nordeste é responsável por mais de 24% dos resíduos do país, ficando atrás apenas da região Sudeste, que gera mais de 49% do total (Abrema, 2025). Todavia, ao analisar a destinação final, o cenário é preocupante: em 2020, a região Nordeste possuía 1.283 municípios que ainda utilizavam lixões ou aterros controlados, enquanto apenas 511 adotavam aterros sanitários (Abrelpe, 2021).

Em 2024, o índice de disposição final adequada no Nordeste foi de 44,7%. Apesar do aumento em relação a 2020 (36,3%), o valor permanece significativamente abaixo da média nacional (Abralep, 2021; Abrema, 2025). Essa comparação torna-se ainda mais crítica frente ao Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2022), que previa para 2020 uma disposição inadequada

de apenas 39%, mas na realidade, o índice foi de 63,7%. Contudo, deve-se ponderar, que o ano de 2020 foi marcado pela pandemia de COVID-19, que exigiu mudanças emergenciais no gerenciamento para garantir a saúde pública e a segurança do trabalho (Auad et al., 2021).

Nessa perspectiva, a pandemia intensificou o uso e o descarte de equipamentos de proteção individual (EPIs) e embalagens de entregas e compras on-line. Esse aumento na geração, alinhado à gestão precária, resulta em consequências ambientais de curto, médio e longo prazo, tornando a busca por medidas mitigadoras um grande desafio para a sustentabilidade (Felisardo; Santos, 2021).

Além dos impactos pandêmicos, uma barreira histórica é a extinção dos lixões, prevista inicialmente para 2014. Com o não cumprimento, a meta foi prorrogada pela Lei nº 14.026/2020 para 2024, estabelecendo prazos progressivos conforme o porte dos municípios. Entretanto, a heterogeneidade das cidades brasileiras e as dimensões continentais do país dificultam a concretização desse cenário (Rangel et al., 2024). Diante disso, o Projeto de Lei (PL) nº 1.323/2024 propõe prorrogar por mais cinco anos o prazo para municípios com menos de 50 mil habitantes, visando dar oportunidade para que busquem soluções orçamentárias e de infraestrutura sem comprometer outros serviços essenciais (Brasil, 2024).

Por fim, compreende-se que a dificuldade em atingir a meta "Lixão Zero" advém de uma combinação de fatores, incluindo os altos investimentos financeiros exigidos desde a coleta até a operação dos aterros (Paula, 2026). Nesse sentido, o uso de consórcios intermunicipais surge como uma solução viável, pois possibilita a redução de custo, em comparação ao sistema tradicional de gestão isolado. (Nascimento et al., 2022).

Considerações Finais

Este estudo teve como objetivo analisar a geração de resíduos sólidos urbanos na Região Nordeste no período de 2020 a 2024. A partir da análise dos dados, evidenciou-se que, embora tenham ocorrido avanços, ainda persistem desafios significativos para a efetivação de um gerenciamento adequado dos resíduos sólidos urbanos na região. Destacam-se, sobretudo, as dificuldades relacionadas à destinação final ambientalmente adequada e à erradicação dos lixões, que ainda representam um problema recorrente.

Nesse contexto, faz-se necessária a ampliação de iniciativas do setor público voltadas à implementação de políticas eficazes, incluindo o incentivo à coleta seletiva, o apoio aos municípios na gestão de resíduos e o fortalecimento de ações de educação ambiental, com vistas à sensibilização da população quanto à importância da destinação correta dos resíduos domiciliares e da não geração.

Referências Bibliográficas

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública de Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021.** São Paulo: ABRELPE, 2021. Disponível em: <https://abespb.com.br/wp-content/uploads/2023/12/Panorama-2021-ABRELPE.pdf>. Acesso em: 28 abril 2026.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública de Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. São Paulo: ABRELPE, 2022. Disponível em: <https://abespb.com.br/wp-content/uploads/2023/12/Panorama_Abrelpe_2022.pdf >. Acesso em: 28 abril 2026.

ABREMA- Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023**. São Paulo: ABRELPE, 2023. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/wp-content/uploads/dlm_uploads/2024/03/Panorama_2023_P1.pdf >. Acesso em: 28 abril 2026.

ABREMA- Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024**. São Paulo: ABRELPE, 2024. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2024/12/panorama-dos-residuos-solidos-no-brasil-2024.pdf >. Acesso em: 28 abril 2026.

ABREMA- Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2025**. São Paulo: ABRELPE, 2025. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2025/12/panorama-2025.pdf >. Acesso em: 28 abril 2026.

Auad, G. A. *et al*. Reflexões sobre a política nacional de resíduos sólidos e a pandemia do COVID-19: Gerenciamento adequado. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, p. e42101018653-e42101018653, 2021.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei nº 1323/2020.** Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2428094. Acesso em: 1 maio 2026.

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. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 2 maio 2026.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020.** Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera diversas leis. Brasília, DF: Presidência da República, 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm#view\ . Acesso em: 2 maio 2026.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lixão Zero**. Brasília, DF, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programa-projetos-acoes-obras-atividades/agendaambientalurbana/lixao-zero . Acesso em: 3 maio 2026.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2022.

Felisardo, R. J. A.; Santos, G. N. dos. Aumento da geração de resíduos sólidos com a pandemia do COVID-19: desafios e perspectivas para a sustentabilidade. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 3, n. 3, p. 030-036, 2021. Disponível em: https://zenodo.org/records/5118450 . Acesso em: 1 maio 2026.

FONTANA, Felipe; PEREIRA, Ana Carolina Torrente. Pesquisa documental. **Metodologia da pesquisa em educação e ensino de ciências**, v. 2, p. 42-58, 2023.

Freitas, M. F., Pires, M. M., & Benincá, D. (2024). Fragilidades e potencialidades na gestão dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. urbe. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v.16, e20230271. https://doi.org/10.1590/2175-3369.016.e20230271

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Taxa de desocupação cai a 7,8% em 2023, menor patamar desde 2014.** 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/39022-taxa-de-desocupacao-cai-a-7-8-em-2023-menor-patamar-desde-2014 >. Acesso em: 3 maio 2026.

Nascimento, E. C.; Sousa, T. S.; Rossi, C. B. O consórcio intermunicipal entre as soluções de disposição de resíduos sólidos urbanos: um estudo econômico aplicado no sul de Minas Gerais. **Rev. Bras. Gest. Amb. Sustent.** [online]. 2022, vol. 9, n. 21, p. 497-508. ISSN 2359-1412. DOI: 10.21438/rbgas(2022)092132

Paula, E. P; de. DO LIXÃO AO ATERRO SANITÁRIO: DESAFIOS E AVANÇOS NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL – O CASO DE PERNAMBUCO COMO EXEMPLO DE SUCESSO. **Revista do Ministério Público de Contas do Estado do Paraná**, [S. l.], v. 13, n. 22, p. 165–177, 2026. DOI: 10.5281/zenodo.18894218. Disponível em: https://revista.mpc.pr.gov.br/index.php/RMPCPR/article/view/244. Acesso em: 2 maio. 2026.

Rangel, D. A.; Abud, N. A. B.; Matta, L. G. da; Ahmed, F. Um olhar sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos: disposição final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e os desafios a partir da pandemia da COVID-19. **REVISTA DELOS**, [S. l.], v. 17, n. 59, p. e1968, 2024. DOI: 10.55905/rdelosv17.n59-029. Disponível em: https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/1968. Acesso em: 2 maio. 2026.

RODRIGUES, A. da S.; SOUZA, C. R. de; GALHARDO, C. X.; SILVA, P. T. de S. e. A representatividade da compostagem na destinação dos resíduos orgânicos no Brasil e nordeste brasileiro. **Revista Tecnologia e Sociedade,** v. 18, n. 53, 2022. Disponível em:< https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/15479/9044# >. Acesso em: 3 maio 2026.

EFEITO DA ENSILAGEM DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA DIGESTÃO ANAERÓBIA EM ESTÁGIO SÓLIDO

1 Carlos Vitor Ribeiro Pereira, 2 Larissa Maria Silveira Pereira, 3 Thiago Edwiges

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: carlospereira.2017@alunos.utfpr.edu.br; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: larissamsilveirap@gmail.com; 3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail:thiagoe@utfpr.edu.br

Palavras-chave: Biogás; pré-tratamento; resíduos lignocelulósicos.

Introdução

A indústria de cana-de-açúcar representa um dos sistemas agroindustriais mais importantes a nível nacional, no qual o Brasil se destaca por ocupar a posição de maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com estimativas de produção de cerca de 663,4 milhões de toneladas no ciclo 2025/26 segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2025). Diante desse cenário, a produção de cana-de-açúcar gera uma grande quantidade de resíduos, dentre os quais, se destaca o bagaço. Esse material é considerado um subproduto agroindustrial lignocelulósico, gerado durante a fabricação de açúcar, após a extração do caldo de cana-de-açúcar.

Os substratos lignocelulósicos caracterizam-se por apresentar uma estrutura complexa em seus tecidos vegetais, que é responsável por proporcionar as características de resistência e rigidez (Basera; Chakraborty; Sharma, 2024). Nesse sentido, os substratos lignocelulósicos são constituídos por celulose, hemicelulose e lignina, essa estrutura complexa é responsável por limitar a biodegradabilidade, sendo assim, a recalcitrância desse tipo de substrato pode comprometer a eficiência de processos de conversão biológica (Alrowais et al., 2026).

Diante disso, a digestão anaeróbia em estágio sólido se apresenta como uma forma de tratamento biológico para os resíduos lignocelulósicos. Esse processo ocorre em condições anaeróbias através da ação de microrganismos que degradam e estabilizam a matéria orgânica, gerando o biogás, sendo também indicado para o tratamento de resíduos com alto teor de sólidos totais (Raposo et al., 2012). Contudo, devido as características recalcitrantes dos resíduos lignocelulósicos, a digestão anaeróbia em estágio sólido isoladamente não apresenta desempenho suficiente na produção de biogás, tornando necessário uma etapa de pré-tratamento (Lu et al., 2023).

Nesse sentido, o processo de ensilagem para a digestão anaeróbia em estágio sólido pode ser uma solução para alcançar um maior rendimento de metano (Sukphun; Wongfaed; Reungsang, 2024), visto que o processo consiste em uma técnica de preservação controlada de um material em condições anaeróbias, com o intuito de melhorar a conservação do material ensilado através da fermentação (Alrowais et al., 2026). Sendo assim, a ensilagem é apta a criar um ambiente ácido capaz de dificultar a proliferação dos microrganismos que são responsáveis pela a degradação durante o armazenamento e promover a acumulação de ácidos orgânicos, o que pode induzir uma solubilização da fração hemicelulósica, contribuindo para a quebra da estrutura lignocelulósica da biomassa (Sun et al., 2020; Zhao et al., 2017; Sun et al., 2021). Com isso, o objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito da ensilagem do bagaço de cana-de-açúcar, associada ao uso de aditivos químicos e biológicos, no desempenho da digestão anaeróbia em estágio sólido por meio do ensaio de potencial bioquímico de metano.

Material e Métodos

Como etapa inicial, foi realizada a caracterização físico-química do bagaço de cana-de-açúcar *in natura* (BCA) e dos aditivos utilizados no pré-tratamento (ureia, melaço e inoculante bacteriano). As análises de pH, sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV), foram determinadas de acordo com o Standard Methods (APHA, 2017). O nitrogênio total Kjeldahl (NTK), foi determinado pelo método micro-Kjeldahl (Malavolta et al., 1989) e a relação C/N foi calculada pela razão entre o carbono orgânico total (COT) e o NTK. Em seguida foi realizado o balanço de massa dos substratos e aditivos antes do início do processo de ensilagem. A Tabela 01 apresenta o balanço de massa dos materiais de entrada utilizados no processo de ensilagem.

Tabela 01: Balanço de massa do processo de ensilagem.
Fonte: Autoria própria (2026)

Material de entrada	Massa (g)	ST (%)	Massa ST (g)	ST ensilagem (%)	Umidade ensilagem (%)
BCA	80,00	0,9119	72,95		
Ureia	1,24	0,9906	1,23		
Melaço	6,65	0,7204	2,63		
IB	0,04	0,9766	0,04	65,00	35,00
Água	33,30	0,0000	0,00		
Soma	**118,22**	**-**	**76,84**		

BCA: Bagaço de cana-de-açúcar; IB: Inoculante bacteriano; ST: Sólidos totais.

O processo de ensilagem seguiu a metodologia empregada por Cui et al. (2021), na qual os aditivos foram homogeneizados em agitador magnético, aplicados por borrifação sobre o material, garantindo uma distribuição uniforme e posteriormente, acondicionado em saco de polietileno (50 x 40 cm), a vácuo e mantidos em temperatura ambiente, na ausência de luz solar, por um período de 30 dias.

Para o teste de potencial bioquímico de metano (PBM) foram analisadas duas condições, além do inóculo (INO), sendo elas: o BCA e a silagem (SIL) gerada na etapa de pré-tratamento. Em relação ao inóculo, foi preparada uma mistura da fração líquida e sólida provenientes de um reator anaeróbio tipo CSTR (Continuos Stirred Tank Reactor), com volume aproximado de 5.000 m³, operado em condições mesofílicas à 37 ºC, pertencente a US Bioenergia da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) em Curitiba/PR. O teste de PBM foi realizado em frascos de vidro com volume total de 250 mL, vedados com septos de borracha butílica e tampas rosqueáveis, garantindo as condições anaeróbias. A relação substrato-inóculo (RSI) adotada foi de 1 e ST dos reatores de 20%. As amostras foram mantidas em incubadora à 37 ºC por 32 dias. Ao final do teste de PBM, foi realizada a caracterização físico-química dos digestatos dos tratamentos.

Resultados e Discussão

O pH da silagem (Tabela 02) de 7,4 não se estabeleceu na faixa ideal do processo identificado por Cui et al. (2021) de 4 – 5,5. Em geral, a aplicação do inoculante bacteriano tem o efeito principal de acelerar o processo de fermentação, contribuir para uma queda rápida do pH e proporcionar uma estabilidade da silagem (Zhao et al., 2017). No entanto, esse efeito não foi observado de forma suficiente no estudo, devido a capacidade de tamponamento gerado pela ureia no material ensilado (Cui et al. 2021).

Tabela 02: Caracterização físico-química dos substratos, aditivos e inóculo.
Fonte: Autoria própria (2026)

Amostras	pH	ST (%$_{BU}$)	SV (%$_{BU}$)	SV/ST	COT (%$_{ST}$)	NTK (%$_{ST}$)	C/N
BCA	N.D.	91,2±0,1	88,1±0,4	97,0±0,3	53,9±0,2	0,2±0,0	274/1
Silagem	7,4±0,0	65,3±1,1	64,0±1,4	98,0±0,4	54,5±0,2	1,1±0,0	51/1
Inóculo	8,8±0,0	15,2±0,4	10,0±0,4	66,0±1,1	36,7±0,6	5,1±0,1	7/1
Ureia	7,3±0,1	99,1±0,0	92,2±0,8	93,0±0,8	51,7±0,4	39,5±0,9	1/1
Melaço	5,8±0,0	72,0±0,2	61,0±4,1	84,7±5,7	47,1±3,1	N.D.	N.D.
IB	6,0±0,0	97,7±0,1	85,3±0,6	87,3±0,6	48,5±0,3	2,0±0,1	24/1

BCA: Bagaço de cana-de-açúcar; IB: Inoculante bacteriano; ST: Sólidos totais; SV: Sólidos voláteis; COT: Carbono orgânico total; NTK: Nitrogênio total Kjeldahl; C/N: Relação carbono/nitrogênio; N.D.: Não determinado.

Em relação a ST do BCA (Tabela 02), o processo de ensilagem reduziu de 91,2% para 65,3%, enquanto o valor de SV/ST de 97,0 indica um material rico em matéria orgânica. A relação C/N foi de 274/1, evidenciando um substrato predominantemente carbonáceo. Após a ensilagem, essa relação foi reduzida para 51/1, entretanto permaneceu acima da faixa ideal para a digestão anaeróbia, geralmente situada entre 20 – 30/1 (Brown; Li, 2013). A Figura 01 apresenta os gráficos da produção acumulada de biogás e da porcentagem de CH_4 seco, referentes ao teste de PBM.

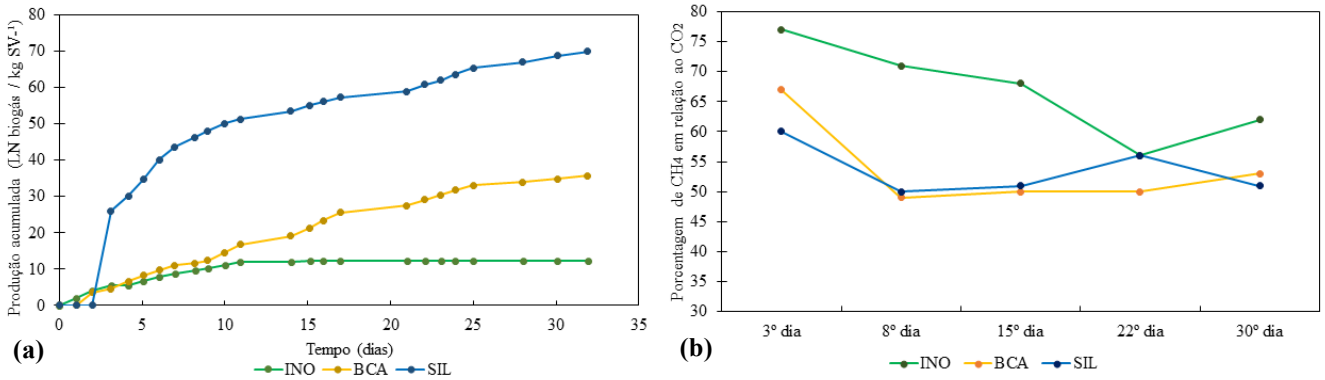


Figura 01: a) Gráfico da produção acumulada de biogás; b) Gráfico da porcentagem de CH_4 seco.
Fonte: Autoria própria (2026)

Diante dos resultados da Figura 01a, a amostra INO apresentou a menor produção de biogás em relação às demais, com o valor de 12 LN biogás kg_{SV}^{-1} estabilizando entre o décimo e décimo quinto dia. O BCA obteve uma produção intermediária de 36 LN biogás kg_{SV}^{-1} com estabilização gradual ao final do processo. Por sua vez, o SIL teve um início de produção mais tardio em comparação com as outras amostras, mas atingiu a maior produção acumulada de biogás de 70 LN biogás kg_{SV}^{-1}, produzindo 94% a mais que o BCA, indicando que o pré-tratamento com ensilagem trouxe efeitos positivos no desempenho do processo de digestão anaeróbia em estágio sólido.

Em relação a Figura 01b, a amostra INO manteve a maior porcentagem de metano seco durante praticamente todo o processo, com valores de 62 a 77%. Por outro lado, as amostras SIL e BCA apresentaram valores próximos entre si, variando de 51 a 67%. Esses resultados podem ser justificados pela proporção dos aditivos empregados e ao tempo de ensilagem, os quais possivelmente não foram suficientes para promover alterações expressivas na composição do material e, consequentemente, aumentar seu teor de metano. A Tabela 03 apresenta a caracterização físico-química dos digestatos.

Tabela 03: Caracterização físico-química dos digestatos.
Fonte: Autoria própria (2026)

Amostras	pH	ST ($\%_{BU}$)	SV ($\%_{BU}$)	SV/ST	COT ($\%_{ST}$)	NTK ($\%_{ST}$)	NAT ($\%_{ST}$)	AL (mg $kg_{resíduo}^{-1}$)	C/N
INO	8,3±0,0	12,6±0,2	7,7±0,25	61,3±1,0	34,1±0,5	5,6±0,2	3,0±0,1	984	5/1
BCA	7,8±0,0	13,7±0,2	10,0±0,0	72,7±1,3	40,4±0,7	4,4±0,1	2,3±0,3	302	9/1
SIL	8,3±0,0	17,2±0,5	12,8±0,3	74,6±0,2	41,4±0,1	4,3±0,1	2,4±0,3	846	10/1

INO: Inóculo; BCA: Bagaço de cana-de-açúcar; SIL: Silagem; ST: Sólidos totais; SV: Sólidos voláteis; COT: Carbono orgânico total; NTK: Nitrogênio total Kjeldahl; NAT: Nitrogênio amoniacal total; AL: Amônia livre; C/N: Relação carbono/nitrogênio.

O pH das amostras (Tabela 03) variou entre 7,8 – 8,3, situando-se em faixa próxima à neutralidade com tendência à alcalinidade, o que é característico de estabilidade na digestão anaeróbia (Abera et al., 2024). O nitrogênio amoniacal total (NAT) variou entre 2,3 e 3,0%, indicando estabilidade das condições. Quanto a amônia livre (AL), o pH mais alcalino do SIL atrelado a presença de ureia no composto favoreceram o deslocamento do equilíbrio para a formação de amônia, o que justifica a elevada concentração de 846 mg $kg_{resíduo}^{-1}$ comparado ao valor de 302 mg $kg_{resíduo}^{-1}$ do BCA (Appels et al., 2008). Por fim, quanto à relação C/N, as três amostras apresentaram valores baixos de 5 a 10/1, indicando maior disponibilidade de nitrogênio nos digestatos.

Considerações Finais

O bagaço de cana-de-açúcar possui um elevado potencial para a produção de biogás, contudo, sua estrutura lignocelulósica limita diretamente o processo da digestão anaeróbia em estágio sólido. Com base nos resultados obtidos, a ensilagem como pré-tratamento ao bagaço influenciou no desempenho do processo, promovendo alterações importantes nas características do substrato, como a redução da relação C/N de 274/1 para 51/1. A amostra SIL apresentou a maior produção acumulada de biogás com um valor de 70 LN biogás kg_{SV}^{-1}, indicando que o pré-tratamento promoveu melhorias quanto à biodegradabilidade, entretanto, isso não foi o suficiente para aumentar o teor de metano. Portanto, a ensilagem, associada ao uso de aditivos químicos e biológicos, apresenta potencial como estratégia de pré-tratamento, no entanto, há a necessidade de ajustes e testes em relação as condições inicias que irão afetar a etapa da digestão anaeróbia em estágio sólido posteriormente.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelo fomento da bolsa de pesquisa; à Fundação Araucária pelos recursos disponibilizados; ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) pelo apoio; à Sanepar pelo fornecimento do inóculo; e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Curitiba por ceder os espaços, laboratórios e equipamentos para a realização da pesquisa.

Referências Bibliográficas

Abera, G.; Biofilm application for anaerobic digestion: a systematic review and an industrial scale case. **Biotechnology for Biofuels and Bioproducts**, v. 17, p. 145, 2024

Alrowais, R.; Metwally, A.; Abdel-Daiem, M.; Said, N. Optimization of the ensiling process of carbon-rich biomass for enhaced methane production using wastewater sludge inoculum. **Environmental Sciences Europe**, v. 38, p. 63, 2026.

APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, Washington: UEA, 2017

Appels, L.; Baeyens, J.; Degrève, J.; Dewil, R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 34, p. 755-781, 2008.

Basera, P.; Chakraborty, S.; Sharma, N. Lignocellulosic biomass: insights into enzymatic hydrolysis, influential factors, and economic viability. **Discover Sustainability**, v. 5, p. 311, 2024.

Brown, D.; Li, Y. Solid state anaerobic co-digestion of yard waste and food waste for biogas production. **Bioresource. Technology**, v. 127, p. 275-280.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Conab estima produção de cana-de-açúcar em 663,4 milhões de toneladas na safra 2025/26. Brasília: Conab, 30 abr. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br/comunicacao-

institucional/sala-de-imprensa/midias-sociais/conab-estima-producao-de-cana-de-acucar-em-663-4-milhoes-de-toneladas-na-safra-2025-26?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 01 mai. 2026

Cui, X.; Sun, H., Wen, X.; Sobhi, M.; Guo, J.; Dong, R. Urea-assisted ensiling process of wilted maize stover for profitable biomethane production. **Science of the Total Environment**, v. 757, p. 143751, 2021.

Lu, B.; Zhou, L.; Mao, J.; Lei, K.; Pan, S.; Mo, L.; Du, L.; Wei, Y. Evaluation of anaerobic digestion performance and techno-economic análisis of different components of sugarcane leaf. **Journal of Cleaner Production**, v. 423, p. 138691, 2023.

Malavolta, E. ABC da adubação. 5ª ed. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, p. 292, 1989.

Raposo, F.; Rubia, M. A.; Fernández-Cegrí,v.; Borja, R. Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: an overview relating to methane yields and experimental procedures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 861-877, 2012.

Sukphun, P.; Wongfaed, N.; Reungsang, A. Assessing the potential of sugarcane leaf silage for Enhanced mathane production: Biochemical methane potential and kinetic analysis. **Industrial Crops and Products**, v. 222, p. 119550, 2024.

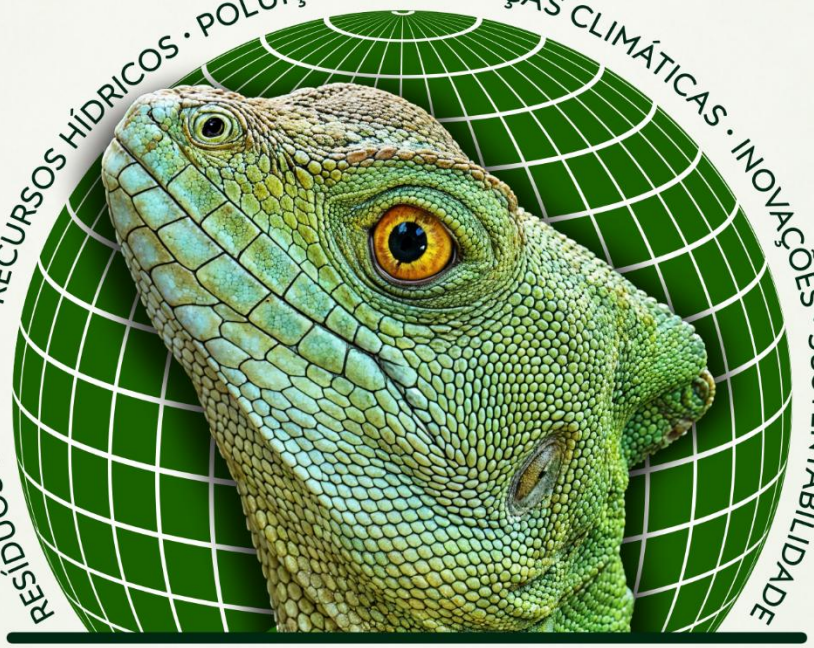
Sun, H.; Cui, X.; Stinner, W.; Zhang, L.; Ju, X.; Guo, J.; Dong, R. Ensilling excessively wilted maize stover with biogas slurry: Effects on storage performance and subsequent biogas potential. **Bioresource Technology**, v. 350, p. 123042, 2020.

Sun, H.; Cui, X.; Li, R.; Guo, J.; Dong, R. Ensiling process for efficient biogas production from lignocellulosic substrates. Methods, mechanisms and measures. **Bioresource Technology**, v. 342, p. 125928, 2021.

Zhao, X.; Liu, J.; Liu, J.; Yang, F.; Zhu, W.; Yuan, X.; Hu, Y.; Cui, Z.; Wang, X. Effect of ensiling and silage aditives on biogas production and microbial community dynamics during anaerobic digestion of switchgrass. Bioresource Technology, v. 241, p. 349-359, 2017.

ÁREA TEMÁTICA 30

SANEAMENTO RURAL



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE SISTEMAS DE ALAGADO CONSTRUÍDO CULTIVADOS COM *TYPHA ANGUSTIFOLIA* (ROTA 1) E *CRYSOPOGON ZIZANIOIDES* (ROTA 2) NO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS DE BOVINOCULTURA DE LEITE

1Glaucia Joviano Lelis, 2João Brack Duarte, 3Evandro Francisco Ferreira da Silva Souza, 4Barbara Costa Pereira, 5Marcos Filgueiras Jorge, 6Alexandre Lioi Nascentes, 7Rozileni Piont Kovsky Caletti, 8Leonardo Duarte Batista da Silva.

1 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail:glaucia_jo@ufrrj.br; 2 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail:joaobrack@gmail.com; 3 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail: evandroffss@gmail.com; 4 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail: barbaracp90@gmail.com; 5 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail: filgueiras_jorge_marcos@hotmail.com; 6 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail:alexandrelioi@gmail.com; 7 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail: rozileni.pkc@hotmail.com; 8 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail: monitoreambiental@gmail.com.

Palavras-chave: Efluente, capim vetiver, taboa.

Introdução

A quantidade de dejetos produzidos diariamente em empreendimentos de bovinocultura leiteira corresponde ao principal problema ambiental desta atividade produtiva, sobretudo em sistemas de manejo intensivo. A disposição dos resíduos das instalações animais tem se constituído num desafio para criadores e especialistas, pois envolvem aspectos técnicos, sanitários e econômicos (MELO, 2017).

Formados principalmente por urina, fezes, detergentes provenientes da limpeza, resíduos de leite e água de lavagens, os efluentes gerados em espaços limitados como as salas de ordenhas, concentram altas taxas de matéria orgânica e de nutrientes como nitrogênio e fósforo, apontados como importantes causadores de poluição ambiental (PELISSARI et al., 2013).

Este efluente, quando despejado sem tratamento no solo ou corpos hídricos, possui um elevado potencial poluidor, capaz de acarretar diversos malefícios para o meio ambiente. Dentre as consequências da disposição inadequada deste efluente, destacam-se a salinização e aumento da toxicidade do solo, prejuízos significativos à estrutura do solo, contaminação de homens e animais por patógenos, contaminação de águas subterrâneas e eutrofização do curso d'água (MATOS, 2007).

Do ponto de vista ecológico, o termo "eutrofização" designa o processo de degradação que sofrem os lagos e outros reservatórios naturais de água quando, excessivamente enriquecidos de nutrientes. Isso porque, a proliferação exponencial de algas e cianobactérias ocasionam a diminuição de oxigênio dissolvido e dificulta a penetração de radiação solar no corpo d'água, limitando significativamente as atividades biológicas do sistema.

Diversas técnicas de tratamento não convencionais vêm sendo estudadas e desenvolvidas para o tratamento de efluentes agroindustriais. Entre essas tecnologias, podemos citar: Fossa séptica biodigestora, Rampa de escoamento superficial, Reatores anaeróbios orgânicos, Lagoa de estabilização e Sistemas de Alagado Construído (JORGE, 2018).

Dentre as tecnologias utilizadas no tratamento de efluentes, o Sistema Alagado Construído (SAC) tem sido apresentado como uma técnica ambiental eficiente e economicamente viável (AVELAR, 2012). Neste tratamento é utilizado o sistema substrato-planta-microrganismos e a radiação solar como reatores para a depuração dos resíduos.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a eficiência da utilização de um Sistema de Alagado Construído no tratamento da água residuária de bovinocultura de leite. Os objetivos específicos são: avaliar a capacidade de remoção de nitrito, nitrato, fósforo e nitrogênio amoniacal dos SACs cultivados com Taboa (*Typha angustifolia*) e capim Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*); avaliar a variação de Sólidos Suspensos Totais (SST), turbidez, cor, Condutividade Elétrica (CE) e Potencial Hidrogeniônico (pH) nos SACs cultivados com Taboa e capim Vetiver; e comparar a eficiência das duas rotas do Sistema Piloto de Tratamento de Efluente no tratamento da água residuária de bovinocultura de leite em um sistema orgânico de produção.

Material e Métodos

O trabalho foi desenvolvido na área do Sistema Integrado de Produção Agroecológica (SIPA), conhecida também como "Fazendinha Agroecológica km 47", desenvolvida a partir de uma parceria ente a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) Agrobiologia e a Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro (PESAGRO – RIO). Localizando-se no município de Seropédica, pertencente ao estado do Rio de Janeiro e com 33 metros de altitude em relação ao nível do mar, com coordenadas geográficas 22º48'00''S de latitude e 43º41'00''W de longitude. Conforme a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Aw, com verões chuvosos e inverno seco, precipitação média anual ao redor de 1200 mm e temperatura média anual 25,7 °C.

Neste trabalho, foi utilizada água residuária de bovinocultura de leite (ARB), obtida do estábulo do SIPA. A ARB é uma mistura composta por restos de leite, pelo dos animais, restos vegetais que foram oferecidos como alimento, fezes, urina e a água utilizada como meio de transporte da mistura. A caracterização da ARB foi realizada no Laboratório de Monitoramento

Ambiental I – Água e Efluentes do Departamento de Engenharia lotado no Instituto de Tecnologia da UFRRJ. No laboratório, seguindo a metodologia do Standart methods for the examination of water and wastewater (APHA, 1995), foram analisados os seguintes parâmetros: nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, fósforo, sólidos suspensos totais (SST), turbidez, cor, condutividade elétrica (CE), e potencial hidrogeniônico (pH).

Na Tabela 01 é apresentado valores médios dos parâmetros analisados, caracterizando a água residuária da primeira etapa da estação piloto de tratamento, a esterqueira.

Tabela 01. Valor médio de nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, fósforo, sólidos suspensos totais, turbidez, cor, condutividade elétrica e potencial hidrogeniônico na ARB bruta.

Parâmetro	Valor médio
Nitrato ($mg.L^{-1}$)	10,18
Nitrito ($mg.L^{-1}$)	1,11
Nitrogênio amoniacal ($mg.L^{-1}$)	84
Fósforo ($mg.L^{-1}$)	189
Sólidos suspensos totais ($mg.L^{-1}$)	468
Turbidez (FTU)	486,75
Cor (PtCo)	8312,5
Condutividade elétrica (dS/m)	3,06
Potencial hidrogeniônico	6,8

A unidade piloto de tratamento (UPT) da ARB, é constituído por: esterqueira (P1); tanque séptico (P2); filtro biológico de fluxo ascendente (P3.1), filtro biológico de fluxo descendente (P3.2); dois leitos cultivados de fluxo horizontal subsuperficial, sendo um cultivado com taboa e outro com capim vetiver (Figura 01).

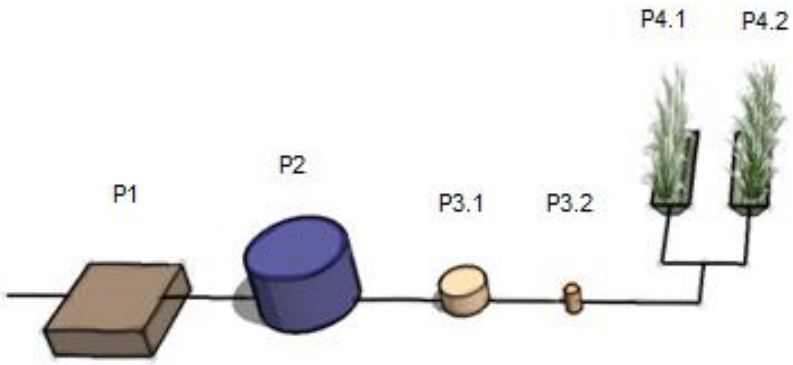


Figura 01 - Fluxograma em perspectiva da UPT instalada no SIPA, composta por: P1 – esterqueira; P2 – tanque séptico; P3.1 – filtro de fluxo ascendente; P3.2 – filtro de fluxo descendente; P4.1 - SAC cultivado com taboa; e 4.2 – SAC cultivado com capim vetiver.

Com o objetivo de conhecer a variabilidade dos resultados obtidos pelo monitoramento do SAC, tal como, aferir a eficiência do sistema piloto de tratamento de efluente, avaliou-se por meio de planilhas eletrônicas a dispersão dos dados.

As análises laboratoriais foram realizadas no "Laboratório de Monitoramento Ambiental I – Água e Efluentes" do Departamento de Engenharia da UFRRJ, seguindo-se as recomendações contidas no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1995). Foram coletadas no decorrer dos 8 meses de análise 110 amostras, os parâmetros analisados foram: Sólidos Suspensos Totais (SST), Turbidez, Cor, Condutividade Elétrica (CE), Potencial Hidrogeniônico (pH), Nitrato, Nitrito, Nitrogênio amoniacal e Fósforo. Com os parâmetros observados, foram elaboradas as Tabelas 2 e 3, apresentando médias de entrada e saída dos parâmetros analisados e seus respectivos desvios padrões, juntamente com a eficiência de remoção dos parâmetros para cada sistema.

Resultados e discussão

Para melhor entendimento destes, os dados coletados durante o experimento foram trabalhados e apresentados em forma de tabela, como pode ser observado na Tabela 02 e 03. Os resultados obtidos estão descritos em etapas, divididos a partir dos parâmetros estudados e de cada fase do sistema de tratamento.

Tabela 02. Concentração dos parâmetros analisados (nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, fósforo, sólidos suspensos totais, turbidez, cor, condutividade elétrica e potencial hidrogeniônico) na entrada e na saída do sistema piloto de tratamento de efluente cultivado com taboa (rota 1) e o desvio padrão (DP) das amostras.

	Entrada		Saída		
	Média	DP	Média	DP	Eficiência
Nitrato ($mg.L^{-1}$)	10,18	0,14	5,72	0,08	43,7%
Nitrito ($mg.L^{-1}$)	1,11	0,02	0,53	0,02	52,3%
Nitrogênio amoniacal ($mg.L^{-1}$)	84	1,49	79,29	1,07	5,6%
Fósforo ($mg.L^{-1}$)	189	0,91	138,85	0,58	26,5%
Sólidos suspensos totais ($mg.L^{-1}$)	468	0,35	54,18	0,03	88,4%
Turbidez (FTU)	486,75	19,49	83,31	1,08	82,9%
Cor (PtCo)	8312,5	266,38	2262,5	24,21	72,8%
Condutividade elétrica (dS/m)	3,06	25,49	2,65	19,39	13,4%
Potencial hidrogeniônico	6,8	0,42	6,9	0,52	-

A rota 1 (Tabela 02) apresentou taxas significativas de eficiência acumulada (levando em consideração todas as etapas) nos seguintes parâmetros: nitrato (43,7%), nitrito (52,3%), sólidos suspensos totais (88,4%), cor (72,8%) e turbidez (82,9%).

Tabela 03. Concentração dos parâmetros analisados (nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, fósforo, sólidos suspensos totais, turbidez, cor, condutividade elétrica e potencial hidrogeniônico) na entrada e na saída do sistema piloto de tratamento de efluente cultivado com capim vetiver (rota 2) e o desvio padrão das amostras.

	Entrada		Saída		
	Média	DP	Média	DP	Eficiência
Nitrato ($mg.L^{-1}$)	10,18	0,14	5,12	0,09	49,7%
Nitrito ($mg.L^{-1}$)	1,11	0,02	0,55	0,01	50,5%
Nitrogênio amoniacal ($mg.L^{-1}$)	84	1,49	82,72	0,99	1,5%
Fósforo ($mg.L^{-1}$)	189	0,91	132,16	0,33	30,1%
Sólidos suspensos totais ($mg.L^{-1}$)	468	0,35	56,48	0,03	87,9%
Turbidez (FTU)	486,75	19,49	85,1	0,93	82,5%
Cor (PtCo)	8312,5	266,4	2305,7	19,47	72,3%
Condutividade elétrica (dS/m)	3,06	25,49	2,73	28,33	10,8%
Potencial hidrogeniônico	6,8	0,42	6,8	0,56	-

A rota 2 (Tabela 03) apresentou taxas significativas de eficiência acumulada (levando em consideração todas as etapas) nos seguintes parâmetros analisados: nitrato (49,7%), nitrito (50,5%), sólidos suspensos totais (87,9%), cor (72,3%) e turbidez (82,5%).

É importante ressaltar que, nos casos que ocorre uma diminuição linear do parâmetro estudado à medida que o efluente segue pelas etapas do sistema piloto de tratamento de efluente, as etapas conseguintes se relacionam com um efluente com uma menor concentração do parâmetro em questão, fazendo com que sua remoção seja mais difícil. Isso quer dizer que os valores absolutos devem ser interpretados mediante a análise da posição da etapa de tratamento dentro do sistema e a concentração do efluente naquele dado momento.

A grande eficiência do sistema na remoção de sólidos suspensos totais é um ponto muito importante quando propomos a utilização deste efluente tratado na fertirrigação agrícola, uma vez que a diminuição eficiente deste parâmetro diminui a propensão de entupimento dos gotejadores e, portanto, uma maior eficiência operacional do sistema.

Considerações Finais

O sistema piloto de tratamento de efluente teve particular destaque na remoção de parâmetros físicos da água residuária de bovinocultura de leite, com notoriedade na remoção de sólidos suspensos totais, cor e turbidez. Os dois alagados apresentaram taxas de remoção muito similares dos parâmetros analisados pelo estudo e não registraram diferença significativa entre si.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Embrapa Agrobiologia e Fazendinha Agroecológica Km 47.

Referências bibliográficas

AMERICAM PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – Standart methods for the examination of water and wastewater. New York. APHA, WWA, WPCR, 19ª ed., 1995.

AVELAR, F. F. Desempenho de sistemas alagados construídos cultivados com *Mentha aquatica* no tratamento de esgoto sanitário. Viçosa: UFV, 2012. 79p. (Tese de Doutorado).

JORGE, M. F. Tratamento e disposição final de águas residuárias de bovinocultura em solos sob manejo orgânico de produção de olerícolas. Rio de Janeiro: UFRRJ. 179p. 2018. (Tese de Doutorado).

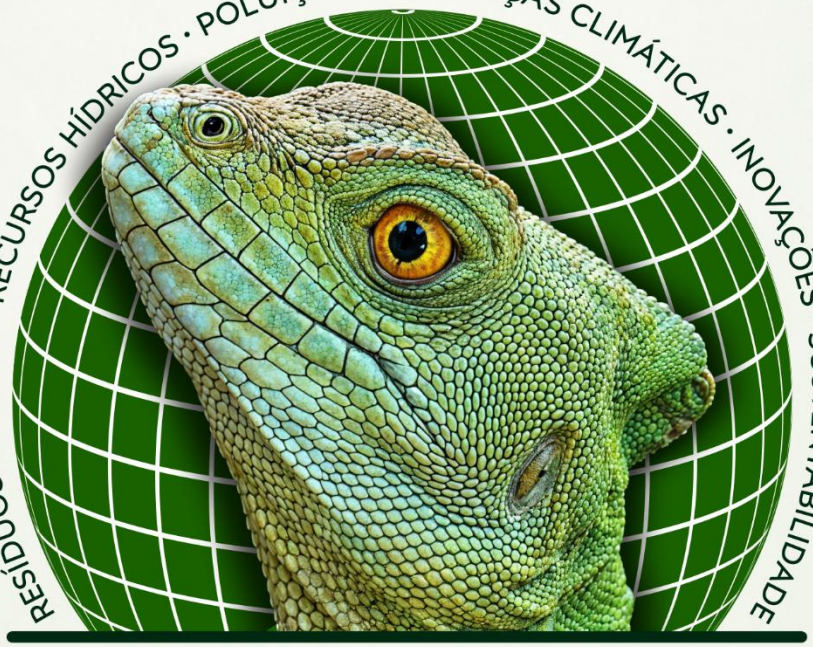
MATOS, A.T.; Disposição de águas residuárias no solo. Viçosa, MG: AEAGRI, (Caderno Didático n. 38), 142p., 2007.

MELO, A. C. F. Tratamento de água residuária de bovinocultura de leite, utilizando sistema de alagado construído cultivado com capim vetiver. Rio de Janeiro: UFRRJ. 70p. 2017. (Dissertação de Mestrado).

PELISSARI, C. Tratamento de efluente proveniente da bovinocultura de leite empregando *wetlands* construídos de escoamento subsuperficial. Santa Maria: UFSM, 2013. 139p. (Dissertação de Mestrado).

ÁREA TEMÁTICA 31

SANEAMENTO: ABASTECIMENTO, TRATAMENTO E DISTRIBUIÇÃO



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

FILTRO LENTO DE AREIA EM DUPLA CAMADA: UMA PROPOSTA DE CONTRIBUIÇÃO PARA A UNIVERSALIZAÇÃO DO SANEAMENTO

1 Silvia Helena Assis Oliveira Barbosa, 2 Ícaro Thiago Andrade Moreira, 3 Maria Elisabete Santos
1 Embasa, e-mail: silvia.barbosa@embasa.ba.gov.br; 2 UFBA, e-mail: icarotam@ufba.br; 3 UFBA, e-mail: betesantos@ufba.br

Palavras-chave: Saneamento Alternativo; Filtração Lenta; Recursos Hídricos.

Introdução

A democratização do saneamento básico no território nacional defronta-se com óbices estruturais que demandam metodologias disruptivas e de reduzido aporte financeiro. Sob tal perspectiva, a implementação de tecnologias sociais e métodos não convencionais a exemplo da filtração lenta configura-se como uma tática resolutiva para aglomerados rurais e assentamentos precários, consoante o exame de Carneiro (2025) acerca de dispositivos simplificados em Ouro Preto. Na visão de Vilanova et al. (2025), O autor estabelece que a vulnerabilidade social não é apenas uma condição econômica, mas espacial e estrutural. Quando o Estado falha em prover o saneamento, ele nega o "direito à cidade" e à permanência digna no território. Portanto, a tecnologia (filtro lento de areia, por exemplo) deixa de ser apenas uma ferramenta de engenharia e passa a ser um instrumento de garantia de direitos.

Nesse âmbito, a expansão do aparato hídrico sobrepuja o viés meramente técnico, estabelecendo-se como um alicerce precípuo para a salvaguarda de prerrogativas civis e para a viabilidade de programas públicos de equidade. A interdependência entre a disponibilidade de saneamento e a fixação de comunidades marginalizadas em seus espaços de direito ratifica que a ineficiência dos serviços essenciais recrudesce as disparidades socioambientais (OLIVEIRA, 2023). Por conseguinte, o estudo do filtro biológico de areia em camada dupla ancora-se no pressuposto de que mecanismos de baixo custo operacional e elevada performance constituem ferramentas vitais para a atenuação de passivos históricos, conectando a extensão acadêmica às demandas fáticas de populações preteridas.

Em virtude do exposto, o presente estudo propõe-se a mensurar a eficiência de um sistema de filtração de dupla camada como instrumento de suporte decisório e auxílio à governança hídrica em zonas de fragilidade social (COSTA FILHO, 2025). A pertinência desta investigação reside na aptidão de customizar soluções de saneamento rural e descentralizado — como as fomentadas pelo SISAR —, adequando-as às especificidades do semiárido e de demais localidades com percalços no provimento de água (DE LUCENA ROCHA et al., 2025). Por intermédio do estudo de caso aqui delineado, intenta-se comprovar que o pragmatismo operacional, aliado ao rigor metodológico, pode viabilizar alternativas fidedignas para a universalização do suprimento de água potável de maneira resiliente e perene.

Material e Métodos

A presente pesquisa do método de estudo de caso, com abordagem tem como a pesquisa quali-quantitativa, para avaliar o desempenho do sistema de filtração proposto. O aparato experimental consiste em um filtro de fluxo descendente estruturado por uma camada superior de material granular específico, sobreposta a uma subcamada de areia previamente selecionada. A coleta de dados foi realizada em intervalos controlados, em conformidade com as diretrizes do evento científico, que preveem a ausência de notas de rodapé no corpo do texto. Os parâmetros de avaliação contemplaram turbidez, cor aparente e indicadores microbiológicos, cujos resultados foram confrontados com os padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação vigente, seguindo a lógica de parâmetros hidráulicos aplicada a sistemas alternativos descrita por Uchôa et al. (2026).

A configuração estrutural do sistema experimental concebida para simular condições reais de operação em pequena escala, permite a análise da cinética do processo de filtração e da formação da película biológica no meio filtrante. A composição do leito, firma -se sobreposição de granulometrias distintas, tem como objetivo reduzir a retenção física de partículas e favorecer a atividade microbiana aeróbia, princípio fundamental das tecnologias sociais aplicadas ao saneamento ecológico (ARAÚJO et al., 2023). Portanto a fase de monitoramento, a taxa de filtração foi rigorosamente controlada para evitar a compactação prematura do leito e assegurar a confiabilidade dos dados hidráulicos obtidos, em consonância com as premissas de modelos de apoio à decisão voltados à gestão de recursos hídricos em comunidades vulneráveis (COSTA FILHO, 2025).

A amostragem da água realizada em pontos estratégicos do sistema, abrangendo tanto a entrada da água bruta quanto a saída do efluente tratado, com o objetivo de quantificar a eficiência de remoção de contaminantes físico-químicos e bacteriológicos. As análises laboratoriais seguiram rigorosamente protocolos estabelecidos por normativas técnicas, assegurando a precisão necessária para subsidiar discussões socioambientais relacionadas à Tarifa Social e à acessibilidade hídrica (ROQUES, 2024). A rigor metodológico possibilitou avaliar se o sistema simplificado de tratamento semelhante aos modelos empregados em áreas subnormais atende aos requisitos de segurança sanitária indispensáveis à universalização do abastecimento de água em territórios de difícil acesso (CARNEIRO, 2025).

Resultados e Discussão

As evidências preliminares deste estudo de caso sinalizam que o emprego da configuração em dupla camada potencializa substancialmente a carreira de filtração, promovendo um retardamento no processo de colmatação do leito filtrante quando contrastado aos sistemas convencionais de camada simplificada. Constatou-se uma eficiência na remoção de impurezas em patamares superiores a 90% já nos estágios iniciais de operação, o que atesta a exequibilidade técnica dessa tecnologia social para localidades providas de limitados recursos econômicos. A dinâmica hidráulica do aparato, fundamentada nos princípios de escoamento em meios porosos, ratifica a constância do fluxo hídrico mesmo diante de oscilações de carga. conforme Equação (01) abaixo:

$$(01)\ Q = \frac{K \cdot A \cdot \Delta h}{L}$$

Nesta investigação, os dados obtidos na comparação entre a água bruta e a água tratada, ressaltam a eficácia da barreira biológica (o schmutzdecke) formada na interface do filtro. Esta performance valida o uso de sistemas alternativos em zonas urbanas e rurais, em estrita consonância com os indicadores de qualidade reportados na literatura recente (UCHÔA et al., 2026).

A análise da eficiência depurativa do sistema aplica a interatividade entre as camadas de diferentes granulometrias proporciona um tempo de residência hidráulica favorável à sedimentação e adsorção de partículas coloidais. Esse fenômeno evidencia, de maneira particular, o potencial da produção de carvão ativado a partir de biomassa regional como material complementar, ampliar significativamente a capacidade de remoção de contaminantes específicos em efluentes domésticos (ALVES, 2025). A estabilidade operacional apresentada pelo filtro lento, mesmo diante de variações na turbidez da água bruta, reforça sua aplicabilidade como tecnologia social resiliente, capaz de promover a sucessão ecológica de microrganismos responsáveis pela manutenção da qualidade sanitária do recurso tratado (ARAÚJO et al., 2023).

Para além do aspecto técnico, os resultados obtidos dialogam com as demandas atuais de gestão e regulamentação dos recursos hídricos no contexto da universalização do saneamento. A eficiência do modelo simplificado analisado confirma sua viabilidade para aplicação em políticas de saneamento rural, aproximando-se de experiências bem-sucedidas fundamentadas em modelos de gestão compartilhada que buscam enfrentar os desafios históricos de abastecimento no semiárido brasileiro (DE LUCENA ROCHA et al., 2025). Sob a perspectiva da economia circular, o emprego de filtros de areia em dupla camada representa um avanço relevante em termos de sustentabilidade, ao oferecer uma alternativa de baixo impacto ambiental que concilia viabilidade financeira, equidade social e conservação dos ecossistemas locais (VILANOVA et al., 2025).

Adicionalmente às propriedades estritamente operacionais, as inferências extraídas desta investigação convergem com as prerrogativas contemporâneas de administração e normatização dos ativos hídricos. Tal alinhamento é imperativo diante do cenário de expansão da cobertura dos serviços de infraestrutura sanitária em escala nacional. Sob o prisma da regeneração de recursos e da economia circular, a implementação de mecanismos de filtração em leito de areia com estratificação dupla constitui um progresso substancial, a solução proposta configura-se como uma modalidade de intervenção de reduzida pegada ecológica, harmonizando a exequibilidade orçamentária com a justiça distributiva. Uchôa et al. (2026).

A viabilização de metodologias de filtração biológica em âmbitos coletivos ratifica a premência de se amalgamar o saber científico especializado à mobilização civil e ao ordenamento administrativo. Tal convergência é fundamental para que a transposição tecnológica não ocorra de forma isolada, mas integrada ao tecido social receptor. (DE LUCENA ROCHA et al., 2025).

Considerações Finais

Depreende-se que a filtração lenta em leito biestratificado configura-se como uma metodologia tecnicamente robusta e financeiramente exequível para viabilizar o saneamento em cenários de fragilidade socioeconômica. A convergência dessa tecnologia com diretrizes estatais destinadas ao gerenciamento e à normatização dos ativos hídricos evidencia uma capacidade latente de impulsionar os indicadores de universalização do suprimento de água. Outrossim, tal paradigma fomenta a autodeterminação das coletividades beneficiadas e assegura a observância das métricas vigentes de segurança hídrica.

O exame pericial atesta, adicionalmente, que o emprego de inovações sociais no beneficiamento hídrico transcende a condição de medida meramente mitigadora. De fato, constitui um progresso substancial no domínio da engenharia sanitária pautada na sustentabilidade. A avaliação da dinâmica sucessional de táxons durante o ciclo filtrante denota que arranjos biológicos detêm propriedades intrínsecas de depuração. Uma vez que tais processos são harmonizados a programas de extensão acadêmica, exercem um papel preponderante na mitigação das deficiências de provimento em aglomerados rurais remotos (DE SOUZA OLIVEIRA et al., 2025).

Sob essa ótica, a referida vertente permite que o saber técnico-científico, consolidado no escopo da pós-graduação stricto sensu, seja transposto à esfera pública mediante dispositivos de infraestrutura de baixo custo e alta replicabilidade. Consequentemente, intensifica-se a correlação entre a exegese acadêmica e as premências da coletividade, potencializando a relevância social da investigação científica (ARAÚJO et al., 2023).

Ademais, a adoção de sistemas simplificados de filtração em dupla camada deve ser acompanhada por um modelo consistente de apoio à decisão na gestão dos recursos hídricos. A reutilização da água e a proteção dos mananciais em áreas socialmente vulneráveis como as favelas de palafitas em regiões costeiras demandam uma compreensão aprofundada das interações entre o meio ambiente e os processos de produção do espaço urbano (MOREIRA, 2024). Nesse contexto, a eficácia técnica do filtro lento precisa estar articulada a instrumentos regulatórios que considerem a Tarifa Social e as especificidades

socioambientais de cada território. Somente assim o baixo custo operacional desses sistemas poderá se converter, de fato, em segurança hídrica para as populações mais vulneráveis (ROQUES, 2024).

Nesse contexto, conclui-se que o fortalecimento de instituições como o SISAR, aliado ao desenvolvimento e à difusão de tecnologias de baixo custo, representa um caminho promissor para enfrentar o déficit de saneamento no semiárido e em outras regiões resilientes do Brasil (DE LUCENA ROCHA et al., 2025).

Agradecimentos

Os autores expressam sua gratidão ao ProfÁgua Pólo UFBA pelo suporte institucional e técnico fornecido durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ALVES, Alessandra Oliveira Timbó. **Produção do carvão ativado a partir das podas do Ziziphus Joazeiro e avaliação da utilização no tratamento de efluentes residenciais de Crateús**. 2025.

ARAÚJO, Elaine Cristina dos Santos *et al*. **Sucessão ecológica de grupos taxonômicos no tratamento aeróbio de resíduos sólidos orgânicos utilizando tecnologia social**. 2023.

CARNEIRO, Ana Clara Magalhães. **Avaliação de um sistema simplificado de tratamento de água utilizado em uma área subnormal em Ouro Preto-MG**. 2025.

COSTA FILHO, Edilson Holanda. **Reutilização de água: contribuição para um modelo de apoio à decisão**. 2025.

DE LUCENA ROCHA, Rafaela Dantas *et al*. Saneamento rural no semiárido brasileiro: desafios, avanços e a contribuição do SISAR. **Revista DCS**, v. 22, n. 85, p. e3868, 2025.

DE SOUZA OLIVEIRA, Milena *et al*. Extensão universitária e saneamento: contribuições para uma comunidade rural. **Conecte-se! Revista Interdisciplinar de Extensão**, v. 9, n. 18, p. 147-170, 2025.

MOREIRA, Ramilton Gomes. **Natureza e produção do espaço: as relações entre meio ambiente, saneamento básico e casas de palafitas na favela Dique da Vila Gilda na cidade de Santos**. 2024. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

OLIVEIRA, Felipe Pires. **Acesso e permanência de negros e negras cotistas na Universidade Pública após a implementação da Lei nº 12.711/2012**: um estudo sobre as políticas de inclusão racial na Universidade Federal de Santa Maria. 2023.

ROQUES, Juliano. **Água para quem?** Avaliação da Tarifa Social dos usos das águas em São Leopoldo/RS sob a ótica dos estudos socioambientais. 2024.

UCHÔA, Ilana Syanne Martins *et al*. Parâmetros hidráulicos e de qualidade da água em sistema alternativo de tratamento em zona urbana amazônica. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, v. 15, n. 2, p. e3209, 2026.

VILANOVA, Daniel Rodrigo Bernardes *et al*. Saneamento básico e tecnologias ecológicas no Brasil: desafios, soluções sustentáveis e perspectivas de economia circular. **Revista Geociências**, v. 24, n. 1, p. 2, 2025.

FLOATING TREATMENT WETLANDS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

1 Enzo Guzzo Duz, 2 Rodrigo Bahia Pereira, 3 Johannes Gerson Janzen, 4 Graziele Ruas

1 Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia (UNESP), enzo.duz@unesp.br; 2 Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia (UFMS), rodrigoeamb@gmail.com; 3 Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia (UFMS), johannes.janzen@ufms.br; 4 Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia (UNESP), graziele.ruas@unesp.br

Palavras-chave: Floating Treatment Wetlands; Efluentes; Tratamento.

Introdução

A contaminação de recursos hídricos pela disposição final inadequada de efluentes domésticos ou agro-industriais não tratados é um problema global, que se manifesta mais frequentemente em países em desenvolvimento, afetando negativamente a segurança hídrica da população (Wheater; Gober, 2015). Sob esta perspectiva, é necessário desenvolver formas de tratamento de efluentes menos dependentes de produtos químicos e tecnologias associadas de alto valor, que muitas vezes são inacessíveis em localidades mais afastadas ou com condições econômicas desfavoráveis. Neste sentido, as Ilhas Flutuantes (*Floating Treatment Wetlands* - FTWs) têm se apresentado como uma possível solução para o tratamento de efluentes e como uma ferramenta para melhoria da qualidade de águas superficiais que recebem águas pluviais e efluentes (Barco; Borin, 2017; Schwammberger; Yule; Tindale, 2020). Estas estruturas são compostas por plantas fixadas em elementos flutuantes, cujas raízes se encontram submersas no efluente ou corpo hídrico. O tratamento se dá por meio de processos microbiológicos na rizosfera das plantas (Barco; Bona; Borin, 2021a), o que minimiza o uso de produtos químicos. As espécies de planta devem ser escolhidas de acordo com a tolerância aos poluentes encontrados no efluente e a disponibilidade de espécies nativas na região de utilização. Apesar dos avanços nas pesquisas sobre a temática, a aplicação de forma real e em larga escala destes sistemas é ainda incipiente, e os vários desafios ainda são em parte desconhecidos. Portanto, o objetivo desta revisão sistemática foi analisar o conhecimento produzido nos últimos dez anos (2016-2026) sobre os FTWs, mapeamento as diferentes escalas de experimentos realizados (bancada, piloto e real), plantas utilizadas, efluentes tratados e quais os poluentes monitorados e removidos nos sistemas. Determinando assim as principais lacunas, os desafios de aplicação e oportunidades de pesquisa e desenvolvimento da tecnologia.

Material e Métodos

Foi conduzida uma revisão sistemática da literatura existente na base de dados *Scopus* (https://www.scopus.com, acessada em 13 de março de 2026), a fim de identificar lacunas, oportunidades e desafios de aplicação dos FTWs, com foco nas estruturas utilizadas para suporte das ilhas, as espécies de planta utilizadas, grupo de poluentes analisados, e escala dos experimentos (bancada, piloto e real). A revisão seguiu o método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis) (Moher et al., 2009). Para tanto, foi desenvolvido um *string* de busca único: (TITLE-ABS-KEY(("floating treatment wetland*" OR FTW) AND (wastewater OR stormwater)) AND DOCTYPE(ar) AND PUBYEAR > 2015 AND PUBYEAR < 2027). As buscas foram realizadas para artigos publicados entre os anos de 2016 e 2026. Foram definidos critérios para inclusão e exclusão dos artigos encontrados na busca, para posterior análise. Estes critérios se encontram na Tabela 01:

Inclusão	Exclusão
Artigos produzidos a partir de 2016, Artigos escritos em Inglês, Espanhol ou Português, Artigos com acesso aberto.	Duplicatas, Artigos de Revisão, Capítulos de Livro, Artigos publicados antes de 2016, Artigos sem acesso aberto.

Tabela 01: Critérios de Inclusão e Exclusão de Artigos. Fonte: autores.

Após a seleção dos artigos, dados como escala experimental (bancada, piloto e real), espécies de planta utilizadas, efluentes utilizados e grupos de poluentes analisados foram extraídos com auxílio da ferramenta NotebookLM (Google, 2024), colocando como fontes os artigos e um Guia de Extração de Dados (*prompt* de comando para extração das informações), elaborado de forma a orientar a ferramenta na busca e extração das informações de interesse. Os dados extraídos foram posteriormente conferidos e validados manualmente pelos autores nas fontes originais. Para a análise quantitativa e síntese visual dos dados coletados, foi utilizada a Linguagem R (R Core Team, 2023), por meio do pacote "*tidyverse*" (Wickham et al., 2019) com as bibliotecas "*dplyr*" e "*ggplot2*", para a padronização e agrupamento das categorias e para a construção dos gráficos de frequências, respectivamente.

Resultados e Discussão

A partir da busca na plataforma *Scopus* utilizando o *string* único, foram obtidos 128 artigos, dos quais 88 foram selecionados para as análises posteriores e 40 foram excluídos, de acordo com os critérios de inclusão e exclusão determinados inicialmente (Tabela 01). Quanto à escala dos experimentos, nota-se uma predominância de sistemas piloto e laboratorial, conforme pode ser observado no gráfico a seguir (Figura 01). Esta ocorrência pode ser explicada pela relativa novidade da tecnologia e pelo conhecimento ainda incipiente em relação à geometria, melhor posicionamento, manutenção e durabilidade dos FTWs em corpos hídricos de grandes proporções, além dos custos envolvidos na elaboração e implantação de sistemas em escalas maiores.

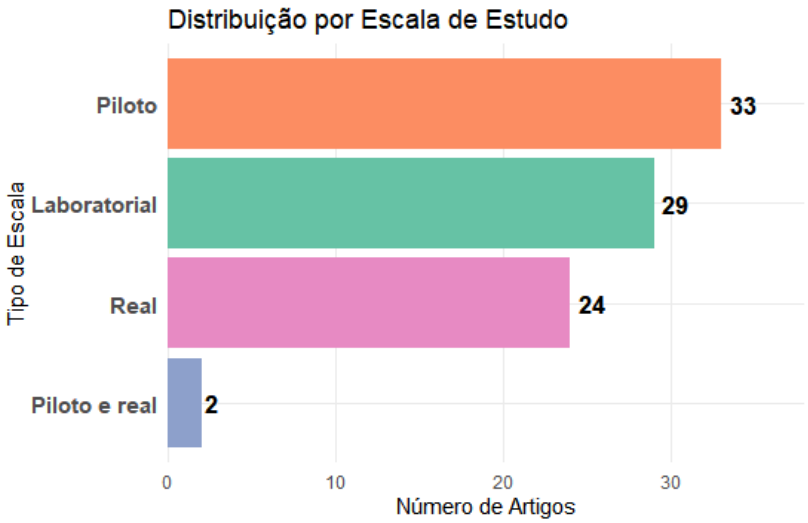


Figura 01: Número de pesquisas por escala laboratorial.
Fonte: autores.

Outro indicador importante analisado foi o tipo de efluente tratado nos experimentos, verificando-se a possibilidade de aplicação dos FTWs em situações reais para tratamento de efluentes domésticos ou industriais, que, em situações práticas, podem sofrer alterações significativas de acordo com o processo industrial e dias da semana - alterações com relação à produção e a rotina produtiva. Nesse sentido, dentre os artigos considerados nesta revisão, 52 utilizaram efluentes ou águas de drenagem reais, 25 utilizaram efluentes sintéticos e 11 experimentos utilizaram outros meios de cultivo (como água de torneira, ou águas superficiais de rios, por exemplo) ou uma mistura de efluentes sintéticos e reais. Esta distribuição pode ser observada na Figura 03. Neste contexto, observa-se um avanço na maturidade da tecnologia, a qual está sendo empregada, nos últimos anos, em escalas mais significativas (real ou piloto) e tratamento de efluentes ou águas de drenagem reais, o que aumenta a consolidação do uso dos FTWs como possível solução para melhoria da qualidade da água e para tratamento de efluentes.

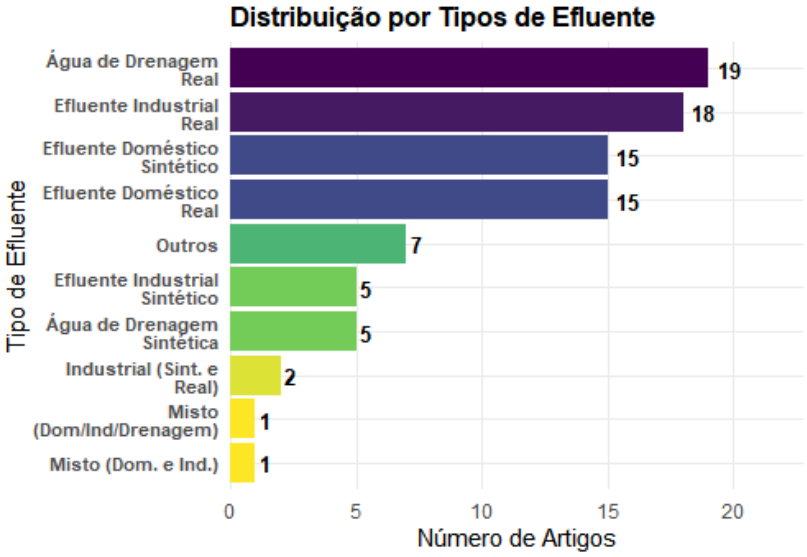


Figura 03: Número de Experimentos com FTWs por Tipos de Efluentes.
Fonte: autores.

Além disso, a escolha da espécie de planta utilizada na composição dos FTWs é de extrema importância para a efetividade do sistema na remoção e captura de poluentes e nutrientes do efluente, visto que cada espécie possui tolerância variável a certos poluentes. As espécies mais utilizadas nas pesquisas consideradas são encontradas na Tabela 02, junto ao tipo de efluente em que a espécie foi utilizada em maior número e sua eficiência média no tratamento do efluente em questão:

Espécies (Gênero)	Ocorrências	Tipo de Efluente mais Utilizado	Eficiência Média
Phragmites spp.	18	Efluente Doméstico Real	53% (DBO), 43% (DQO), 43,5% (TN); 33,5% (TP)
Carex spp.	17	Água de Drenagem Real	69,9% (TP); 17% (TN); 78,7% (SST)
Iris spp.	17	Água de Drenagem Real	86,5% (TP)
Canna spp.	15	Efluente Doméstico Real	49,2% (TN); 72,35% (DQO); 54% (DBO); 38,2% (TP)
Juncus spp.	14	Água de Drenagem Real	86,5% (TP)
Typha spp.	11	Efluente Doméstico Real	94,8% (SS); 62,8% (DQO); 81,95% (DBO); 38,45% (TN); 3,76% (TP)

Tabela 02: Gêneros de Plantas mais utilizados nos experimentos.
Fonte: autores.

Estes resultados estão de acordo com resultados encontrados em outras revisões, como os estudos realizados por Barco; Bona; Borin (2021) e Gogoi et al. (2026). Todas as espécies listadas são conhecidas pela capacidade de crescimento em efluentes com alta concentração de nutrientes e poluentes, além de apresentarem alta densidade radicular, o que propicia maior ocorrência de processos microbiológicos que contribuem para o tratamento.

Por fim, considerando os grupos de poluentes analisados nestes estudos, é possível observar a predominância na análise da remoção de séries nitrogenadas, metais pesados, Demandas Química e Bioquímica de Oxigênio (DQO e DBO, respectivamente), Fósforo e Sólidos Suspensos, com índices de remoção que atingem valores superiores a 90% em DQO e DBO (Tara et al., 2019), 61% em Nitrato (Yadav et al., 2023), 40% em fósforo (Park; Sukias; Tanner, 2019) e 76% em Sólidos Suspensos (Nichols et al., 2016). Estes nutrientes são encontrados em abundância em efluentes domésticos e industriais, que correspondem à maior contribuição para a contaminação de recursos hídricos, principalmente em países com estruturas de tratamento de efluentes pouco eficientes. A partir disto, foi possível observar que as pesquisas envolvendo FTWs estão cada vez mais focadas na fitorremediação de efluentes, além de apresentarem maior escalabilidade (devido à predominância de estudos piloto) nos últimos anos.

Assim, observa-se que os maiores desafios do emprego da tecnologia são: escalabilidade e emprego em situações reais de tratamento, principalmente em cursos d'água. Dentre as principais oportunidades de pesquisa está a aplicação e uso de plantas nativas para a fitorremediação de efluentes e águas superficiais, visto que as plantas nativas podem ter potencial de biorremediação de diferentes tipos de poluentes e fácil adaptação às condições climáticas locais, além de servirem de suporte ao ecossistema local e em alguns casos usos paisagísticos.

Considerações Finais

Esta revisão bibliográfica explorou, a partir da busca de artigos na plataforma Scopus, as pesquisas dos últimos dez anos que trataram sobre FTWs, com foco nas espécies de plantas utilizadas, grupos de poluentes avaliados, e escala experimental empregada, a fim de compreender possíveis lacunas no conhecimento existente sobre o tema. Foi possível notar um aumento na escalabilidade dos experimentos, que majoritariamente, utilizaram sistemas piloto para avaliação. Apesar disso, ainda são utilizados sistemas laboratoriais de pequena escala, que nem sempre apresentam comportamento similar a sistemas reais. Os grupos de poluentes mais estudados, como Séries de Nitrogênio, Sólidos Suspensos, DQO, DBO, Fósforo e metais pesados evidenciam a preponderância de estudos focados na biorremediação de efluentes industriais e domésticos. Contudo, nota-se o uso de efluentes sintéticos nos experimentos, que podem não ser significativos para a expansão dos resultados em situações reais, nas quais os efluentes podem sofrer variações decorrentes de dias da semana e diferentes processos industriais, por exemplo. Portanto, apesar dos avanços no conhecimento existente sobre a temática, recomenda-se a elaboração de mais pesquisas em situações reais, para melhoria na maturidade da tecnologia e aumento na possibilidade de expansão na utilização da mesma, bem como a aplicação de plantas nativas, o que pode aprimorar a fitorremediação e outros serviços ecossistêmicos dos FTWs.

Agradecimentos

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela Bolsa de Mestrado concedida a Enzo Guzzo Duz (Código de Financiamento 001, Processo 88887.178170/2025-00) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil (Processo n° 2020/15434-0).

Referências Bibliográficas

BARCO, A.; BONA, S.; BORIN, M. Plant species for floating treatment wetlands: A decade of experiments in North Italy. **Science of the Total Environment**, v. 751, 2021a.

BARCO, A.; BORIN, M. Treatment performance and macrophytes growth in a restored hybrid constructed wetland for municipal wastewater treatment. **Ecological Engineering**, v. 107, p. 160–171, 2017.

BARCO, Alberto; BONA, Stefano; BORIN, Maurizio. Plant species for floating treatment wetlands: A decade of experiments in North Italy. **Science of The Total Environment**, v. 751, p. 141666, jan. 2021b.

GOGOI, Jayanta Kumar *et al.* Design, implementation, and challenges of floating treatment wetlands for wastewater treatment: A review. **Cleaner Water**, v. 5, p. 100208, 1 mar. 2026.

GOOGLE. **NotebookLM**. Mountain View: Google, 2024. Disponível em: notebooklm.google.com . Acesso em: 13 abr. 2026.

MOHER, David *et al.* Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. **PLOS Medicine**, v. 6, n. 7, p. e1000097, 21 jul. 2009.

NICHOLS, P. *et al.* Performance evaluation of a floating treatment wetland in an urban catchment. **Water (Switzerland)**, v. 8, n. 6, 2016.

PARK, J. B. K.; SUKIAS, J. P. S.; TANNER, C. C. Floating treatment wetlands supplemented with aeration and biofilm attachment surfaces for efficient domestic wastewater treatment. **Ecological Engineering**, v. 139, 2019.

R CORE TEAM (2023). **R:** A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 13 abr. 2026.

SCHWAMMBERGER, P. F.; YULE, C. M.; TINDALE, N. W. Rapid plant responses following relocation of a constructed floating wetland from a construction site into an urban stormwater retention pond. **Science of the Total Environment**, v. 699, 2020.

TARA, N. *et al.* On-site performance of floating treatment wetland macrocosms augmented with dye-degrading bacteria for the remediation of textile industry wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 217, p. 541–548, 2019.

WHEATER, Howard S.; GOBER, Patricia. Water security and the science agenda. **Water Resources Research**, v. 51, n. 7, p. 5406–5424, 2015.

YADAV, S. *et al.* Evaluating Pilot-Scale Floating Wetland for Municipal Wastewater Treatment Using Canna indica and Phragmites australis as Plant Species. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 18, 2023.

WICKHAM, H. *et al*. Welcome to the tidyverse. **Journal of Open Source Software**, [s. l.], v. 4, n. 43, p. 1686, 2019. Disponível em: doi.org. Acesso em: 2 abr. 2026.

PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL APLICADO NA AVALIAÇÃO DO EFEITO DO PH E DOSAGEM DE ADSORVENTE NO PROCESSO DE ADSORÇÃO DOS ÍONS FLUORETO

1 Angélica Arndt Scalabrin, 2 Nátalie de Paula, 3 João Gabriel Munareto do Amaral, 4 Manuella Mayumi Rodrigues Nagamori, 5 Maria Luiza Machado e 6 Elvis Carissimi

[1] Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: angelicaascalabrin@gmail.com; [2] Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: eng.nataliedepaula@gmail.com; [3] Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: eng.joaogabriel@hotmail.com; [4] Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: nagamorimayumii@gmail.com; [5] Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: maria.machado@acad.ufsm.br; [6] Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: elvis.carissimi@ufsm.br

Palavras-chave: Fluoreto; Alumina Ativada; Planejamento Experimental.

Introdução

Sabe-se que com o passar dos anos, a poluição dos recursos hídricos vem se tornando uma problemática mundial, evidenciando a necessidade de estudos e desenvolvimento de materiais eficazes para a remoção da mesma (Anfar et al., 2020). Nesse contexto, as águas subterrâneas são uma fonte indispensável para o abastecimento público. Entre os poluentes comuns encontrados nessas matrizes, ressaltam-se os íons fluoreto (F^-). Esses íons podem ocorrer de forma natural nessas matrizes, através de atividades vulcânicas, intemperismo das rochas e até mesmo dissolução de minerais ricos em flúor, e, ainda, podem ser intensificados a partir de atividades antrópicas, como o despejo de efluentes industriais e o uso de agrotóxicos (Lacson et al., 2021). Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), o limite máximo de F^- aceitável para águas de abastecimento, é de 1,5 mg F^-/L pois, em concentrações até esse limite, o F^- é considerado um micronutriente, auxiliando na prevenção de cáries dentárias (OMS,2011). Apesar do F^- ser benéfico para a saúde bucal das pessoas em concentrações adequadas, a ingestão prolongada desse íon, em concentrações acima do permitido, pode causar diversos efeitos nocivos à saúde humana, em destaque a fluorose dentária e, em casos mais graves, fluorose óssea (Wu et al., 2022).

Tendo em vista essa problemática, faz-se necessário o estudo e aplicação de técnicas com o objetivo de realizar a desfluoretação dessas matrizes aquosas que serão utilizadas para o consumo humano. Sendo assim, vários métodos de remoção vêm sendo explorados, entretanto, o de adsorção tem se destacado por sua simplicidade de projeto, sua viabilidade econômica e a possibilidade de trabalhar com diversos materiais adsorventes (Barathi et al., 2019). Dentre esses materiais, o mais comumente utilizado é a alumina ativada (AA), em função de ser um material a base de alumínio e possuir uma alta seletividade pelos íons F^- e, além disso, a sua grande área superficial faz com que mais sítios ativos fiquem disponíveis para adsorver esse poluente (Bansiwal et al., 2010).

Dentre as abordagens aplicáveis nos estudos de adsorção, destaca-se o planejamento experimental, que possibilita a análise simultânea de múltiplas variáveis por meio de estratégias estruturadas, permitindo a obtenção de resultados com um número reduzido de experimentos. Cada estratégia apresenta vantagens e limitações, sendo sua escolha condicionada às características e aos objetivos do problema em estudo (Pereira et al., 2021). Dentro desse conjunto, tem-se o método do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). Este tipo de delineamento torna-se vantajoso pois, além de poder ser aplicado conjuntamente com o Método de Superfície de Resposta (MSR), ele fornece uma grande quantidade de informações, reduzindo significativamente a quantidade de experimentos (Kalavathy M. et al., 2009). Ainda segundo o autor, dessa forma, ele também se torna viável economicamente, pois diminui os custos de material e o tempo de produção das amostras. Já o MSR é utilizado para aprimorar ainda mais o processo e os resultados obtidos, pois através de gráficos, é possível avaliar os efeitos entre as variáveis e os efeitos das mesmas dentro do processo (Kumari & Gupta, 2019). Nesse sentido, o DCCR pode ser aplicado para o estudo de tratamento de águas. Nesse cenário, o objetivo do trabalho é aplicar a metodologia de planejamento experimental para avaliar o efeito do pH do meio e da dosagem de AA (g/L) na remoção de íons F^- das águas subterrâneas.

Material e Métodos

Segundo Rodrigues e Iemma (2014), o Delineamento Composto Central Rotacional é o modelo experimental que melhor se enquadra para analisarmos o efeito do pH do meio e da dosagem de adsorvente. Foram escolhidas essas variáveis, devido às suas importâncias dentro do processo de adsorção. Além disso, o DCCR é comumente empregado no Método de Superfície de Resposta, pois permite gerar um modelo de resposta de segunda ordem (quadrático), como exibe a Equação 01 (Pereira et al., 2021).

$$y = \beta_0 + \sum_j \beta_j x_j + \sum_{ij} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_j \beta_{jj} x_j^2 \qquad (01)$$

Para a análise estatística dos dados, o valor das variáveis independentes (pH e dosagem) foram codificadas, convertendo-se valores qualitativos em representações numéricas, com a finalidade de simplificar o processamento das informações e minimizar a ocorrência de erros, conforme ilustrado na Tabela 01.

Variável	Código	-1,41	-1	0	1	1,41
pH	X_1	4,0	4,9	7,0	9,1	10,0
Dosagem de adsorvente (g/L)	X_2	0,5	1,1	2,5	3,9	4,5

Tabela 01: Relação entre as variáveis e seus códigos.
Fonte: Autores (2026)

Após realizar as codificações, foi elaborada uma matriz do planejamento, contendo o número dos experimentos, com as devidas combinações codificadas, as concentrações iniciais e finais de F^- em mg/L e a eficiência de remoção do F^- (%), como apresenta a Tabela 02. Neste planejamento foram realizados 11 ensaios, incluindo quatro pontos fatoriais (experimentos 1 ao 4), quatro pontos axiais (experimentos 5 ao 8) e triplicata do ponto central (experimentos 9 ao 11), respectivamente.

Experimento	X_1	X_2	Conc. inicial de F^- (mg/L)	Conc. final (mg/L)	Eficiência de remoção (%)
1	-1	-1	5,02	2,28	54,58
2	1	-1	4,98	2,65	41,79
3	-1	1	5,02	1,33	73,51
4	1	1	4,98	1,53	69,28
5	-1,41	0	5,26	1,47	72,05
6	1,41	0	5,06	3,07	44,33
7	0	-1,41	5,04	3,17	37,10
8	0	1,41	5,04	1,29	74,40
9	0	0	5,04	1,65	67,26
10	0	0	5,04	1,76	65,08
11	0	0	5,04	1,71	66,07

Tabela 02: Matriz do planejamento experimental.
Fonte: Autores (2026)

Por conseguinte, iniciou-se os experimentos em batelada, onde preparou-se uma solução contendo 5 mg/L de F^-, a qual foi distribuída em béqueres de vidro, sendo cada fração ajustada aos valores de pH presentes na Tabela 01. Posteriormente, macerou-se a alumina ativada convencional granular da marca Celta Brasil com o auxílio de gral e pistilo de porcelana, até a obtenção de alumina ativada convencional em pó (AAP), com granulometria inferior a 60 *mesh*. Em seguida, as diferentes dosagens da AAP presentes na Tabela 01 foram pesadas em erlenmeyers de polipropileno e adicionado 50 mL das respectivas soluções de F^- aos frascos contendo o material adsorvente. As amostras foram então submetidas à agitação em banho-maria, durante 1 hora, a 150 rpm e temperatura de 25ºC. Após o período de agitação, as amostras foram filtradas com o uso de seringas acopladas a filtros de nylon e encaminhadas para análise por cromatografia iônica, com o objetivo de determinar as concentrações de F^-. Por fim, os resultados obtidos foram tabulados e analisados no *software* Statistica.

Resultados e Discussão

A partir da obtenção dos resultados, é realizada uma regressão, onde obtemos o valor de p. É possível perceber que, os parâmetros que possuem valores de p inferiores a 0,05 são considerados estatisticamente significativos. Dessa forma, substitui-se os valores dos coeficientes na Equação 01, com a finalidade de desenvolver um modelo matemático que descrevesse a remoção dos íons F^- em função do pH e dosagem. Os coeficientes de regressão da matriz experimental estão exibidos na Tabela 03. A Equação 02 ilustra a equação obtida através dos coeficientes de regressão do modelo, validada por um R^2 de 95,39%.

Variáveis	Coeficientes de Regressão	Erro Quadrático	t(5)	p	-95% Confiança	+95% Confiança
Média	66,12526	2,394832	27,61165	0,000001	59,9692	72,28138
X_1	-7,03408	1,468733	-4,78921	0,00493	-10,8096	-3,25858
X_1^2	-3,26839	1,752581	-1,8649	0,121205	-7,7735	1,23676
X_2	12,41356	1,468733	8,45188	0,000381	8,6381	16,18905
X_2^2	-4,49569	1,752581	-2,56519	0,050329	-9,0008	0,00946
$X_1.X_2$	2,14	2,07401	1,03182	0,34946	-3,1914	7,47141

Tabela 03: Coeficientes de regressão da matriz experimental.
Fonte: Autores (2026)

$$Remoção\ (\%) = 66{,}12 - 7{,}03.X_1 - 3{,}27.X_1^2 + 12{,}41.X_2 - 4{,}5.X_2^2 + 2{,}14.X_1.X_2 \quad (02)$$

Além da regressão, obtemos também a análise de variância (ANOVA) dos resultados, a qual está expressa na Tabela 04. Pode-se observar que o valor do F calculado é maior que o de F tabelado e que o valor de resíduo é considerado baixo. Esses resultados comprovam que o modelo gerado a partir da Equação 01, é válido estatisticamente, ou seja, os valores experimentais são muito próximos dos valores previstos, o que enaltece ainda mais a precisão do modelo.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	F tabelado
Regressão	1778,769	5	355,7537445	20,6760605	5,0503
Resíduos	86,03	5	17,20607001	-	-
Total	1864,799	10	-	-	-

Tabela 04: Análise de variância dos resultados (ANOVA).
Fonte: Autores (2026)

Por fim, a Figura 01 mostra o gráfico de contorno da análise de superfície de resposta nos mostra os efeitos do pH e da dosagem de adsorvente, na eficiência de remoção dos íons F^-.

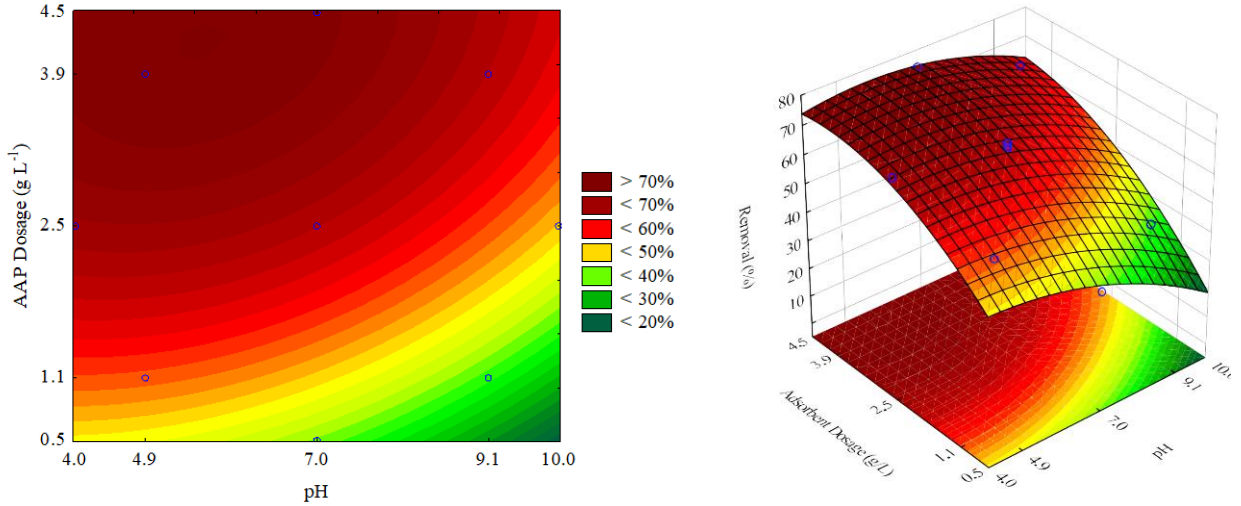


Figura 01: Superfície de resposta.
Fonte: Autores (2026)

A remoção de F^- ocorre em ampla faixa de pH, sendo mais eficiente entre 4,9 e 7,0. Maiores dosagens de AAP aumentam a eficiência, com 4,5 g/L definida como ideal para alcançar remoções acima de 70%, tornando o processo viável para águas subterrâneas com pH entre 5,5 e 8,5.

Considerações Finais

Conclui-se que a AA em pó é um adsorvente eficaz para remover íons F^- de águas subterrâneas, com eficiência superior a 70%. Além disso, o DCCR mostrou-se um método relevante para planejar e analisar a influência dos parâmetros no processo de adsorção.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), FAPERGS e a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

Anfar, Z., Ait Ahsaine, H., Zbair, M., Amedlous, A., Ait El Fakir, A., Jada, A., & El Alem, N. (2020). Recent trends on numerical investigations of response surface methodology for pollutants adsorption onto activated carbon materials: A review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 50(10), 1043–1084.

Bansiwal, A., Pillewan, P., Biniwale, R. B., & Rayalu, S. S. (2010). Copper oxide incorporated mesoporous alumina for defluoridation of drinking water. Microporous and Mesoporous Materials, 129(1–2), 54–61.

Barathi, M., Kumar, A. S. K., & Rajesh, N. (2019). Impact of fluoride in potable water – An outlook on the existing defluoridation strategies and the road ahead. Coordination Chemistry Reviews, 387, 121–128.

Kalavathy M., H., Regupathi, I., Pillai, M. G., & Miranda, L. R. (2009). Modelling, analysis and optimization of adsorption parameters for H3PO4 activated rubber wood sawdust using response surface methodology (RSM). Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 70(1), 35–45.

Kumari, M., & Gupta, S. K. (2019). Response surface methodological (RSM) approach for optimizing the removal of trihalomethanes (THMs) and its precursor's by surfactant modified magnetic nanoadsorbents (sMNP) - An endeavor to diminish probable cancer risk. Scientific Reports, 9(1), 18339.

Lacson, C. F. Z., Lu, M. C., & Huang, Y. H. (2021). Fluoride-containing water: A global perspective and a pursuit to sustainable water defluoridation management -An overview. In Journal of Cleaner Production (Vol. 280).

Pereira, L. M. S., Milan, T. M., & Tapia-Blácido, D. R. (2021). Using Response Surface Methodology (RSM) to optimize 2G bioethanol production: A review. Biomass and Bioenergy, 151, 106166.

Rodrigues, I.M., Iemma, A.F., Experimental Design and Process Optimization, 1st ed., CRC Press, 2014.

Wu, S., Wang, Y., Iqbal, M., Mehmood, K., Li, Y., Tang, Z., & Zhang, H. (2022). Challenges of fluoride pollution in environment: Mechanisms and pathological significance of toxicity – A review. In Environmental Pollution (Vol. 304).

USO DE FERRAMENTAS DE GEOPROCESSAMENTO NO ZONEAMENTO DE FLUORETO EM REGIÃO SUL DO BRASIL

Manuella Mayumi Rodrigues Nagamori[1], João Gabriel Munareto do Amaral[2], Angélica Scalabrin[3], Nátalie de Paula[4], Maria Luiza Machado[5], Elvis Carissimi[6]

1 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: nagamorimayumii@gmail.com; 2 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: eng.joaogabriel@hotmail.com; 3 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: angelicaascalabrin@gmail.com; 4 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: eng.nataliedepaula@gmail.com; 5 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: marrialuizamachado@gmail.com; 6 Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: elvis.carissimi@ufsm.br

Palavras-chave: Fluoreto; Águas Subterrâneas; Geoprocessamento.

Introdução

Os poços tubulares possuem papel fundamental no abastecimento público, permitindo o acesso às águas subterrâneas. No entanto, essas águas podem conter substâncias indesejáveis, como ferro, manganês, arsênio e fluoreto, que podem comprometer a qualidade da água para consumo humano (Shaji et al., 2024; Solanki et al., 2022). O íon fluoreto (F^-), quando presente em concentrações adequadas (até 1,5 mg/L), é considerado um micronutriente importante, contribuindo para a saúde bucal e prevenção de cáries. Contudo, em concentrações elevadas, pode causar problemas como fluorose dentária e óssea (Kabir et al., 2020). No Brasil, a legislação estabelece limites para esse íon, sendo que no estado do Rio Grande do Sul o valor máximo permitido é ainda mais restritivo, fixado em 0,9 mg/L (Solanki et al., 2022).

A presença de íons F^- na água pode ter origem natural, relacionada ao intemperismo de rochas, ou antrópica, especialmente associada ao uso de fertilizantes na agricultura. Considerando que o Rio Grande do Sul possui forte atividade agropecuária, torna-se relevante o monitoramento desse contaminante(Ali et al., 2016). O uso de ferramentas de geoprocessamento desponta como uma alternativa promissora para a realização desse tipo de análise de fragilidade, pois permite integrar, em ambiente único, diferentes camadas de informação espacial, como solo, relevo, uso e cobertura da terra, rede de drenagem e variáveis climáticas, favorecendo uma leitura mais detalhada dos padrões de vulnerabilidade do território (Aravinthasamy et al., 2020; Burrough, 2001)).

Ao possibilitar o cruzamento de mapas temáticos e a aplicação de técnicas de álgebra de mapas, interpolação geoestatística e modelagem multicritério, o geoprocessamento viabiliza a identificação de áreas com distintos graus de fragilidade ambiental, desde zonas muito frágeis, que exigem maior restrição de uso, até áreas menos sensíveis, mais adequadas a determinadas formas de ocupação (Burrough, 2001). Dessa forma, tais ferramentas não apenas qualificam o diagnóstico ambiental, como também oferecem subsídios técnicos essenciais ao planejamento territorial, ao zoneamento ecológico-econômico e à definição de políticas públicas voltadas à conservação dos recursos naturais e à mitigação de impactos decorrentes de usos inadequados do solo (Burrough, 2001; França et al., 2022).

Nesse contexto, a análise do zoneamento da fragilidade ambiental surge como uma ferramenta importante para compreender a vulnerabilidade do meio à contaminação F^-. Assim, este estudo tem como objetivo mapear as áreas mais suscetíveis à presença de F^- no município de Santa Maria/RS, integrando diferentes variáveis ambientais e dados de qualidade da água.

Material e Métodos

Inicialmente, foi realizado um processo de coleta e tratamento de dados onde, os dados de concentração de F^- foram obtidos através do Sistema de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (VIGIAGUA), compreendendo o monitoramento realizado entre os anos de 2014 e 2022. As amostras foram analisadas e filtradas, considerando aquelas que apresentaram não conformidade com a legislação estadual vigente, permitindo a identificação das áreas com maior ocorrência do íon no município. Após esse processo, foi gerado um gráfico indicando a localização dos pontos de coleta de análise a partir das coordenadas geográficas presentes no portal VIGIAGUA.

Com auxílio do *software* QGIS, posteriormente, foi realizada a modelagem da fragilidade ambiental com o objetivo de produzir um mapa geral de fragilidade ambiental com íons F^-. Para a elaboração do mapa, foram integrados quatro Planos de Informação (PIs), selecionados com base em sua influência potencial na contaminação das águas subterrâneas. Os dados foram organizados e ponderados conforme sua relevância, sendo atribuídos pesos diferenciados para cada variável, conforme apresentado no Quadro 01.

Plano de Informação (PI)	Peso	Fonte de Dados	Ano	Descrição / Critério de Análise
Litologia	4	CPRM	2023	Identificação das formações geológicas com potencial de liberação de F^-.
Uso e Ocupação do Solo	3	MapBiomas	2023	Análise da impermeabilização do solo e áreas de recarga hídrica.
Densidade Populacional	2	Censo IBGE	2022	Avaliação da concentração populacional e pressão de demanda hídrica.
Hidrologia	1	SEMA	2023	Mapeamento da rede de drenagem superficial.

Quadro 01: Planos de Informação e pesos utilizados na análise da contaminação subterrânea.
Fonte: Autores (2026)

Cada plano de informação foi classificado em níveis de fragilidade variando de 1 (muito baixa) a 5 (muito alta), conforme metodologia adaptada de Ross (1994). Posteriormente, os dados vetoriais foram convertidos para formato raster e integrados por meio da álgebra de mapas.

A fragilidade ambiental (FA) foi calculada a partir da equação (1).

$$FA = 0{,}4 * FR + 0{,}3 * UO + 0{,}2 * DP + 0{,}1 * H \quad (1)$$

Conforme apresentado na Figura 01, que ilustra a planta de localização da área de estudo, observa-se a delimitação do municipio de Santa Maria, inserido no contexto do estado do Rio Grande do Sul, região sul do Brasil. O mapa evidencia a posição geográfica da área em diferentes escalas, permitindo a compreensão de sua inserção regional e nacional.

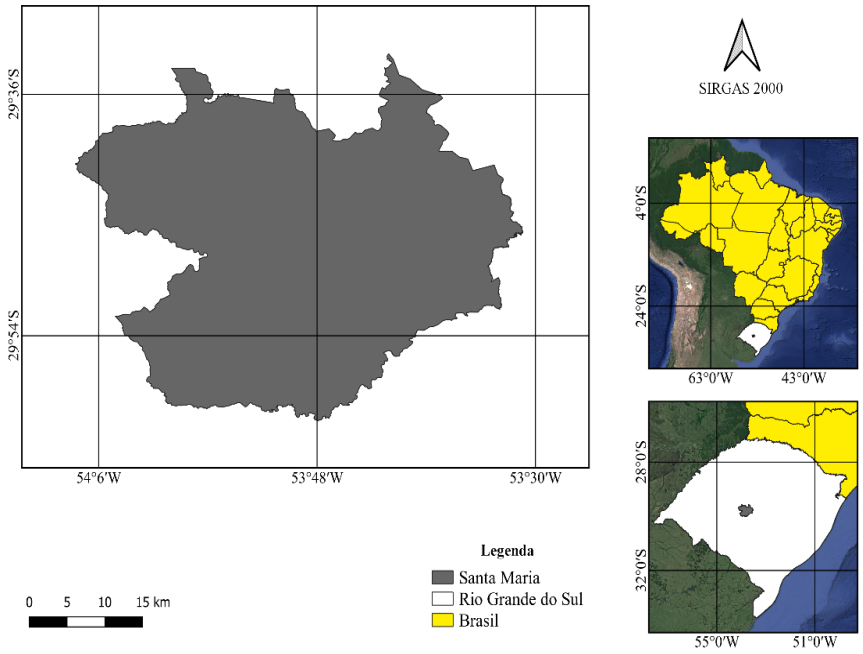


Figura 01: Planta de localização da área de estudo.
Fonte: Autores (2026)

Resultados e Discussão

Conforme apresentado na Figura 02, que ilustra a distribuição espacial dos pontos com coordenadas na área de estudo, a análise dos dados permitiu identificar as regiões mais afetadas pela presença de F^- acima do limite permitido no município de Santa Maria/RS. Os pontos, classificados nas categorias acima, no limite e abaixo, evidenciam padrões de concentração e possíveis variações espaciais, contribuindo para a compreensão da distribuição do contaminante na área de estudo.

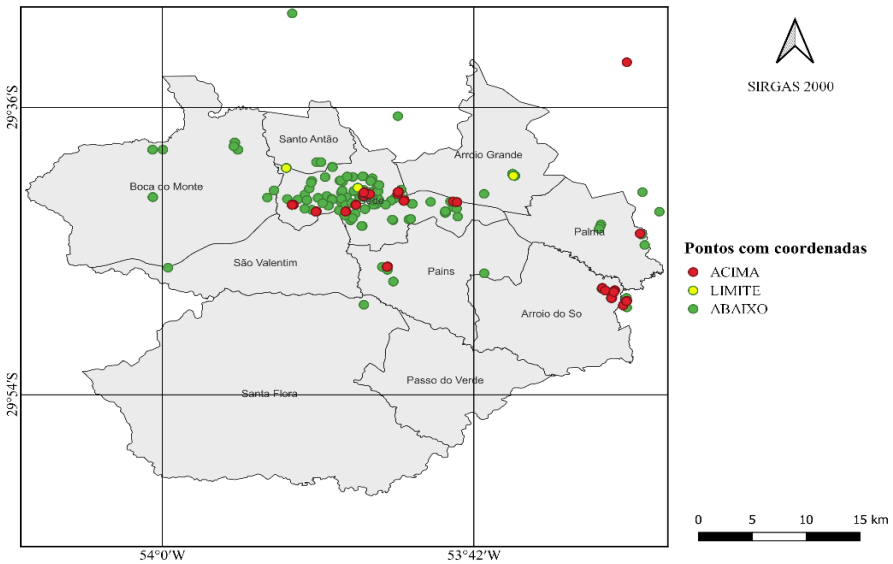


Figura 02: Distribuição espacial dos pontos amostrados no município de Santa Maria (RS).
Fonte: Autores (2026)

A análise da distribuição dos pontos amostrados no município de Santa Maria revela um padrão espacial bem definido da presença de F^-, com determinadas áreas concentrando valores acima do limite permitido. Ao considerar o conjunto total de pontos de coleta, e não apenas aqueles com coordenadas geográficas, como apresentado na Figura 02, observa-se que as regiões com maior proporção de amostras em desacordo com a legislação estadual são: Palma, destacando-se como a área mais crítica, com 42% das amostras reprovadas; seguida por Bonfim (15%), Bilibio (11%), Arroio do Só (7%) e KM 3 (6%).

Mais do que apenas indicar onde estão os maiores valores, esses resultados sugerem uma relação direta com fatores ambientais e antrópicos. Regiões com maior incidência de amostras acima do limite coincidem com áreas de uso agrícola mais intenso, especialmente aquelas associadas ao cultivo de arroz irrigado, atividade predominante em partes do município. Esse tipo de cultivo pode favorecer a infiltração de compostos contendo F^- no solo, seja pelo uso de insumos agrícolas, seja pela dinâmica hídrica característica das lavouras alagadas, contribuindo para sua incorporação às águas subterrâneas. Além disso, a influência da litologia local pode intensificar a liberação natural do íon, agravando o problema em determinadas áreas.

Por outro lado, regiões com predominância de valores dentro ou abaixo do limite indicam condições menos favoráveis à contaminação, possivelmente associadas à maior urbanização ou a características ambientais que dificultam a mobilização do F^-. Dessa forma, os resultados destacam a importância da análise espacial integrada para a identificação de áreas prioritárias para monitoramento e gestão da qualidade da água.

Nesse contexto, a Figura 03 apresenta o mapa de fragilidade ambiental do município de Santa Maria/RS, permitindo visualizar que as áreas com maior incidência de F^-, como o distrito de Palma, coincidem com setores de fragilidade natural elevada. A espacialização desses dados confirma que a vulnerabilidade do meio físico, somada às pressões antrópicas discutidas, define as zonas prioritárias para intervenção e monitoramento constante dos recursos hídricos locais.

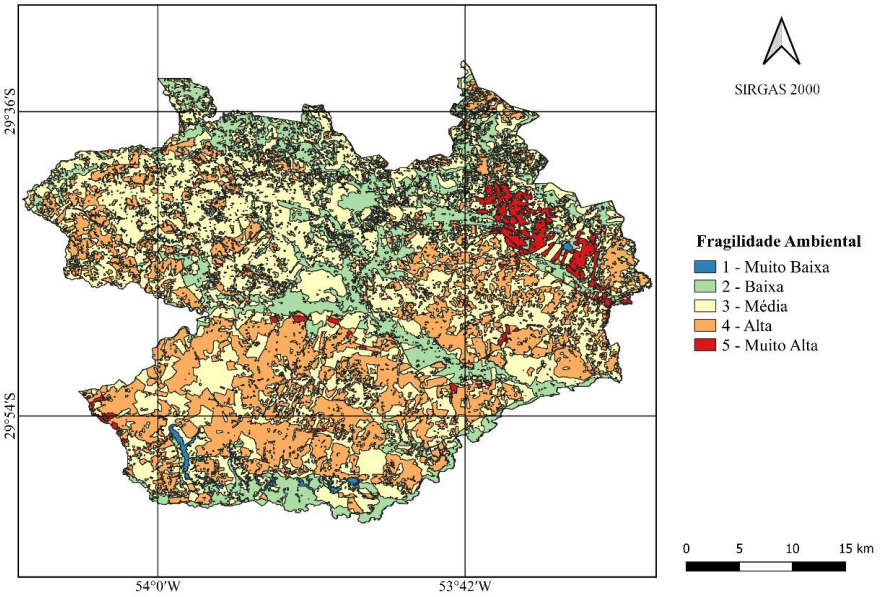


Figura 03: Fragilidade Ambiental no município de Santa Maria/RS.
Fonte: Autores (2026)

Considerações Finais

O estudo demonstrou que a distribuição de F^- no município de Santa Maria apresenta um padrão espacial heterogêneo, com pontos críticos de não conformidade em relação à legislação estadual. A integração de dados ambientais via geoprocessamento permitiu identificar que regiões como o distrito de Palma apresentam alta vulnerabilidade, onde a fragilidade natural do meio físico converge com o uso agrícola intensivo.

Conclui-se que o uso de ferramentas de análise multivariada e álgebra de mapas é essencial para o diagnóstico da qualidade das águas subterrâneas, pois viabiliza a identificação de zonas prioritárias. Esses resultados oferecem subsídios técnicos fundamentais para o planejamento territorial e a definição de políticas públicas voltadas ao monitoramento constante e à mitigação de riscos à saúde pública decorrentes da contaminação por fluoreto na região.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PROBIC) e da Universidade Federal de Santa Maria, onde todos os colaboradores não mediram esforços para a conclusão do mesmo.

Referências Bibliográficas

AHMAD DAR, F.; KURELLA, S. Fluoride in drinking water: An in-depth analysis of its prevalence, health effects, advances in detection and treatment. **Materials Today: Proceedings,** Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/inspecao_sanitaria_abastecimento_agua.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2026.

BRASIL. **Portaria MS/GM n° 635**, de 26 de dezembro de 1975. Acesso em: 17 mar. 2026.

BRASIL. **Inspeção sanitária em abastecimento de água**. 2006. Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/inspecao_sanitaria_abastecimento_agua.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2026.

BURROUGH, P. (2001). GIS and geostatistics: Essential partners for spatial analysis**.** ***Environmental and Ecological Statistics****, 8*, 361-377. Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/inspecao_sanitaria_abastecimento_agua.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2026.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Geologia do Estado do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <https://geosgb.sgb.gov.br/geosgb/downloads.html> . Acesso em: 18 mar. 2026.

DEE. Departamento de Economia e Estatística**. RS em números 2022**. Disponível em: <https://dee.rs.gov.br/rsnumeros> . Acesso em: 15 mar. 2026.

FRANÇA, L., Lopes, L., Morais, M., Lisboa, G., Rocha, S., De Morais Júnior, V., Santana, R., & Mucida, D. (2022). **Environmental Fragility Zoning Using GIS and AHP Modeling: Perspectives for the Conservation of Natural Ecosystems in Brazil.** ***Conservation*****.** Disponível em:< https://www.mdpi.com/2673-7159/2/2/24> . Acesso em: 01 mai. 2026.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2022**. Disponível em:< https://censo2022.ibge.gov.br/> . Acesso em: 15 mar. 2026.

MAPBIOMAS. **Coleções MapBiomas Brasil**. Disponível em:< https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/> . Acesso em: 15 mar. 2026.

MORELATO, R. et al. Estudos de fragilidade ambiental quanto às áreas mais vulneráveis a serem afetadas por contaminação de íons fluoreto no município de São João do Polêsine**. Jornada de jóvenes investigadores**, p. 510, 2023.

RIO GRANDE DO SUL. **Portaria n° 10,** de 16 de agosto de 1999. Define teores de concentração do íon fluoreto nas águas para consumo humano fornecidas por Sistemas Públicos de Abastecimento. Porto Alegre, 1999. Acesso em: 17 mar. 2026.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. **Geography Department, University of Sao Paulo**, p. 63–74, 1994.

SEMA. Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. **Bacias Hidrográficas.** Disponível em: < https://sema.rs.gov.br/bacias-hidrograficas>. Acesso em: 17 mar. 2026.

SOLANKI, Y. S. et al. Fluoride occurrences, health problems, detection, and remediation methods for drinking water: A comprehensive review. **Science of the Total Environment.** (Vol. 807). 2022. Elsevier B.V.

TAGAWA, P. T.; MORUZZI, D. L.; CURY, J. A. Concentração de fluoreto na vegetação próxima do pólo de fertilizantes de Cubatão, São Paulo, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva,** v. 14, n. 6, p. 2205–2208, dez. 2009.

OMS. Organização Mundial da Saúde. **Guidelines for Drinking-water Quality**. Quarta ed. Genebra. 2017. Disponível em:< https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>. Acesso em: 15 mar. 2026.

FOTOCATÁLISE E FOTÓLISE APLICADAS À REMOÇÃO DO DIURON E PARACETAMOL

1 Eduarda Gameleira Bernardino, 2 Maria Eliana Camargo Ferreira, 3 Pâmela Herrera Dutra, 4 Rosângela Bergamasco, 5 Romel Dias Vanderlei, 6Natália Ueda Yamaguchi, 7 Karina Querne de Carvalho

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: eduardagbernardino@gmail.com; 2; 3; 4; 5; 6 Universidade Estadual de Maringá, e-mail: camargo_ferreira@hotmail.com; pamela-hd@hotmail.com; rbergamasco@uem.br; rdvanderlei@uem.br; nuyamaguchi@uem.br; 7 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: kaquerne@professores.utfpr.edu.br

Palavras-chave: Processos oxidativos avançados; Sustentabilidade; Tratamento de água.

Introdução

A disponibilidade de água potável e segura é essencial para o bem-estar humano. Porém, no mundo atual, ainda há pessoas sem acesso ao tratamento de água e esgoto adequados, especialmente em áreas ruais e localidades em desenvolvimento, o que torna um desafio à purificação generalizada da água (LOEB; 2016).

Frequentemente, poluentes orgânicos são constatados em cursos d`água devido à complexidade da estrutura química e a necessidade de processos mais eficazes de tratamento para a remoção completa. Consequentemente, estudos atuais concentram-se na implementação de tecnologias pontuais para tratar esses contaminantes persistentes, como o paracetamol e diuron.

O paracetamol pertence à categoria de analgésicos mais utilizados no mundo. Ao ser consumido, é excretado pelo organismo humano e se aglomera na microbiota aquática, fazendo parte dos contaminantes emergentes, além de apresentar estabilidade à irradiação ultravioleta. Paralelo ao exposto, a presença de agrotóxicos, como o diuron, em águas superficiais e subterrâneas torna-se um problema ambiental devido aos efeitos tóxicos decorrentes da exposição ao contaminante, relacionados a distúrbios e alterações hormonais, problemas reprodutivos e potencial carcinogenicidade (Quintero-Castañeda; 2024).

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) compõem diferentes processos (químicos, físicos, fotoquímicos, fotocatalíticos e eletroquímicos) que têm em comum a capacidade de geração de oxidantes sob condições ambientais em quantidade suficiente para a purificação da água e oxidação do contaminante. Nestes processos ocorre a formação do radical hidroxila (•OH) que possui um alto potencial na redução da toxicidade e mineralização de contaminantes orgânicos sem a formação de sobprodutos (TITCHOU *et al.*, 2021).

A fim de auxiliar no tratatamento de água e fotocatálise, a ferrita de manganês ($MnFe_2O_4$) possibilita a ativação do catalisador, elevando a área superficial e a capacidade de interação dipolo-dipolo. Apesar dos benefícios, suas propriedades podem afetar em separação e recuperação em ciclos consecutivos devido a agregação e sedimentação (WANG *et al.*, 2017).

O óxido de grafeno (OG) é um material promissor para previnir a aglomeração da $MnFe_2O_4$, reduzindo a taxa de recombinação dos portadores de cargas (elétrons-lacunas) e melhorando as propriedades e capacidade de adsorção do semicondutor por meio da da sua condutividade e capacidade de suspensão das partículas (WANG *et al.*, 2017; YANG *et al.*, 2015).

A hidroxiapatita (HAp) é um mineral composto de fosfato de cálcio biocompatível encontrado em dentes, ossos, fontes minerais e calcificações patológicas. O osso bovino é proveniente da indústria pecuária e tem aplicabilidade na produção do carvão ativado, apresentando vantagens econômicas quando comparados a outros adsorventes, e se destacando, principalmente, devido a sua matriz mineral de HAp. Atualmente, o carvão ativado de osso bovino tem sido utilizado como material suporte para fotocatalisadores aplicados ao tratamento de agua (BERNARDINO *et al.*, 2024; NIGRI *et al.*, 2017).

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do fotocatalisador CP5 para remoção de diuron e paracetamol e comparar seu efeito de degradação com o potencial na fotólise solar.

Material e Métodos

A pesquisa foi desenvolvida em duas etapas, sendo a síntese do fotocatalisador (CP5) e seguida da avaliação da sua eficiência no tratamento da água artificialmente contaminada com diuron e paracetamol.

Síntese do catalisador

O carvão pulverizado (CP) de osso bovino utilizado como suporte do catalisador é proveniente de uma empresa localizada na cidade de Maringá-PR. Para a síntese foram dissolvidos em solução de etileno glicol, 1 g de grafeno previamente sintetizado pelo método Hummers modificado (HUMMERS, W. S.; OFFEMAN, R. E.; 1958), 1 g de cloreto de ferro e 0,376 g de cloreto de manganês. A mistura foi submetida à ultrassonicação e adicionados 3 g de acetato de sódio, 15 g de CP e 30 mL de etileno glicol e submetidos à ultrassonicação novamente. Posteriormente, essa mistura foi inserida na autoclave a 200 ºC durante 10 horas. Após o resfriamento, o material foi lavado em etanol e água deionizada e seco em estufa a 60ºC por 12 h. Originou-se, então, o fotocatalisador magnético de grafeno e ferrita de manganês suportado em carvão ativado de osso bovino (CP5) (HUMMERS, W. S.; OFFEMAN; E., 1957; UEDA YAMAGUCHI; BERGAMASCO; HAMOUDI, 2016).

Eficiência de remoção

As concentrações de diuron e paracetamol foram determinadas aferindo-se a absorbância no comprimento de onda característico de 210 nm e 242 nm, respectivamente, na região visível no espectrofotômetro (HACH-D6000). A fim de quantificar as concentrações remanescentes dos contaminantes utilizados, as amostras foram filtradas em filtro seringa Millipore (0,45 µm) para evitar que as partículas de fotocatalisador que permanecem suspensas interferissem nos resultados. As absorbâncias foram lidas aos 0; 60; 120; 180 e 240 min, analisando as eficiências da fotólise solar e ao adicionar o CP5 como fotocatalisador em 200 mg/L). As concentrações de contaminantes nas amostras poluídas artificialmente de diuron e paracetamol foram de 10 mg/L e 30 mg/L, respectivamente.

A remoção dos contaminantes (%) foi calculada pela Equação 01:

$$Eficiência\ de\ degradação\ (\%) = \frac{(C0-Ct)}{C0} . 100 \qquad (01)$$

Onde: C0 é a concentração inicial do contaminante e Ct é a concentração do contaminante em relação ao tempo, após adsorção e exposição solar.

O experimento foi realizado no período das 10:00 às 14:00, sendo que nos primeiros 60 minutos as amostras foram mantidas no escuro a fim de obter-se o equilíbrio de adsorção das amostras com o fotocatalisador (BERNARDINO *et al.,* 2024). Após esse período, as amostras foram submetidas a irradiação natural e intensidade da luz solar foi medida com o auxílio de um luxímetro digital Instrutemp, modelo ITLD260 ($60\times10^3 \pm 1000$ lux). As análise das amostras foram realizadas em duplicata.

Resultados e Discussão

Na Figura 01 é apresentada a variação da eficiência de remoção do diuron e do paracetamol ao longo do tempo de fotocatálise e fotólise solar.

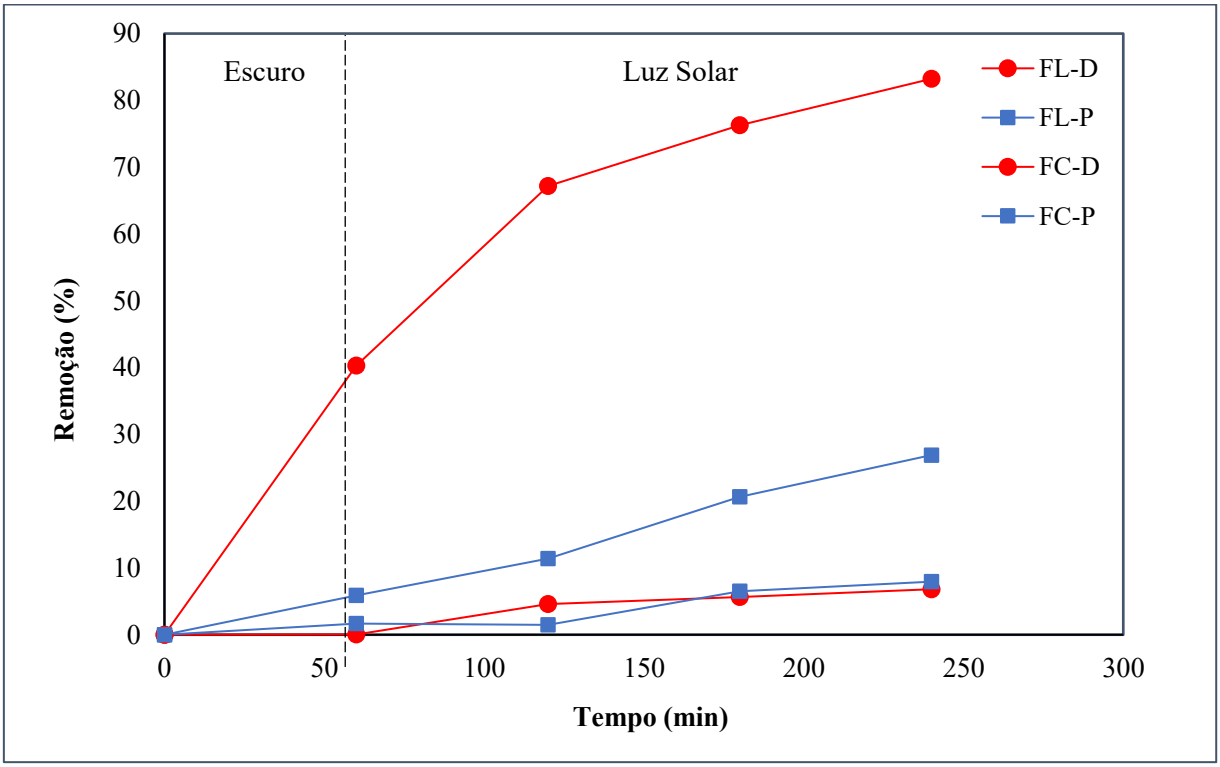


Figura 01: Eficiência de remoção do diuron e paracetamol com catalisador e fotólise solar. Fotólise com Diuron (FL-D); Fotólise com Paracetamol (FL-P); Fotocatálise do CP com Diuron (FC-D); Fotocatálise do CP com Paracetamol (FC-P). Intensidade de irradiação solar: 100–170 W/m2. Fonte: Autores (2026)

A remoção de diuron resultou em 6,8% após a fotólise solar, o que reforça sua boa fotoestabilidade sob irradiação natural. Em contrapartida, a análise com CP5 apresentou eficiência de remoção de 83,23%, indicando que o processo é predominantemente direcionado por adsorção. De acordo com a literatura, a porcentagem carbonosa presente na amostra de CP5 favorece interações hidrofóbicas e do tipo π-π com a molécula do diuron de acordo com características de compostos aromáticos em materiais carbonosos.

Embora a hidroxiapatita presente no CP5 apresente atividade fotocatalítica limitada sob luz natural devido ao seu alto band gap (~ 5,5 – 6,0 eV), não se pode descartar a contribuição indireta do material em reações fotoinduzidas superficialmente (TSUKADA, M.; WAKAMURA, M.; YOSHIDA, N.; WATANABE, T.; 2011; Wang *et al.,* 2020).

Para o paracetamol, as eficiências de remoção foram de 3,8% para fotólise e 26,9% e com o nanocompósito magnético CP5, respectivamente. Segundo Oliveira *et al.,* (2024), os dados da fotólise confirmam a elevada estabilidade fotoquímica do analgésico sob irradiação solar. Isto ocorre pela adsorção de fótons, que depende da própria molécula do contaminante e é limitada na região do visível, o que reduz de significativamente a degradação do composto na ausência do catalisador. Por outro lado, a presença no CP5 na solução acarretou o aumento da remoção para 26,9%, ressaltando a atuação de processos oxidativos avançados intermediados por espécies reativas.

A remoção moderada do paracetamol pode ser atribuída à estrutura química do contaminante com alta recalcitrância, à intensidade da radiação e variação climática durante o experimento, à ausência de agente oxidante (como H_2O_2) e à limitação na transferência de massa/adsorção (FERREIRA *et al.,* 2022).

Analisando os materiais utilizados e sua aplicabilidade em diferentes tipos de contaminantes orgânicos, atribui-se a ferrita de manganês a atuação como semicondutor, auxiliando na absorção na região visível e na geração de pares elétron/lacuna sob luz solar. O óxido de grafeno reduzido (OGr) auxilia a aceitação e transporte de elétrons na reação, reduzindo a recombinação eletron-lacuna e aumentando a eficiência fotocatalítica.

O carvão ativado, funciona como suporte a alta área superficial auxiliando principalmente na fase adsorvente e estabilizando as nanopartículas. Pesquisas recentes demonstram que a presença de hidroxiapatita e carbono favorecem a pré-concentração do poluente na superfície ampliando a probabilidade de reação com radicais (Miyah *et al.,* 2024; JURGELANE, I.; LOCS, J.; 2023).

Algethami *et al.,* (2022) demonstraram que a incorporação de ferritas em suportes com hidroxiapatita aumentam consideravelmente a atividade fotocatalítica quando comparados a materiais isolados, devido a associação da adsorção com a geração de radicais.

Considerações Finais

Esse estudo avaliou a aplicabilidade do CP5 como fotocatalisador na degradação de diuron e paracetamol, comparando seu desempenho com e sem fotocatalisador. Analisando os dados obtidos, ressalta-se as principais observações:

- Em ambas as análises as amostras foram submetidas à irradiação solar natural após 60 minutos auxiliando a estabilização característica no catalisador utilizado;
- O emprego do carvão ativado como material suporte à ferrita de manganês e óxido de grafeno reduzido, auxilia na reutilização de materiais residuais, incorporando a sustentabilidade e desenvolvimento de materiais com alto potencial para o tratamento de água;
- A estrutura química dos contaminantes utilizados possuem alta estabilidade e maior resistência a degradação, porém, mesmo com essa limitação foi possível a obtenção de boa eficiência de remoção de diuron;
- Sugere-se para trabalhos futuros, a avaliação de massa do catalisador a fim de explorar de forma mais aprofundada o potencial de degradação bem como a saturação do material nas amostras, além da síntese e desenvolvimento de novas heteroestruturas incorporadas ao carvão ativado;
- A otimização dos parâmetros (pH, temperatura, oxidante, concentração de adsorvente e contaminante) também podem auxiliar no resultado da degradação. Sugere-se ainda a análise da presença das espécies reativas na solução, a fim de comprovar o mecanismo de ativação do nanocompósito magnético utilizado.

Agradecimentos

Os autores agradecem e reconhecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) (código de financiamento 001) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências Bibliográficas

ALGETHAMI, J. S.; HASSAN, M. S.; ALORABI, A. Q.; ALHEMIARY, N. A.; FALLATAH, A. M.; ALNAAM, Y.; ALMUSABI, S.; AMNA, T. Manganese ferrite-hydroxyapatite nanocomposite synthesis: biogenic waste remodeling for water decontamination. *Nanomaterials*, [S.l.], v. 12, n. 10, p. 1631, 2022. DOI: 10.3390/nano12101631.

BERNARDINO, E. G.; FERREIRA, M. E. C.; BERGAMASCO, R.; YAMAGUCHI, N. U. Photocatalyst of manganese ferrite and reduced graphene oxide supported on activated carbon from cow bone for wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research International*, [S.l.], v. 31, n. 3, p. 4779–4796, 2024. DOI: 10.1007/s11356-023-31501-9.

DUFNER, Lukas; ARESTÉ-SALÓ, Lluc; GRAELLS, Moisès; PÉREZ-MOYA, Montserrat; KERN, Frank; RHEINHEIMER, Wolfgang. Photocatalytic degradation of paracetamol on immobilized TiO_2 in a low-tech reactor by solar light for water treatment. *Open Ceramics*, [S.l.], v. 18, p. 100599, 2024.

HUMMERS, W. S.; OFFEMAN, R. E. Preparation of graphitic oxide. *Journal of the American Chemical Society*, [s. l.], v. 80, n. 6, p. 1339, 1958.

JURGELANE, I.; LOCS, J. Activated carbon and clay pellets coated with hydroxyapatite for heavy metal removal. Materials, v. 16, p. 3605, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/ma16093605

LOEB, Stephanie; HOFMANN, Ron; KIM, Jae-Hong. Beyond the pipeline: assessing the efficiency limits of advanced technologies for solar water disinfection. *Environmental Science & Technology Letters*, [S.l.], v. 3, n. 2, p. 73–80, 2016. DOI: 10.1021/acs.estlett.6b00023.

FERREIRA, Maria Eliana Camargo *et al.* Synergistic mechanism of photocatalysis and photo-Fenton by manganese ferrite and graphene nanocomposite supported on wood ash with real sunlight irradiation. *Catalysts*, [S.l.], v. 12, n. 7, p. 745, 2022.

QUINTERO-CASTAÑEDA, Cristian Yoel; TENDERO, Claire; TRIQUET, Thibaut; MORENO-TORRES, Oscar H.; SIERRA-CARRILLO, María Margarita; ANDRIANTSIFERANA, Caroline. A review of wastewater pollution by diuron: from its origin to treatments for safe reuse. *Water*, [S.l.], v. 16, p. 3524, 2024. DOI: 10.3390/w16233524.

MIYAH, Youssef; EL MESSAOUDI, Noureddine; BENJELLOUN, Mohammed; ACIKBAS, Yaser; ŞENOL, Zeynep Mine; CIĞEROĞLU, Zeynep; LOPEZ-MALDONADO, Eduardo Alberto. Advanced applications of hydroxyapatite nanocomposite materials for heavy metals and organic pollutants removal by adsorption and photocatalytic degradation: a review. *Chemosphere*, v. 358, p. 142236, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142236

NIGRI, Elbert M. *et al.* Cow bones char as a green sorbent for fluorides removal from aqueous solutions: batch and fixed-bed studies. Environmental Science and Pollution Research, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 2364–2380, 2017.

OLIVEIRA, Jessica R. P.; ABREU, Eduardo; FUZIKI, Maria E. K.; DE PAULA, Elaine T.; FIDELIS, Michel Z.; BRACKMANN, Rodrigo; TUSSET, Angelo M.; ALVES, Odivaldo C.; LENZI, Giane G. Application of magnetic separation in catalyst reuse applied in paracetamol degradation. *Magnetism*, [S.l.], v. 4, n. 3, p. 240–251, 2024. DOI: 10.3390/magnetism4030016.

TSUKADA, M.; WAKAMURA, M.; YOSHIDA, N.; WATANABE, T. Band gap and photocatalytic properties of Ti-substituted hydroxyapatite: comparison with anatase-TiO_2. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, v. 338, p. 18–23, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.molcata.2011.01.017

TITCHOU, Fatima Ezzahra *et al.* Removal of organic pollutants from wastewater by advanced oxidation processes and its combination with membrane processes. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, [s. l.], v. 169, p. 108631, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108631

UEDA YAMAGUCHI, Natália; BERGAMASCO, Rosângela; HAMOUDI, Safia. Magnetic $MnFe_2O_4$-graphene hybrid composite for efficient removal of glyphosate from water. *Chemical Engineering Journal*, [s. l.], v. 295, p. 391–402, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.051. Acesso em: 29 abr. 2026.

WANG, Guangshuo *et al.* Development of manganese ferrite/graphene oxide nanocomposites for magnetorheological fluid with enhanced sedimentation stability. Journal of Industrial and Engineering Chemistry**,** [s. l.], v. 48, p. 142–150, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2016.12.032. Acesso em: 29 abr. 2026.

YANG, Zhongmei *et al.* Solid-state, low-cost, and green synthesis and robust photochemical hydrogen evolution performance of ternary TiO_2/$MgTiO_3$/C photocatalysts. **iScience**, [s. l.], v. 14, p. 15–26, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.isci.2019.03.009. Acesso em: 29 abr. 2026.

ZEÓLITAS MODIFICADAS COM POLIPIRROL AUMENTAM EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE BÁRIO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO PÚBLICO

1 Beatriz de Castro, 2 Deusmaque Carneiro Ferreira, 3 Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves
1 Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), e-mail: beatriz1703castro@gmail.com; 2 Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), e-mail: deusmaque.ferreira@uftm.edu.br; 3 Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), e-mail: julio.goncalves@uftm.edu.br

Palavras-chave: Adsorção; Filtração; Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Introdução

É amplamente conhecido que os metais existem no ambiente aquático e sua remoção é de extrema importância para proteger a vida dos organismos e a saúde pública, antes que sejam descarregados nos corpos d'água (Bhandari; Garg; Gaba, 2021). Entre os metais, o bário destaca-se por sua ocorrência natural em águas, principalmente em decorrência de processos de intemperismo e erosão de minerais como a barita, mas também pode ser introduzido no ambiente por atividades antrópicas, como o uso de defensivos agrícolas e da geração de resíduos oriundos da produção de vidros e fogos de artifício (Cetesb, 2007).

No Brasil, a qualidade da água destinada ao consumo humano é regulamentada pela Portaria GM/MS nº 888 de 2021, que estabelece padrões de potabilidade e define os valores máximos permitidos (VMP) para substâncias químicas orgânicas e inorgânicas que representam risco à saúde humana (Brasil, 2021). Contudo, casos reais evidenciam que nem sempre esses limites são atendidos. Em Uberaba (MG), laudos técnicos realizados entre 2018 e 2022 identificaram concentrações de bário acima do VMP em uma comunidade rural do município. Essa ocorrência está associada ao contexto geológico do local, uma vez que a área se insere na Formação Marília, do Grupo Bauru, cuja evolução diagenética inclui fases de cimentação por barita, favorecendo a elevação natural dos teores de bário na água dessa região (Batezelli, 2003; Choquette; Pray, 1970). A ingestão de bário, mesmo que em concentrações traço e por curtos períodos, pode causar efeitos diversos à saúde, como vômito, cólica estomacal, diarreia, dificuldade respiratória, alteração da pressão sanguínea, adormecimento da face e debilidade muscular (Who, 2016).

O tratamento de águas contendo metais envolve diferentes processos físicos e químicos, como precipitação química, adsorção, troca iônica e filtração por membranas. No entanto, a aplicação da maioria desses processos requer custos elevados ou também produz resíduos de difícil tratamento e disposição, sendo a adsorção uma das alternativas mais utilizadas devido a sua simplicidade e viabilidade econômica (Mohan *et al.*, 2014; Naddafi *et al.*, 2022; Saravanan *et al.*, 2021).

Adsorventes minerais, como zeólita, sílica e argila têm sido amplamente estudados para tratamento de metais devido aos baixos custos operacionais e altas áreas de superfície específica (Qasem; Mohammed; Lawal, 2021). As zeólita são aluminossilicatos hidratados formados por estruturas cristalinas tridimensionais de tetraedros do tipo TO4 (onde T pode ser Si, Al, Ga, Ge, Fe, B, P, Ti, etc.) ligados entre si por átomos de oxigênio contidos nos vértices. Essas estruturas contêm cavidades abertas na forma de canais e gaiolas usualmente ocupados por moléculas de água e cátions metálicos (Coombs *et al.*, 1997; Rida *et al.*, 2013).

Adsorventes à base de polímeros, destacando-se os polímeros condutores como polianilina, polietilenoamina, polipirrol e seus compósitos, têm sido utilizados no método de adsorção devido ao seu potencial para adsorver diversos íons metálicos, facilidade de síntese, regeneração e operação, estabilidade ambiental e mecânica, além de baixo custo. Além disso, suas estruturas altamente porosas, com propriedades eletroquímicas de superfície específicas e capacidades de troca iônica, também têm atraído grande interesse dos pesquisadores (Mahmud; Huq; Yahya, 2016).

O polipirrol (PPy) é um polímero orgânico condutor e um dos polímeros conjugados mais estudados, devido a sua alta condutividade, estabilidade química e síntese relativamente simples (Valaski; Ayoub; Micaroni, 2001). O monômero de pirrol possui a fórmula química C_4H_4NH e é classificado como um composto heterocíclico de cinco membros. Seu estado líquido é volátil, incolor e instável na presença de ar (Tzankova *et al.*, 2018).

Diante das considerações mencionadas, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito da modificação com polipirrol no desempenho de dois tipos de zeólitas na remoção de bário. Adicionalmente, os materiais foram caracterizados quanto à forma e esfericidade e por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).

Material e Métodos

As zeólitas utilizadas no presente estudo foram zeólita Watercel ZN e Watercel ZZ. A zeólita Watercel ZN é natural, com granulometria variando de 0,4 a 1 mm, e geralmente utilizada como camada filtrante em filtros no tratamento de água para redução de turbidez, cor aparente e sólidos em suspensão. A zeólita Watercel ZZ é modificada, com granulometria variando de 0,4 a 1 mm, e usualmente utilizada no polimento de metais pesados, possuindo afinidade com os elementos cádmio, cobre, níquel, prata e zinco (Celta Brasil, 2025). A Figura 01 ilustra as zeólitas utilizadas.

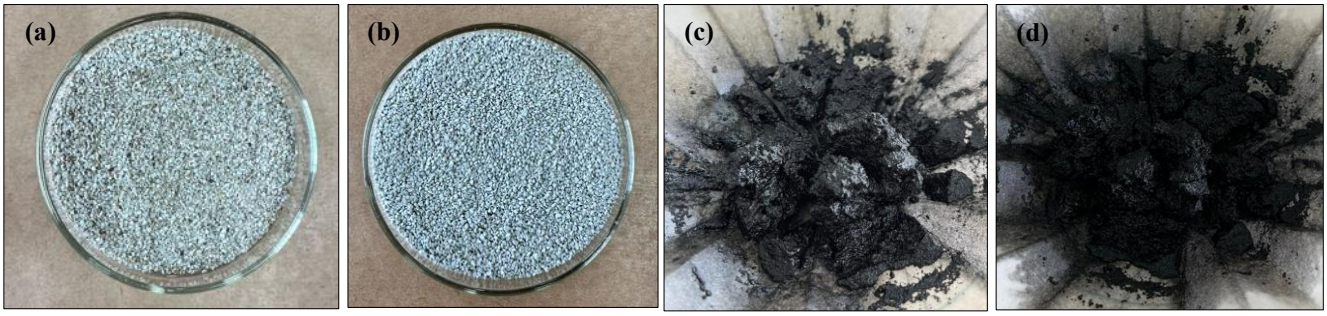


Figura 01: (a) Zeólita Watercel ZN; (b) Zeólita Watercel ZZ; (c) Zeólita Watercel ZN modificada com polipirrol e (d) (d) Zeólita Watercel ZZ modificada com polipirrol
Fonte: Elaboração própria (2026)

O polipirrol foi sintetizado por polimerização química, devido à facilidade de produção em larga escala, utilizando persulfato de amônio como agente oxidante no meio reacional. Foram realizadas três sínteses independentes para cada material.

Para simular uma amostra de água de abastecimento público contaminada com Ba^{2+}, foi preparada uma solução estoque monometálica (2 mg L^{-1}) a partir de cloreto de bário di-hidratado ($BaCl_2.2H_2O$). A filtração foi conduzida por gravidade, utilizando funil de vidro, papel de filtro quantitativo (Double ring quantitative filter paper, speed: slow) e proveta como coletor. A solução foi submetida a dez passagens sucessivas através de cada meio filtrante, definidas como ciclos de filtração.

Para a digestão das amostras, 10 mL do filtrado foram transferidos para tubos de digestão, seguidos da adição de 10 mL de uma mistura de ácido nítrico (65%) e ácido clorídrico na proporção 1:1. As amostras foram digeridas em bloco digestor a 170 °C, sob capela de exaustão, até redução do volume. Após a digestão, as amostras foram transferidas para balões volumétricos de 50 mL e armazenadas em tubo Falcon.

A determinação de Ba^{2+} foi realizada por espectrometria de emissão atômica (MP-AES 4200, Agilent), possibilitando a quantificação das concentrações inicial e final do metal. A eficiência de remoção foi calculada a partir da diferença entre essas concentrações para cada meio filtrante (zeólita ZN, zeólita ZN + polímero, zeólita ZZ e zeólita ZZ + polímero).

A caracterização da forma e da esfericidade foi realizada mediante o uso de estereomicroscópio com câmera acoplada (Bioptika), com aumento de 70 vezes. O coeficiente de esfericidade foi determinado por meio de escala de comparação visual, conforme proposto por Di Bernardo (2003, p. 36).

As zeólitas foram caracterizadas por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), utilizando espectrofotômetro ALPHA (Bruker) com acessório ATR de diamante (Platinum). As análises foram realizadas na faixa de 4000–600 cm^{-1}, com resolução de 4 cm^{-1}, visando à identificação dos principais grupos funcionais e à verificação de alterações espectrais decorrentes da adsorção de Ba^{2+}.

Resultados e Discussão

A zeólita ZN apresemtou eficiência média de remoção do íon bário de 91,21%, enquanto a eficiência da zeólita ZZ não pôde ser determinada devido a limitações na detecção do íon. Por se tratar de um material sinteticamente modificado, com composição não divulgada pelo fabricante, não foi possível identificar suas alterações estruturais. A ficha de segurança do material indica apenas o uso de cloreto de sódio (NaCl), levando a hipótese de interferência do sódio na análise, como instabilidade da chama e sobreposição espectral, dificultando a detecção do bário (Lacerda, 2016).

A zeólita ZN se destacou com alta eficiência de remoção de bário, indicando que esse material possui afinidade pelo íon em questão. Considerando a representação estrutural de uma zeólita, o íon alumínio é pequeno o suficiente para ocupar a posição central no tetraedro, sendo que a substituição isomórfica, de Si^{4+} por Al^{3+}, produz um desbalanceamento de carga na estrutura zeolítica, que apresentará carga negativa para cada novo átomo de alumínio. A carga negativa é compensada pela presença de cátions intersticiais trocáveis, em geral metais alcalinos e alcalinos terrosos, como Na^+, K^+, Ca^{2+} e Ba^{2+}, situados nas cavidades dos anéis de oxigênio (McCusker; Baerlocher, 2007). Devido a essa característica, as zéolitas apresentam alta afinidade para cátions de metais de transição, alcalinos e alcalinos terrosos, e baixa afinidade por ânions e moléculas orgânicas não polares. A relação Si/Al na estrutura do material define sua capacidade de troca catiônica, sendo que quanto menor for essa relação maior será a capacidade de troca da zeólita (Bruno, 2008).

Quando os materiais foram modificados com o polipirrol, as eficiências médias encontradas foram de 96,47% para zeólita ZN e 99,22% para zeólita ZZ. De modo geral, o revestimento polimérico aplicado às zeólitas resultou em eficiências de remoção do íon bário próximas aos valores máximos esperados para o processo. Esse desempenho pode estar relacionado à ocupação dos espaços vazios pelo polímero, favorecendo a maior participação do leito filtrante na filtração. Esse aspecto é muito importante para a duração das carreiras na filtração direta, uma vez que a retenção das impurezas ocorre nos vazios intergranulares do meio filtrante (Di Bernardo, 2003).

A estrutura do polipirrol é neutra no estado reduzido e positivamente carregada no estado oxidado, resultando na troca aniônica quando um potencial de oxidação ou redução é aplicado (Choi *et al.*, 2017; Du *et al.*, 2015). Como o íon Ba^{2+} possui carga positiva e o polipirrol (PPy) pode estar neutro ou positivamente carregado, a adsorção do bário parece improvável devido à repulsão eletrostática. No entanto, ainda assim verificou-se a interação entre Ba^{2+} e PPy, uma vez que, mesmo oxidado e com

carga positiva, o polipirrol pode estar associado a contra íons presentes no meio. Esses ânions podem atuar como ponte iônica, permitindo a adsorção de Ba^{2+} através de interações eletrostáticas indiretas (Tian *et al.*, 2021).

Em relação à caracterização quanto a forma, as zeólitas apresentaram grãos de tamanhos variados e estrutura porosa e rugosa. Além disso, a deposição do polipirrol alterou significativamente a estrutura dos materiais, impactando suas propriedades físicas. Foi possível observar que as zeólitas revestidas com o polímero apresentaram coloração escura, característica do polipirrol.

Os coeficientes de esfericidade determinados foram: 0,68 ± 0,08 para zeólita ZN, 0,79 ± 0,10 para zeólita ZZ, 0,82 ± 0,11 para zeólita ZN + polímero e 0,79 ± 0,10 para zeólita ZZ + polímero. Dessa forma, a zeólita ZN apresentou o menor coeficiente de esfericidade. Segundo Di Bernardo (2003), quanto menor o coeficiente de esfericidade dos grãos, maior a porosidade em meio filtrante fixo. De maneira geral, os coeficientes aumentaram com o uso do polímero, sugerindo que o recobrimento pode ter suavizado a forma das partículas, aproximando-as mais do formato esférico.

Com relação a caracterização dos materiais por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), foi possível observar que, após a modificação das zeólitas com o polímero, houve deslocamentos nas bandas associadas às vibrações de estiramento das ligações O–H, Si–O–Si e Si–O, sugerindo a formação de novas interações químicas ou reorganização superficial. Com a introdução do Ba^{2+}, essas bandas apresentaram novos deslocamentos, indicando que o íon bário interagiu com os sítios ativos do material, alterando sua estrutura vibracional e evidenciando o processo de adsorção.

De maneira geral, os resultados de FTIR indicam que a adsorção de Ba^{2+} gerou mudanças estruturais nos materiais, afetando tanto a matriz inorgânica quanto os grupos funcionais do polipirrol. Esses resultados sugerem que os mecanismos de remoção do bário envolvem tanto interações eletrostáticas quanto possíveis reações de complexação ou troca iônica.

Considerações Finais

Os resultados obtidos demonstraram que a zeólita ZN apresenta elevada eficiência na remoção de Ba^{2+}, evidenciando sua afinidade pelo íon e reforçando o potencial das zeólitas como materiais adsorventes em tratamento de água. A modificação com polipirrol promoveu aumento significativo na eficiência de remoção, alcançando valores próximos ao máximo esperado, o que indica que o revestimento polimérico contribui positivamente para o desempenho dos materiais, possivelmente pela melhoria das propriedades físicas do leito filtrante e pela ampliação das interações com o íon estudado.

Além disso, as análises de caracterização indicaram que a modificação com polipirrol alterou tanto as propriedades morfológicas quanto químicas dos materiais, favorecendo o processo de adsorção. Os resultados de FTIR evidenciaram a interação entre o Ba^{2+} e os sítios ativos das zeólitas e do polímero, sugerindo que a remoção envolve múltiplos mecanismos, como troca iônica, interações eletrostáticas e possíveis complexações. Dessa forma, o estudo contribui para o avanço do uso de materiais híbridos no tratamento de água, destacando o potencial das zeólitas modificadas como alternativa eficiente e promissora para a remoção de metais em águas de abastecimento

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e a Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

BATEZELLI, A. **Análise da sedimentação Cretácea no Triângulo Mineiro e sua correlação com áreas adjacentes.** 2003. Tese de doutorado (Geologia Regional) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 2003. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/entities/publication/b4e7499f-dfba-400b-bff6-0e714c966d32.

BHANDARI, H.; GARG, S.; GABA, R. Advanced Nanocomposites for Removal of Heavy Metals from Wastewater. **Macromolecular Symposia**, v. 397, n. 1, 2021. DOI: https://doi.org/10.1002/masy.202000337.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **Portaria nº 888, de 04 de maio de 2021.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html.

BRUNO, M. **Utilização de zeólitas sintetizadas a partir de cinzas de carvão na remoção de corante em água.** (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear - Materiais). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. 102 p.

CELTA BRASIL. Celtabrasil: Soluções em Automação Industrial. Disponível em: https://www.celtabrasil.com.br/.

CHOI, D.; ZHU, C.; FU, S.; DU, D.; ENGELHARD, M. H.; LIN, Y. Electrochemically Controlled Ion-exchange Property of Carbon Nanotubes/Polypyrrole Nanocomposite in Various Electrolyte Solutions. **Electroanalysis**, v. 29, n. 3, p. 929-936, 2017. DOI: https://doi.org/10.1002/elan.201600466.

CHOQUETTE, P. W.; PRAY, L. C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull. v. 54, p. 207 – 250, 1970. DOI: https://doi.org/10.1306/5D25C98B-16C1-11D7-8645000102C1865D.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Relatório de qualidade de águas subterrâneas no Estado de São Paulo 2004-2006.** São Paulo: Cetesb, 2007.

COOMBS, D. S. A. S.; ARMBRUSTER, T.; ARTIOLI, G.; COLELLA, C.; GALLI, E.; GRICE, J. D.; LIEBAU, F. **Recommended nomenclature for zeolite minerals: Report of the subcommitee on zeolites of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names.** Canadian Mineralogist. Canadá: 1571, 1606 p., 1997.

DI BERNARDO, L. Tratamento de água para abastecimento por filtração direta. São Carlos: Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB), 2003. 491 p.

DU, X.; SUN, X.; ZHANG, H.; WANG, Z.; HAO, X.; GUAN, G.; ABUDULA, A. A Facile Potential-Induced In-Situ Ion Removal Trick: Fabrication of High-Selective Ion-Imprinted Film for Trivalent Yttrium Ion Separation. **Electrochimica Acta**, v. 176, p. 1313-1323, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.07.084.

LACERDA, T. M. **Espectroscopia de Absorção e Emissão Atômica do Instituto de Química da Universidade de São Paulo (IQ-USP).** Lorena, SP: IQ-USP, 02 de maio de 2016. 89 slides. Disponível em: https://www.iq.usp.br/hvlinner/Absorcao%20e%20emissao%20atomica.pdf.

MAHMUD, H. N. M. E.; HUQ, A. K. O.; YAHYA, R. B. The removal of heavy metal ions from wastewater/aqueous solution using polypyrrole-basedadsorbents: a review. **RSC Advances**, v. 6, p. 14778-14791, 2016. DOI: https://doi.org/10.1039/C5RA24358K.

MCCUSKER, L. B.; BAERLOCHER, C. Zeolite Structures. **Studies in Surface Science and Catalysis**, v. 168, p. 13-37, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/S0167-2991(07)80790-7.

MOHAN, D.; SARSWAT, A.; OK, Y. S.; PITTMAN JR., C. U. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent – A critical review. **Bioresource Technology**, v. 160, p. 191-202, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.120.

NADDAFI, K.; MESDAGHINIA, A.; ABTAHI, M.; HASSANVAND, M. S.; BEIKI, A.; SHAGHAGHI, G.; SHAMSIPOUR, M.; MOHAMMADI, F.; SAEEDI, R. Assessment of burden of disease induced by exposure to heavy metals through drinking water at national and subnational levels in Iran, 2019. **Environmental Research**, v. 204, parte B, 112057, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112057.

QASEM, N. A. A.; MOHAMMED, R. H.; LAWAL, D. U. Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. **Npj Clean Water**, v. 36, n. 4, 2021 DOI: https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0.

RIDA, K.; BOURAOUI, S.; HADNINE, S. Adsorption of methylene blue from aqueous solution by kaolin and zeolite. **Applied Clay Science**, v. 83-84, p. 99-105, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.08.015.

SARAVANAN, A.; KUMAR, P. S.; JEEVANANTHAM, S.; KARISHMA, S.; TAJSABREEN, B.; YAASHIKAA, P. R.; RESHMA, B. Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal. **Chemosphere**, v. 280, 130595, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130595.

TIAN, Y.; XING, J.; HUYAN, C.; ZHU, C.; DU, D.; ZHU, W.; LIN, Y.; CHOWDHURY, I. Electrically Controlled Anion Exchange Based on a Polypyrrole/Carbon Cloth Composite for the Removal of Perfluorooctanoic Acid. **ACS ES&T Water**, v. 1, n. 12, p. 2459-2555, 2021. DOI: https://doi.org/10.1021/acsestwater.1c00239.

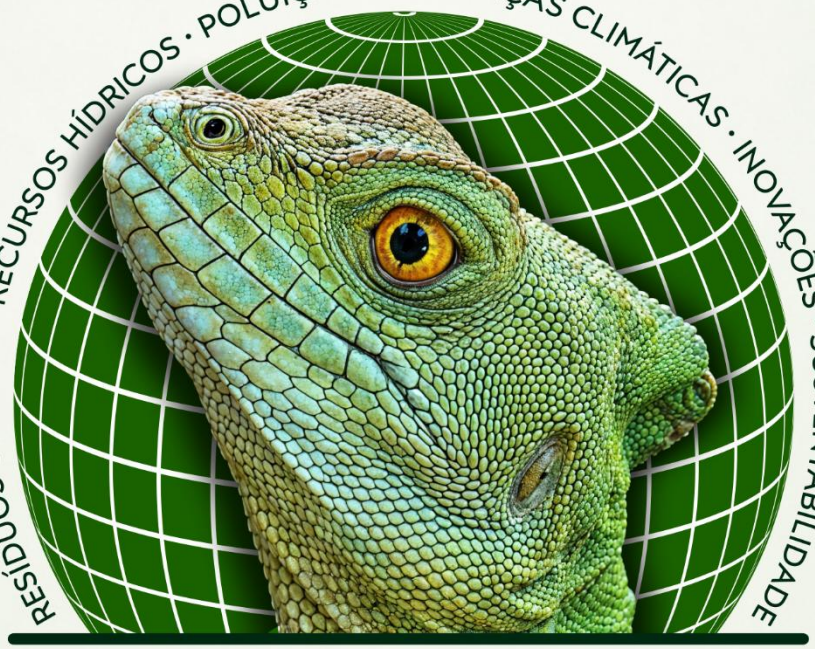
TZANKOVA, D.; VLADIMIROVA, S.; PEIKOVA, L.; GEORGIEVA, M. Synthesis of pyrrole and substituted pyrroles (review). **Journal of Chemical Technology and Metallurgy**, v. 53, n. 3, p. 451-464, 2018.

VALASKI, R.; AYOUB, S.; MICARONI, L. **Thin Solid Films.** v. 388 (1-2), p. 171-176, 2001.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Barium in Drinking-water**. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva, Switzerland. 2016. Disponível em: https://www.who.int/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/barium-background-document.pdf.

ÁREA TEMÁTICA 32

SANEAMENTO: EFLUENTES SANITÁRIOS E INDUSTRIAIS



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

REMOÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO ATRAVÉS DE PROCESSO ANAMOX: APLICAÇÃO EM EFLUENTE ANAERÓBIO DOMÉSTICO

1 Filipe Gomes de Matos, 2 Brenda Piteira Gonçalves Carvalho, 3 Juliana Calábria de Araújo.
1 Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, Brasil, e-mail: filipegomesmatos@gmail.com; 2 Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, Brasil, e-mail:brendapiteira@gmail.com; 3 Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, Brasil, e-mail: juliana@desa.ufmg.br

Palavras-chave: Anammox; Remoção de nitrogênio; Efluente anaeróbio.

Resumo

O processo anammox tem se destacado como uma alternativa inovadora e eficiente para a remoção biológica de nitrogênio em águas residuárias, especialmente quando associado à nitrificação parcial. Este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicação do processo anammox no pós-tratamento de efluente anaeróbio doméstico, investigando a influência da matéria orgânica e da operação sob temperatura ambiente do Sudeste brasileiro. O estudo foi conduzido em um reator em bateladas sequenciais, com volume de trabalho de 2 L, operado em quatro fases distintas, variando o tipo de alimentação, a suplementação de nitrito, a aeração e o controle de temperatura. Os resultados indicaram remoções satisfatórias de nitrogênio amoniacal e nitrogênio total, bem como baixas concentrações de nitrato no efluente, evidenciando a ocorrência do processo anammox. Conclui-se que o processo apresentou desempenho estável mesmo sob variações operacionais, demonstrando seu potencial de aplicação como alternativa viável para o pós-tratamento de efluentes anaeróbios domésticos.

Introdução

De acordo com o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto de 2019 (SNIS, 2020), apenas 49,1% dos esgotos gerados no Brasil são tratados, com as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul apresentando os maiores índices, embora não sejam ideais (57, 56 e 47%, respectivamente). No entanto, Chernicharo et al. (2018) constataram que, nas estações de tratamento de esgotos (ETEs) destas regiões, prevalecem sistemas apenas para remoção de matéria orgânica, com predomínio de reatores de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB). Os autores também identificaram que sistemas de lodos ativados são os terceiros mais utilizados, visando principalmente a remoção de nitrogênio. Apesar de reatores UASB serem uma excelente alterativa de redução de custos de operação, por tratar-se de sistema anaeróbio com potencial de recuperação energética do metano produzido, esta tecnologia não é suficiente para a remoção de nitrogênio. Este panorama fortalece a urgente necessidade de implementação de sistemas eficazes e economicamente viáveis para o gerenciamento de nitrogênio de águas residuárias em ETES, que poderá contribuir para a democratização do saneamento no Brasil.

O processo mais utilizado para remoção biológica de nitrogênio, ocorrendo em sistemas denominados clássicos, conta com nitrificação total seguida de desnitrificação heterotrófica. Esses sistemas são intensivamente energéticos devido à elevada demanda de aeração, fonte externa de matéria orgânica e acentuada geração de lodo (LACKNER *et al.*, 2014; LAURENI *et al.*, 2015). Ainda de acordo com os autores, o processo de oxidação anaeróbia do íon amônio (anammox) combinado a nitrificação parcial (NP/A) tem vantagens significativas em comparação a sistemas clássicos para remoção de nitrogênio, devido à reduzida demanda de aeração e produção de lodo, além de se tratar de um sistema completamente autótrofo, sem necessidade de fonte externa de carbono. As reações de nitritação, nitratação e desnitrificação heterotrófica ocorrem de acordo com as Equações 1 (Yang *et al*., 2015), 2 (VON SPERLING, 2014) e 3 (AHN, 2006).

$$NH_4^+ + 1{,}5O_2 + 2HCO_3^- \rightarrow NO_2^- + 2CO_2 + 3H_2O \quad (01)$$

$$NO_2^- + 0{,}5\ O_2 \rightarrow NO_3^- + \text{energia} \quad (02)$$

$$NO_3^- + 1{,}08\ CH_3OH + 0{,}24H_2CO_3 \rightarrow 0{,}056C_5H_7O_2N + 0{,}47N_2 + 1{,}86H_2O + HCO_3^- \quad (03)$$

A matéria orgânica é uma importante fonte de energia, e pode ser utilizada para a produção de metano através de arquéias metanogênicas (MA *et al.*, 2016). De acordo com Laureni *et al*. (2015), a utilização de carbono contido em afluentes para promover a desnitrificação heterotrófica reduz a produção de biogás nas ETEs. Segundo Lan *et al*. (2011) 1,74mg/L de matéria orgânica é utilizada para consumo de 1mg/L de nitrato (NO_3^-) na desnitrificação heterotrófica.

Recentemente, a mudança de paradigma para as novas ETEs envolve a separação de carbono orgânico para geração de bioenergia, e a subsequente remoção autótrofa de nitrogênio (LIU *et al.*, 2017). Dessa forma, o processo convencional de remoção biológica de nitrogênio com nitrificação/desnitrificação tem sido substituído pelo processo anammox (Cho *et al.*, 2017). Segundo Yang *et al*. (2015), o processo tem reduzidas emissões de dióxido de carbono (CO_2) e óxido nitroso (N_2O). Além disso, implementação do processo anammox tem potencial para tornar as ETEs próximas à autarquia energética (LAURENI *et al.*, 2016).

De acordo com Laureni *et al*. (2015), o tratamento de águas residuárias utilizando digestão anaeróbia e processo anammox tem potencial de transformar o balanço energético do sistema positivo. Na reação anammox, o íon amônio (NH_4^+) é anaerobiamente

oxidado a N_2 sob condições anóxicas, utilizando o nitrito (NO_2^-) como aceptor de elétrons (MA *et al*., 2016; TOMASZEWSKI *et al*., 2017). O processo anammox é autotrófico, utilizando CO_2 como única fonte de carbono (Strous *et al.,* 1998*)*. De acordo com Ma *et al*. (2016), a equação estequiométrica da reação anammox pode ser definida como mostra a Equação 4.

$$NH_4^+ + 1{,}32NO_2^- + 0{,}066HCO_3^- + 0{,}13H^+ \rightarrow 1{,}02N_2 + 0{,}26NO_3^- + 0{,}066CH_2O_{0,5}N_{0,15} + 2{,}03H_2 \quad (04)$$

O processo anammox é frequentemente combinado com a nitrificação parcial (TOMASZEWSKI *et al*., 2017). Assim, a NP/A é um processo de remoção de nitrogênio completamente autotrófico (MA *et al.*, 2016). Segundo Lackner *et al.* (2014), o processo combinado de NP/A tem sido uma das tecnologias mais inovadoras no tratamento biológico de águas residuárias. Na NP/A, cerca de 50% de NH_4^+ é oxidada a NO_2^- por bactérias oxidadoras de amônio (BOA), seguida a conversão de NH_4^+ e NO_2^- a N_2 por bactérias anammox (FERNÁNDEZ *et al.*, 2012; MIAO, *et al.*, 2018). Segundo Ma *et al*. (2016), o consumo de energia pode ser reduzido no processo de NP/A em comparação ao processo de nitrifcação total/desnitrificação heterotrófica, uma vez que a demanda de oxigênio é 60% menor. Além disso, há redução de 100% da demanda de carbono externo e redução da produção de lodo de 90% (LAURENI *et al.*, 2016; MIAO *et al.*, 2018).

Este trabalho justifica-se pela necessidade de aperfeiçoar tecnologias sustentáveis de remoção de nitrogênio de efluentes, devido à frequente presença deste composto em corpos d'água, potencializando problemas ambientais e riscos à saúde pública. Devido às vantagens econômicas e ambientais do processo conjugado de NP/A, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas a fim de elucidar, otimizar e ampliar a aplicabilidade do processo, desde o descobrimento das bactérias e do processo anammox, na década de 90.

No entanto, estas pesquisas têm se concentrado na Europa e na China, sendo menos frequentes no Brasil, onde, devido às condições climáticas, o emprego de reatores anaeróbios como o UASB é frequente em ETEs, que apesar das inúmeras vantagens em comparação à processos como lodos ativados, gera efluente com concentração expressiva de nitrogênio e também matéria orgânica. Assim, o processo de NP/anammox tem potencial de ser aplicado com sucesso como pós tratamento de efluentes de reator UASB. No entanto, pouco se sabe sobre quais seriam os impactos da matéria orgânica no processo, e também sobre os efeitos de operação de reator anammox sob temperatura ambiente do Sudeste brasileiro. Assim, este trabalho visa auxiliar na elucidação destas questões.

Material e Métodos

O reator utilizado nesta pesquisa consiste em um fermentador de mistura completa operando sob bateladas sequenciais (RBS), modelo *Benchtop Fermentor & Bioreactor BioFlo®/CelliGen®* 115 (marca *New Brunswick/Eppendorf*), com volume de trabalho de 2L. A temperatura do RBS foi mantida a 35°C e a temperatura ambiente. A agitação foi controlada a 50 rpm. O reator dispunha de sondas para medição de temperatura (°C), OD (mg/L) e pH.

Os ciclos de operação (curto e longo) deste reator incluíram: alimentação (30 min), reação (457 e 2737 min), sedimentação (20 min), saída de efluente (3 min), totalizando períodos de 8h e 16h e resultando em TDH de 24h.

Como inóculo do reator, foi utilizado lodos ativados proveniente da linha de recirculação da Estação de Tratamento de Esgotos da Bacia do Ribeirão Arrudas (ETE Arrudas), localizada no município de Sabará, Minas Gerais. Este inóculo têm sido aplicado com sucesso para partida de reatores anammox, com partida em cerca de 90 dias, como foi observado por Leal (2015), Pereira (2013) e Fernandes (2017).

O efluente anaeróbio doméstico é proveniente de um reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB) localizado no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento (CePTS), situado nas dependências da Estação de Tratamento de Esgotos da Bacia do Ribeirão Arrudas (ETE Arrudas), em Belo Horizonte, Minas Gerais. O reator UASB recebe parte da vazão de efluente doméstico bruto encaminhado a ETE Arrudas, após as etapas de tratamento preliminar contendo grade grossa de limpeza manual, grade fina mecanizada e desarenador. Esse reator vem sendo utilizado por diversas pesquisas, principalmente em sistemas de pós-tratamento.

A operação do RBS foi dividida em quatro fases. A fase 1 foi realizada com alimentação com meio de cultura sintético, para partida do sistema e bioaumentação de bactérias anammox sob temperatura de 35°C. Na fase 2, o meio de cultura sintético foi substituído por efluente anaeróbio doméstico acrescido de nitrito, para possibilitar a reação anammox, sob 35°C. Na fase 3, diferentemente da fase 2, o controle de temperatura foi desativado, mantendo a alimentação com efluente anaeróbio doméstico suplementado de nitrito. Na fase 4, a alimentação com efluente anaeróbio manteve-se, no entanto sem a suplementação com nitrito e com aeração intermitente (1 min on/ 14 min off) para reação de nitrificação parcial/anammox, sob temperatura ambiente. Um resumo da operação do RBS é apresentado na Tabela 01.

Tabela 01: Resumo das condições operacionais do RBS ao longo das quatro fases do estudo

Fases	Temperatura	Alimentação	Duração
1	35°C	Meio de cultura sintético	300 dias (20/3/20 a 14/1/21
2	35°C	Efluente anaeróbio doméstico + nitrito	62 dias (15/1/21 a 18/3/21)
3	Ambiente	Efluente anaeróbio doméstico + nitrito	87 dias (19/3/21 a 14/6/21)
4	Ambiente	Efluente anaeróbio doméstico + ar	51 dias (15/6/21 a 5/8/21)

O monitoramento do reator, além das variáveis analisadas pelo próprio sistema (temperatura, OD e pH), consistiu em análises físico-químicas que incluíram: análise da série nitrogenada (Nitrogênio total Kjeldahl - NTK -, nitrogênio amoniacal,

nitrito e nitrato), demanda química de oxigênio (DQO) demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e alcalinidade total (AT). Todas estas variáveis foram analisadas de acordo com procedimentos padronizados (APHA, 2017).

O tratamento dos dados consistiu em estatística descritiva, com número de dados, média aritmética, mediana, valores máximos e mínimos. Os resultados foram dispostos em tabelas e gráficos box-plot, utilizando o software Excel 2019.

Resultados e Discussão

O trabalho foi desenvolvido na modalidade presencial e de maneira remota. As atividades presenciais foram desenvolvidas no Laboratório de Microbiologia do DESA/UFMG, em reatores de escala laboratorial com atividade anammox, na operação e análises físico-químicas destes sistemas. As atividades de revisão de literatura, tratamento dos dados gerados e desenvolvimento de relatório de iniciação científica e do presente resumo foram elaboradas de maneira remota.

A partir dos gráficos apresentados na Figura 01, é possível observar que a eficiência de remoção mediana de nitrogênio amoniacal nas Fases 1, 2, 3 e 4 (50%), (39%), (36%) e (20%) respectivamente, portanto a mudança na alimentação do reator diminuiu a eficiência de remoção de $N\text{-}NH_4^+$.

Em relação ao nitrogênio total removido, a eficiência mediana apresentada nas Fases 1, 2, 3 e 4 (115%), (108%), (103%) e (16%) respectivamente portanto pode-se notar que a não adição de nitrito e aeração contribuíram significativamente para a redução na eficiência de remoção de nitrogênio total.

Observou-se que a proporção de $NO_3^-{}_{produzido}/NH_4^+{}_{removido}$ media presente nas Fases 1, 2, 3 e 4 (0,35%), (0,70%), (0,22%) (0,22%) respectivamente, consequentemente pode-se concluir que por meio dos valores de $NO_3^-{}_{produzido}/NH_4^+{}_{removido}$ obtidos que os resultados obtidos são satisfatórios pois apresentam baixa concentração de NO_3^- sendo gerado no reator, indicando que o processo annamox está ocorrendo.

Com relação a carga média de DQO total os valores obtidos nas Fases 2, 3 e 4 foram (70%), (120%) e (86%) respectivamente, pode-se inferir que a variabilidade nas concentrações de matéria orgânica não afetou significativamente a estabilidade do sistema, mostrando que as concentrações de matéria presente não afetaram o processo annamox.

Observou-se que durante as Fases a variável Alcalinidade total apresentou diferença significativa. Na Fase 1, 2 e 4 o valor da alcalinidade total foi de respectivamente (47%), (82%) e (90%). Durante a Fase 3 o valor da alcalinidade total foi de (-6%), o que não é vantajoso para o processo annamox.

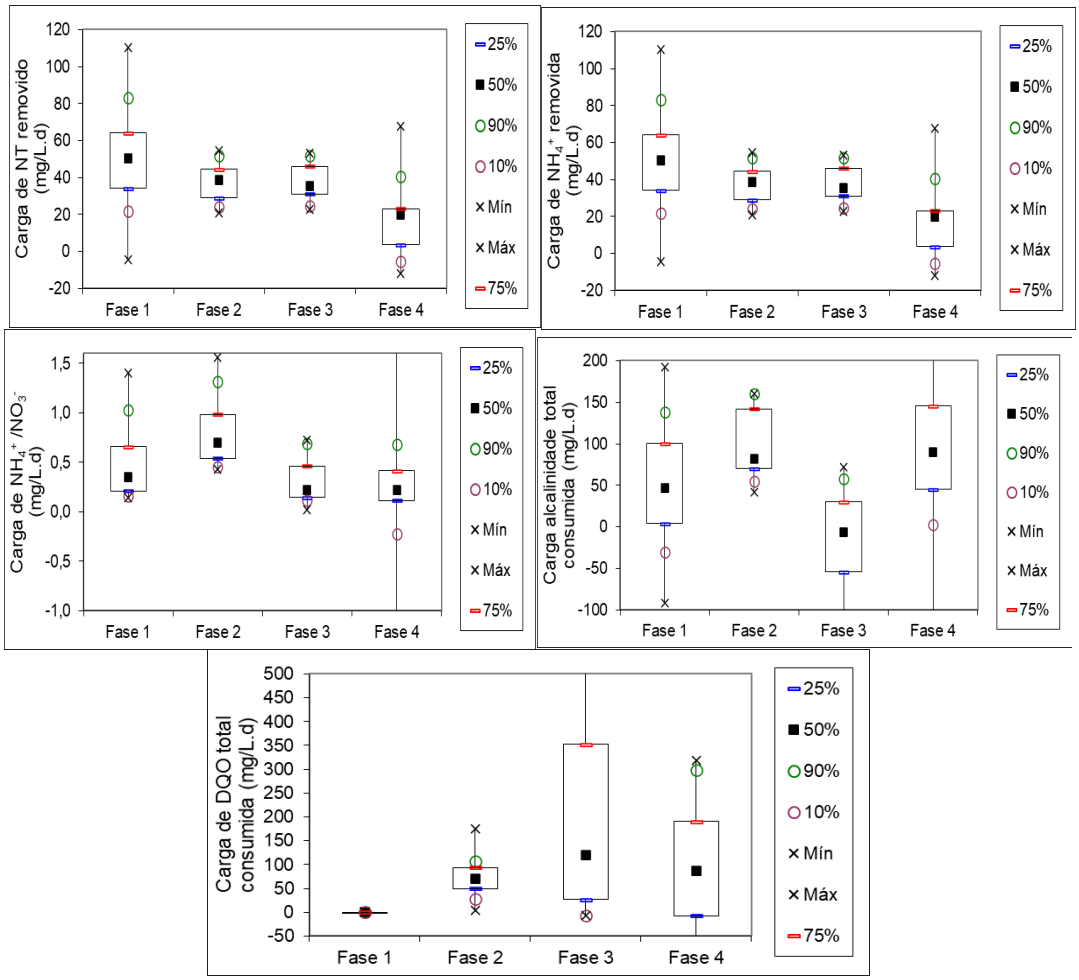


Figura 01: Gráficos box-plot das cargas removidas (mg/L.d) de NH4+, nitrogênio total, alcalinidade total e DQO total, além do coeficiente estequiométrico NO3- produzido/NH4+ removido.

Tabela02: Valores medianos de remoção/consumo de nitrogênio total, NH4+, DQO total, alcalinidade total, além do do coeficiente estequiométrico NO3- produzido/NH4+ removido, gerado e o valor teórico, nas fases 1, 2, 3 e 4.

Fases	Nitrogênio total removido (mg/L.d)	NH_4^+ removido (mg/L.d)	$NO_3^-{}_{produzido}/NH_4^+$ removido	$NO_3^-{}_{produzido}/NH_4^+$ removido (teórico)	DQO total consumida (mg/L.d)	Alcalinidade total consumida (mg/L.d)
1	115	50	0,35	0,26	*	47
2	108	39	0,70	0,26	70	82
3	103	36	0,22	0,26	120	-6
4	16	20	0,22	0,11	86	90

*Não se aplica, uma vez que na Fase 1 a matéria orgânica afluente ao reator pode ser considerada nula, em decorrência da alimentação com efluente sintético, preparado com nutrientes e água destilada.

Considerações Finais

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho, é possível constatar que o processo de remoção biológica de nitrogênio através de processo anammox aplicado a efluente anaeróbio doméstico foi estabelecido com sucesso. Entretanto, caso seja produzido as condições estabelecidas nesse trabalho, é fundamental observar o reator utilizado e a caraterização do efluente a ser tratado. Foi possível analisar que o RBS apresentou taxas satisfatórias de remoção de N-NH4+ e que as mudanças operacionais influenciaram a eficiência do processo annamox. Outrossim, foi possível constatar a viabilidade do processo annamox em condições de temperatura ambiente do Sudeste brasileiro. Conclui-se que o processo annamox é uma alternativa viável e atraente para pós tratamento de efluente anaeróbio doméstico, uma vez que o presente estudo poderá contribuir para pesquisas futuras.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

AHN, Y. H. Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: A review. Process Biochemistry, v. 41, n. 8, p. 1709–1721, 2006.

APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23. ed. Washington, D.C.: APHA/AWWA/WEF, 2017.

CHERNICHARO, C. A. DE L. et al. Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas. Revista DAE, v. 66, n. 213, p. 5–19, 2018.

CHO, K. et al. Comparison of inoculum sources for long-term process performance and fate of ANAMMOX bacteria niche in poly(vinyl alcohol)/sodium alginate gel beads. Chemosphere, v. 185, p. 394–402, 2017.

FERNÁNDEZ, I. et al. Short- and long-term effects of ammonium and nitrite on the Anammox process. Journal of Environmental Management, v. 95, n. SUPPL., p. S170–S174, 2012.

FERNANDES, L. DE A. Efeito da temperatura no processo anammox aplicado ao pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio tratando esgoto doméstico. 2017. 151 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

LACKNER, S. et al. Full-scale partial nitritation/anammox experiences - An application survey. Water Research, v. 55, n. 0, p. 292–303, 2014.

LEAL, C. D. Avaliação do efeito de diferentes relações DQO/N sobre o processo anammox e viabilidade da aplicação do processo como pós-tratamento de efluente de reator UASB tratando esgoto doméstico. 2015. 123 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

LAN, C. J. et al. Development of simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process in a sequential batch reactor. Bioresource Technology, v. 102, n. 9, p. 5514–5519, 2011.

LAURENI, M. et al. Activity and growth of anammox biomass on aerobically pre-treated municipal wastewater. Water Research, v. 80, p. 325–336, 2015.

LAURENI, M. et al. Mainstream partial nitritation and anammox: Long-term process stability and effluent quality at low temperatures. Water Research, v. 101, p. 628–639, 2016.

LIU, T. et al. Evaluation of mainstream nitrogen removal by simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process in a granule-based reactor. Chemical Engineering Journal, v. 327, p. 973–981, 2017.

MA, B. et al. Biological nitrogen removal from sewage via anammox: Recent advances. Bioresource Technology, v. 200, p. 981–990, 2016.

MIAO, Y. et al. Partial nitrification-anammox (PNA) treating sewage with intermittent aeration mode: Effect of influent C/N ratios. Chemical Engineering Journal, v. 334, n. October 2017, p. 664–672, 2018.

PEREIRA, A. D. Caracterização microbiana e avaliação do efeito do fenol em um reator em batelada sequencial com atividade anammox. 2013. 128 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

STROUS, M. et al. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 50, n. 5, p. 589–596, 1998.

TOMASZEWSKI, M.; CEMA, G.; ZIEMBIŃSKA-BUCZYŃSKA, A. Influence of temperature and pH on the anammox process: A review and meta-analysis. Chemosphere, v. 182, p. 203–214, 2017.

VON SPERLING, M. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. v. 1.

YANG, J. et al. Intermittent aeration in one-stage partial nitritation/anammox process. Ecological Engineering, v. 75, p. 413 420, 2015.

A RESISTÊNCIA DE UMA MICROALGA VERDE NA PRESENÇA DO HORMÔNIO 17B-ESTRADIOL (E2)

1 Matheus Barbosa Herbst de Oliveira, 2 Kevin Souza do Espírito Santo, 3 Vinícius Perez da Silva, 4 Célio Fernando Figueiredo Angolini, 5 Marcelo Chuei Matsudo

1 Universidade Federal do ABC, e-mail: matheus.herbst@ufabc.edu.br; 2 Universidade Federal do ABC, e-mail: kevin.souza@ufabc.edu.br; 3 Universidade Federal do ABC, e-mail: vinicius.perez@aluno.ufabc.edu.br; 4 Universidade Federal do ABC, e-mail: celio.fernando@ufabc.edu.br; 5 Universidade Federal do ABC, e-mail: marcelo.matsudo@ufabc.edu.br

Palavras-chave: Efeito inibitório; *Graesiella emersonii*; Estrogênio

Introdução

A crescente dispersão de contaminantes emergentes em ecossistemas aquáticos, como o hormônio 17β-estradiol (E2), impõe riscos ecotoxicológicos devido ao seu elevado potencial de desregulação endócrina (Montagner et al., 2017). A frequente detecção deste estrogênio em efluentes de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) justifica a necessidade de avaliar a sensibilidade de microrganismos frente à sua persistência ambiental (Ternes et al., 1999). Este cenário demonstra a importância de investigar a resistência fisiológica de espécies fotossintetizantes expostas a este contaminante para possíveis aplicações futuras em sistemas de tratamento terciário de efluentes com biorremediação de contaminantes emergentes (Rawat et al., 2011).

A seleção da *Graesiella emersonii* fundamenta-se na equivalência fisiológica com a *Chlorella vulgaris*, ambas apresentando resistência a micropoluentes e eficiência na remoção de nutrientes e, esta última, apresentando eficiência na remoção de hormônios (Huang et al., 2019; Kang et al., 2022). Porém, há lacunas literárias quanto à aplicação direta da *G. emersonii* na biorremediação de hormônios como E2. Essa semelhança ao gênero *Chlorella* torna essencial investigar seu potencial fotossintético e adaptativo frente ao estresse estrogênico (Czarny et al., 2019). Sendo assim, este estudo objetiva avaliar o efeito inibitório do E2 sobre o crescimento da *G. emersonii* e sua possível aplicação futura em sistemas de tratamento terciário de efluentes para mitigação de impactos ambientais associados a contaminantes estrogênicos (Rempel et al., 2021).

Material e Métodos

Foi utilizada uma cepa da microalga verde *Graesiella emersonii*, anteriormente identificada como *Chlorella vulgaris* CCMA-UFSCar 689 (Matsudo et al., 2020) como organismo alvo desse estudo, onde ela foi cultivada em meio Bold 1NV (UTEX, 2011) em frascos Erlenmeyer sob iluminação artificial contínua de 60 µmol fótons·m^{-2}·s^{-1}, agitação de 130 RPM em shaker rotativo, temperatura controlada de 25 ºC e pH inicial igual a 7,0 (Bresaola et al., 2019). O monitoramento do crescimento foi realizado via densidade óptica (DO_{550nm}), correlacionada à biomassa seca (mg·L^{-1}) por meio de uma curva de calibração linear previamente estabelecida seguindo a metodologia de Nielsen e Hansen (2019).

Os ensaios dos Testes de Efeito Inibitório do E2 sobre a *G. emersonii* foram conduzidos em sistema de batelada simples e em triplicata, utilizando frascos de Erlenmeyer de 250 mL com 100 mL de meio Bold 1NV e as suplementações de 17β-estradiol (E2) no meio das culturas de *G. emersonii* se deram a partir de soluções concentradas de E2 em acetona (Liu et al., 2018).

Com isso, foi realizado um teste de efeito inibitório expondo a microalga a concentrações crescentes de E2 com período experimental de 7 dias nas seguintes concentrações: 0,5; 1,0; 5,0; 10; 25; e 50 mg·L^{-1}. Este teste incluiu controles sem suplementação de E2, o Controle (Bold) e o Controle (Bold) + Acetona (Controle Solvente), ambos os controles também em triplicatas.

Por fim, foi realizada uma análise estatística, onde a velocidade específica de crescimento (µ) foi calculada conforme a variação da biomassa no tempo, a normalidade e a homogeneidade dos dados foram verificadas pelos testes correspondentes e as diferenças estatísticas entre os tratamentos e os respectivos controles foram avaliadas pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, adotando-se o nível de confiança de 95%.

Resultados e Discussão

Inicialmente, para avaliar o crescimento da *G. emersonii*, foi estabelecida uma curva de calibração linear para a conversão em biomassa seca (mg.L^{-1}), conforme a Figura 01.

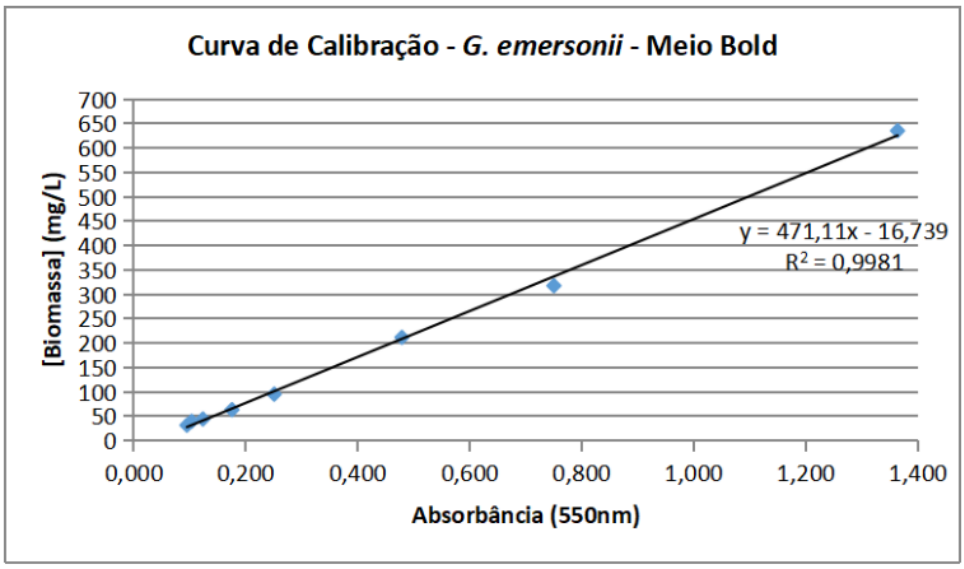


Figura 01: Gráfico da curva padrão de calibração para *Graesiella emersonii* no meio Bold 1NV.
Fonte: Autor (2026)

No teste de efeito inibitório, sob concentrações de 0,5 a 50 mg.L^{-1} de 17β-estradiol (E2) durante 7 dias, o controle em meio Bold 1NV apresentou uma média de concentração de biomassa (X_7) de 447,6±148,1 mg.L^{-1} e velocidade específica de crescimento (μ) de 0,153±0,0539 dia^{-1}, enquanto o Controle Solvente apresentou X_7 de 535,7±107,4 mg.L^{-1} e μ de 0,183±0,0301 dia^{-1}, dados detalhados na Tabela 01. Nas culturas suplementadas com o hormônio, o valor da média de biomassa na menor dosagem (0,5 mg.L^{-1} de E2) foi de 497,6±21,2 mg.L^{-1}; para a dosagem intermediária maior (10 mg.L^{-1} de E2), o valor foi de 503,1±12,5 mg.L^{-1} e para a maior dosagem (50 mg.L^{-1} de E2) o valor foi de 524,0±23,5 mg.L^{-1}. A velocidade específica de crescimento para cada uma dessas faixas de concentração foi de 0,175±0,0060 dia^{-1}, 0,176±0,0035 dia^{-1} e 0,182±0,0064 dia^{-1}, respectivamente. A aplicação do teste de Kruskal-Wallis resultou em um valor p=0,808 tanto para X_7 quanto para μ, confirmando a ausência de diferença estatisticamente significativa entre as condições experimentais e os controles.

Tabela 01: Médias da Concentração de Biomassa (X_7) e da Velocidade Específica de Crescimento (μ) da *G. emersonii* no Teste de Efeito Inibitório com diferentes concentrações de E2 em comparação com Controle (Bold) e Controle Solvente - Todos em mg.L^{-1}.

Concentrações de E2 (mg L^{-1})	X_7 (desv. Pad) (mg.L^{-1})	μ (desv. Pad) (dia^{-1})
Controle (Bold)	447,6 ± 148,1	0,153 ± 0,0539
Controle (Bold) + Solvente (Acetona)	535,7 ± 107,4	0,183 ± 0,0301
0,5	497,6 ± 21,2	0,175 ± 0,0060
1,0	485,4 ± 53,5	0,170 ± 0,0153
5,0	472,5 ± 81,3	0,166 ± 0,0250
10	503,1 ± 12,5	0,176 ± 0,0035
25	454,8 ± 64,6	0,161 ± 0,0202
50	524,0 ± 23,5	0,182 ± 0,0064

Fonte: Autor (2026)

Conforme a curva de crescimento representada na Figura 02, a fase logarítmica foi mantida em todos os tratamentos. O aspecto visual das culturas com coloração esverdeada no 7º dia confirma a densidade celular sem diminuição em todas as concentrações de E2 testadas, incluindo a dosagem máxima de 50 mg.L^{-1}, conforme demonstrado na Figura 03.

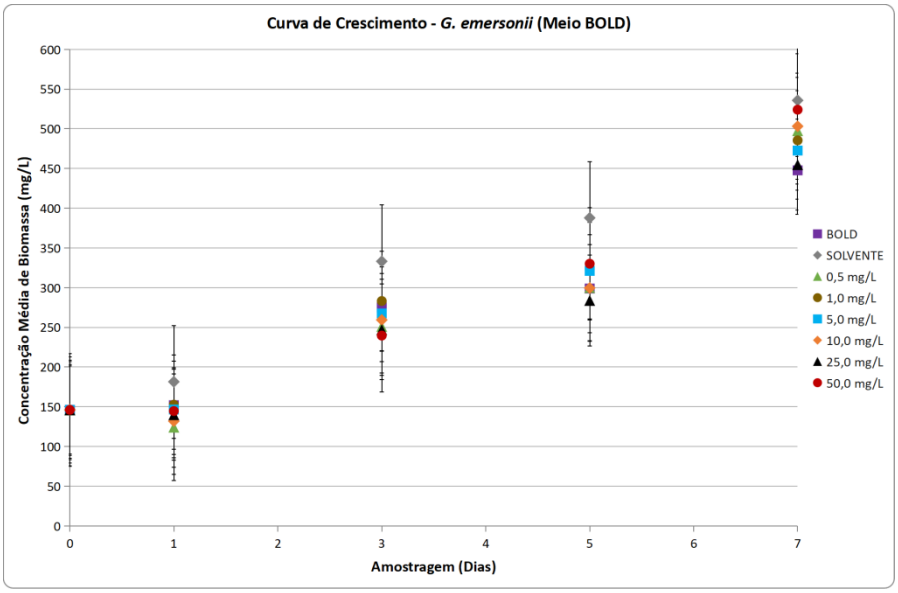


Figura 02: Gráfico da curva de crescimento da *G. emersonii* em meio Bold 1NV no Teste de Efeito Inibitório do E2 sobre esta microalga.
Fonte: Autor (2026)

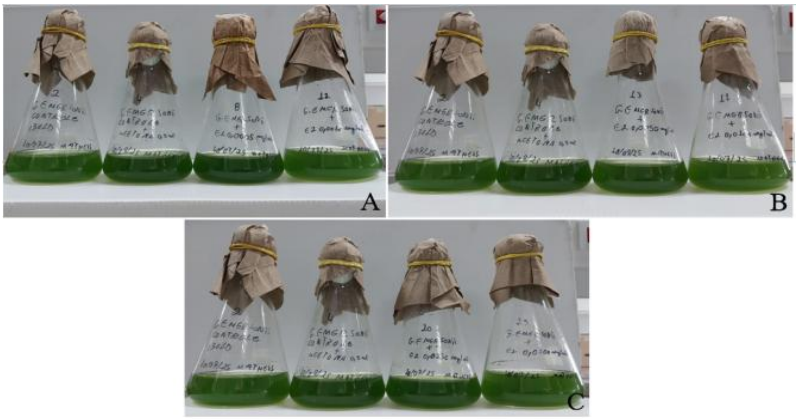


Figura 03: A até C = Aspecto visual no 7º dia do Teste de Efeito Inibitório do E2 sobre a *G. emersonii* em meio Bold 1NV com diferentes concentrações do contaminante, onde o Frasco 2 = Controle (Bold) e o Frasco 4 = Controle Solvente. Os Frascos 8, 12, 13, 17, 20 e 23 são, respectivamente, as concentrações 0,5; 1; 5; 10; 25 e 50 mg.L^{-1}.
Fonte: Autor (2026)

Esses resultados demonstram que o microrganismo mantém sua estabilidade fisiológica e crescimento inalterados frente ao E2, atingindo o objetivo central de verificar a sensibilidade da *G. emersonii* a esse hormônio estrogênico. A interpretação desses resultados indica uma elevada resistência metabólica da microalga, uma vez que ela manteve sua fase logarítmica de crescimento, mesmo sob concentrações elevadas de 50 mg.L^{-1}, o que sugere que a microalga possui mecanismos de resistência ou adaptação que impedem danos letais até em níveis muito superiores aos ambientais (Bila & Dezotti, 2003).

Ao comparar os resultados com a literatura disponível, observa-se uma divergência em relação ao comportamento de espécies taxonômicamente próximas, já que enquanto em Huang et al. (2019) relatou que a microalga *C. vulgaris* sofre inibição de crescimento e danos oxidativos em concentrações de E2 situadas entre 1,0 e 2,0 mg.L^{-1}, a *G. emersonii* não apresentou reduções estatisticamente significativas ($p > 0,05$) em nenhuma das faixas testadas até a concentração de 50 mg.L^{-1}.

E, ainda, o trabalho de Wang et al. (2019), indica que microalgas verdes eficazes na remoção de E2, como a *Chlorella vulgaris*, *Selenastrum capricornutum* e *Scenedesmus quadricauda*, operam via biotransformação do hormônio em metabólitos, incluindo a estrona (E1), o que pode explicar a manutenção da viabilidade celular observada.

Considerações Finais

O presente estudo cumpre o objetivo de avaliar a ação inibitória do 17β-estradiol (E2) sobre a microalga *Graesiella emersonii*, demonstrando que o organismo possui uma elevada tolerância a este estrogênio. Os resultados revelaram que a microalga mantém seu crescimento em fase logarítmica mesmo em concentrações elevadas de 50 mg.L^{-1}. Este resultado é significativo, pois valida a robustez da *G. emersonii* como um agente biológico capaz de operar em sistemas de biorremediação sem sofrer inibição por carga hormonal.

Além disso, este trabalho oferece contribuições nunca antes avaliadas sobre a interação entre a *G. emersonii* e o estrogênio alvo, preenchendo uma lacuna literária e consolidando o uso da acetona como solvente metodologicamente eficaz e não tóxico para ensaios com esta espécie de microalga. E, ainda, fortalece uma possível viabilidade da implementação deste microrganismo em sistemas de tratamento terciário de efluentes, o que beneficiaria gestores de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), e a saúde dos ecossistemas receptores, incluindo a humana. Por fim, a aplicação proposta integraria-se à economia circular, associando-se à mitigação de desreguladores endócrinos e à produção de biomassa com potencial valorização biotecnológica.

Agradecimentos

Agradeço à Universidade Federal do ABC (UFABC) e ao Programa de Pós-Graduação em Biotecnociência (PPG-BTC), pelo suporte institucional e pela infraestrutura concedida para a realização desta pesquisa, também à comissão organizadora do 5º Congresso Internacional de Engenharia Ambiental e à Tropical Water Research Alliance (TWRA) pelo suporte à realização do evento. Este projeto conta com financiamento da FAPESP (processos nº 2023/04170-0 e 2024/08678-8).

Referências Bibliográficas

BILA, D. M.; DEZOTTI, M. Fármacos no meio ambiente. Química Nova, v. 26, n. 4, p. 523–530, 2003. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-40422003000400015.,

BRESAOLA, M. D. et al. Semi-continuous process as a promising technique in Ankistrodesmus braunii cultivation in photobioreactor. Journal of Applied Phycology, v. 31, p. 2197–2205, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s10811-019-01774-0.,

CZARNY, K. et al. Toxic effects of single animal hormones and their mixtures. Chemosphere, v. 220, p. 239–247, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.121.,

HUANG, B. et al. Ecotoxicological effects and removal of 17β-estradiol in Chlorella algae. Environmental Science and Pollution Research, v. 26, n. 2, p. 1616–1625, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-018-3564-3.,

KANG, N. S. et al. Taxonomic and biochemical characterization of microalga Graesiella emersonii GEGS21. Energies, v. 15, n. 22, p. 8725, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/en15228725.,

LIU, W. et al. Removal and biodegradation of 17β-estradiol and diethylstilbestrol by the freshwater microalgae Raphidocelis subcapitata. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 15, n. 3, p. 452, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph15030452.,

MATSUDO, M. C. et al. Isolation and evaluation of microalgae from mangrove area in south coast of São Paulo (Brazil) for lipid production. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, v. 9, n. 6, p. 1293–1302, 2020. DOI: https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.906.161.,

MONTAGNER, C. C.; VIDAL, C.; ACAYABA, R. D. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil. Química Nova, v. 40, n. 9, p. 1094–1110, 2017. DOI: https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170136.,

NIELSEN, S. L.; HANSEN, B. W. Evaluation of the robustness of optical density as a tool for estimation of biomass in microalgal cultivation. Aquaculture Research, v. 50, n. 9, p. 2698–2706, 2019. DOI: https://doi.org/10.1111/are.14227.,

RAWAT, I. et al. Dual role of microalgae: phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. Applied Energy, v. 88, n. 10, p. 3411–3424, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.025.,

REMPEL, A. et al. Current advances in microalgae-based bioremediation and other technologies for emerging contaminants treatment. Science of the Total Environment, v. 772, p. 144918, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144918.,

TERNES, T. A. et al. Behavior and occurrence of estrogens in municipal sewage treatment plants. Science of the Total Environment, v. 225, n. 1–2, p. 81–90, 1999. DOI: https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00334-9.,

UTEX – THE CULTURE COLLECTION OF ALGAE. Bold 1NV Medium. Austin: University of Texas at Austin, 2011. URL: http://web.biosci.utexas.edu/utex/Media%20PDF/bold-1nv-medium.pdf.,

WANG, Y. et al. Biotransformation of estrone, 17β-estradiol and 17α-ethynylestradiol by four species of microalgae. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 180, p. 723-732, 2019.

AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO POTENCIAL DE *EUGLENA GRACILIS* NA BIORREMEDIAÇÃO DE SULFAMETOXAZOL

1Kevin Souza do Espírito Santo, 2Matheus Barbosa Herbst de Oliveira, 3Belton Henrique Condela Guambe, 4Vinícius Perez da Silva, 5Célio Fernando Figueiredo Angolini, 6Marcelo Chuei Matsudo.

1 Universidade federal do ABC, e-mail: kevin.souza@ufabc.edu.br; 2 Universidade federal do ABC, e-mail: matheus.herbst@ufabc.edu.br; 3 Universidade federal do ABC, e-mail: belton.guambe@ufabc.edu.br; 4 Universidade federal do ABC, e-mail: vinicius.perez@aluno.ufabc.edu.br; 5 Universidade federal do ABC, e-mail: celio.fernando@ufabc.edu.br; 6 Universidade federal do ABC, e-mail: marcelo.matsudo@ufabc.edu.br.

Palavras-chave: Contaminante emergente; Microalga; Biotecnologia.

Introdução

A problemática com contaminantes emergentes, incluindo hormônios, antibióticos e produtos de cuidado pessoal, constitui um problema ambiental de escala global, sendo frequentemente detectada em corpos hídricos em decorrência de atividades antrópicas. A limitação das legislações vigentes, que não contemplam adequadamente esses compostos, associada à baixa eficiência dos processos convencionais de tratamento de efluentes, contribui para sua liberação contínua no ambiente aquático. Como consequência, tais substâncias podem sofrer processos de bioacumulação e biomagnificação ao longo da cadeia trófica, resultando em impactos adversos à biota e à saúde humana, incluindo a seleção e disseminação de bactérias portadoras de genes de resistência. (Singh et al., 2022; Yan et al., 2024).

Entre os antibióticos detectados em corpos hídricos no Brasil, o sulfametoxazol (SMX) apresenta ampla distribuição espacial, sendo reportado em concentrações entre 0,80 e 2.592,6 ng·L^{-1} (Lima et al., 2023). Esse cenário reforça a necessidade de desenvolvimento de estratégias mais eficientes para sua remoção em sistemas de tratamento de efluentes.

Nesse contexto, tecnologias baseadas no uso de microalgas têm sido propostas como alternativas sustentáveis e economicamente viáveis, especialmente em etapas de tratamento terciário de efluentes (Leng et al., 2020). Além da capacidade de remoção de contaminantes, esses organismos contribuem para a assimilação de nutrientes, possibilitando a integração do tratamento de efluentes com a geração de biomassa de valor agregado, potencialmente aplicável na produção de nutrição animal e biocombustíveis (Dolganyuk et al., 2020; Kaur et al., 2026). Contudo, a formação de subprodutos durante a degradação de antibióticos ainda demanda investigações (Leng et al., 2020).

A remoção de antibióticos por microalgas pode ocorrer por diferentes mecanismos, incluindo adsorção, bioacumulação, biodegradação, fotodegradação e hidrólise (Leng et al., 2020). Tais processos podem atuar de forma simultânea sendo dependes de fatores como a espécie de microalga, a estrutura do contaminante e as condições operacionais do sistema. Nesse sentido, embora o gênero *Chlorella* seja amplamente empregado, diferentes espécies de microalgas apresentam desempenhos distintos na remoção de SMX e apresentam inibição com 1000 ng·L^{-1}, evidenciando a necessidade de avaliação específica para cada organismo (Borecka et al., 2016; Eguchi et al., 2004).

Dentre as microalgas de interesse biotecnológico, destaca-se *Euglena gracilis*, espécie com compostos de interesse para os setores de cosméticos, energia e nutrição (Gissibl et al., 2019; Toyama et al., 2019). Estudos recentes demonstram sua eficiência na remoção de nutrientes e de contaminantes inorgânicos, como metais pesados e arsênio, em sistemas de tratamento de efluentes (Lira-Silva et al., 2011; Nezbrytska et al., 2022; Tahira et al., 2019). Adicionalmente, a presença de enzimas da família CYP450, associadas à oxidação de compostos orgânicos como as sulfonamidas, sugere um potencial metabólico relevante para a biodegradação de antibióticos como o SMX (Lautier et al., 2023; Zhang et al., 2022).

Entretanto, apesar dos avanços no uso de microalgas para a remoção de contaminantes emergentes, não foram identificados estudos que avaliem de forma específica o potencial de *Euglena gracilis* na degradação de antibióticos como SMX. Dessa forma, considerando a relevância ambiental desse fármaco, sua ocorrência em corpos hídricos e o potencial metabólico dessa microalga, torna-se pertinente a investigação de sua aplicação em processos de biorremediação associada ao tratamento terciário de efluentes.

Materiais e métodos

Neste projeto, foi empregada a microalga *Euglena gracilis* (UTEX B 367) da Coleção de Cultura de Algas da Universidade do Texas (UTEX). Ela foi mantida em meio TAP de acordo com a receita da CCCryo (2014) em tubos de ensaio a 25ºC e 40 µmol fótons m^{-2} s^{-1} para manutenção da viabilidade celular.

Para preparo de inóculo, a microalga foi cultivada em meio TAP, em frascos de Erlenmeyer mantidos à (90 rpm) em agitador rotativo sob intensidade luminosa de 60 µmol fótons m^{-2} s^{-1} e 25 ºC (Bresaola et al., 2019; Kato; Nam, 2021), por aproximadamente 7 dias, garantindo-se que, ao se aproveitar o inóculo, as células ainda estivessem em fase de crescimento exponencial, pelo acompanhamento do aumento da absorbância (550 nm).

Para avaliação do efeito inibitório do contaminante emergente, foi utilizado o Sulfametoxazol ($C_{10}H_{11}N_3O$; CAS 723–46–6; pureza ≥ 98,0%; ACS Científica), em meio sintético, em frascos de Erlenmeyer de 250 mL em triplicata, contendo 100 mL de meio TAP e concentração inicial de biomassa de 100 mg·L^{-1} sob agitação de 90 rpm (shaker rotativo), a 25 ºC e

intensidade luminosa de 60 µmol fótons·m^{-2}·s^{-1}, durante o período de 7 dias. As concentrações de contaminantes emergentes foram aplicadas de forma crescente, com o objetivo de determinar a concentração capaz de produzir inibição de 50% do crescimento celular em 7 a 10 dias. As concentrações testadas no primeiro ensaio foram 0,25; 0,5; 0,75; 1; 5 e 10 mg·L^{-1} dissolvido inicialmente em Etanol, enquanto no segundo ensaio foram 0,5; 5; 10; 25 e 50 mg·L^{-1} dissolvidos inicialmente em acetona com a quantidade de solvente igualada entre os frascos Erlenmeyer. Os cultivos foram acompanhados por meio de medidas diárias de absorbância (550 nm). Para determinar a concentração de biomassa ao longo dos cultivos realizados, foi elaborada uma curva padrão, a qual permite a conversão dos valores de absorbância (550 nm) em concentração de biomassa (mg·L^{-1}) (Nielsen & Hansen, 2019).

A concentração de biomassa foi determinada por método gravimétrico, utilizando-se membrana de filtração com porosidade de 1,2 µm, posterior mente seca e pesada para comparação com a curva de calibração, ao final do cultivo foram guardadas amostras de sobrenadante das condições experimentais para quantificação de antibióticos em HPLC.

Análise de LC–MS

A separação cromatográfica foi realizada em sistema de cromatografia líquida de alta eficiência acoplado à espectrometria de massas (LC–MS), utilizando coluna Luna® Omega C18 (100 × 2,1 mm; 1,6 µm; 100 Å; Phenomenex). A fase móvel foi composta por (A) solução aquosa de acetato de amônio 10 mM (pH 5,5) e (B) acetonitrila (grau LC–MS), sob eluição em gradiente (80% A/20% B até 10 min, seguido de transição para 100% B e reequilíbrio até 20 min). O fluxo foi de 0,30 mL·min^{-1}, temperatura de 40 °C e volume de injeção de 5 µL. A detecção foi realizada a 265 nm (referência 360 nm).
Equação para cálculo de remoção:

$$Remoção\ AB\ (\%) = \frac{(AB\ inicial\ -\ AB\ final)}{AB\ inicial} x100$$

Onde: *AB* representa o contaminante.

Resultados e discussão

Na Figura 1, observou-se diferença no crescimento entre os controles com solvente e as condições com maiores concentrações de SMX, em comparação com as demais amostras. Esse comportamento está associado ao efeito do etanol, que promoveu estímulo ao crescimento de *Euglena gracilis*, não apresentando correlação direta com a presença do contaminante. Destaca-se que, mesmo na concentração de 10 mg·L^{-1} de SMX, foi observado crescimento elevado, evidenciando a resistência da microalga ao fármaco.

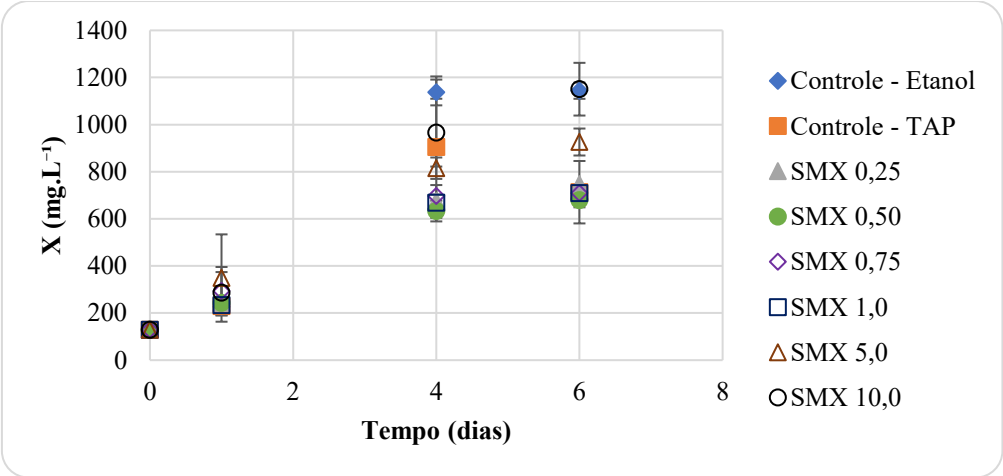


Figura 01: Curva de crescimento da E. gracilis em meio TAP dissolvido SMX em Etanol concentração 0,25 a 10 (mg·L^{-1}).
Onde: X representa a biomassa.

Com o objetivo de avaliar de forma mais precisa esse efeito e minimizar a influência do solvente, foi conduzido um segundo ensaio com concentrações mais elevadas de SMX (0,5–50 mg·L^{-1}), no qual o etanol foi substituído por acetona, evitando interferências no crescimento da microalga Figura 2.

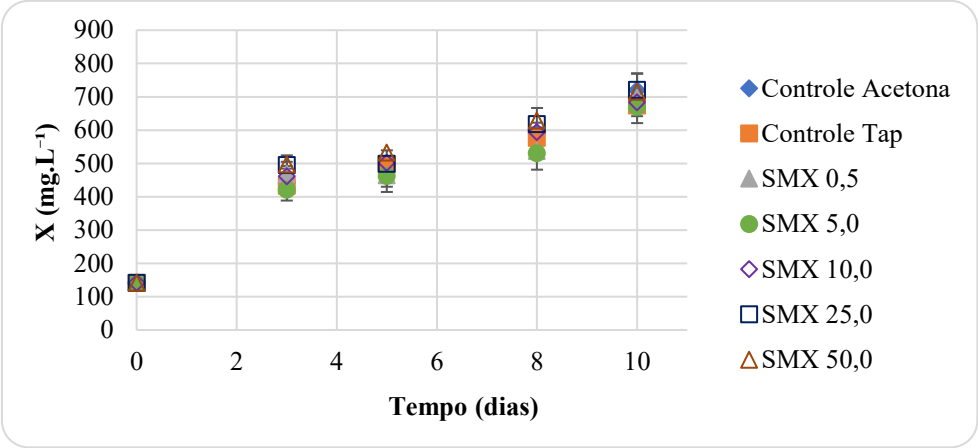


Figura 02: Curva de crescimento da *E. gracilis* em meio TAP SMX dissolvido em Acetona concentração 0,5 a 50 (mg·L⁻¹). Onde: X representa a biomassa.

Conforme observado nos testes de efeito inibitório, não foi verificada inibição do crescimento mesmo em concentrações elevadas do fármaco (até 50 mg·L⁻¹). A substituição do solvente mostrou-se eficaz, confirmando que o etanol foi responsável pelos efeitos observados anteriormente. Dessa forma, os sobrenadantes de 4 condições experimentais foram coletados e submetidos à análise por HPLC, com o objetivo de realizar uma avaliação preliminar do potencial de remoção. Os resultados confirmam a capacidade de remoção de SMX, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Remoção total de SMX dos testes de efeito inibitório com Etanol e Acetona.

SMX (mg/L)	SMX inicial (desv.pad)	SMX final (desv.pad)	Remoção % (desv.pad)
0,25	0,340 (0,001)	0,093 (0,013)	72,4% (3,9%)
0,5	0,586 (0,009)	0,201 (0,0153)	65,6% (2,6%)
1	0,789 (0,015)	0,346 (0,005)	56,1% (1,0%)
10	7,582 (0,189)	2,703 (0,040)	64,3% (1%)

Foi possível observar uma remoção de até 72,4% (3,9%) do composto ao longo dos ensaios, evidenciando a resistência de *Euglena gracilis* e seu potencial de aplicação em processos de biorremediação de SMX, mesmo em concentrações elevadas. Destaca-se que, na concentração de 0,25 mg·L⁻¹, foi verificada maior remoção em níveis mais baixos do contaminante, os quais são mais representativos das concentrações comumente encontradas em ambientes naturais. Dessa forma, a microalga apresenta-se como uma alternativa para a remoção de SMX, sendo previstos, em etapas futuras, estudos de cinética e mecanismo de remoção com o objetivo de avaliar de forma mais detalhada seu potencial de aplicação.

Considerações Finais

A microalga *Euglena gracilis* demonstrou ser uma espécie promissora, em razão de sua elevada resistência ao fármaco testado, em concentrações significativamente superiores às normalmente encontradas no ambiente natural de até 2.592,6 ng·L⁻¹ para SMX. No presente estudo, a microalga apresentou tolerância a concentrações de até 50. mg·L⁻¹, valor superior à resistência observada em microalgas verdes, que apresentam valores de CI_{50} em torno de 1 mg·L⁻¹, *E. gracilis* evidenciou potencial inicial de remoção, atingindo até 64% em concentrações elevadas. Dessa forma, os resultados indicam um comportamento diferenciado dessa espécie, reforçando seu potencial para aplicação em processos de biorremediação de fármacos e possivel uso em tratamento terciario de efluentes.

Agradecimentos

Agradeço ao financiamento da FAPESP (processos nº 2023/04170-0 e 2024/08700-6), e a Universidade Federal do ABC.

Referências Bibliográficas

BORECKA, Marta et al. The influence of salinity on the toxicity of selected sulfonamides and trimethoprim towards the green algae Chlorella vulgaris. Journal of Hazardous Materials, v. 308, p. 179–186, maio 2016.

BRESAOLA, Marcello Dapievi et al. Semi-continuous process as a promising technique in Ankistrodesmus braunii cultivation in photobioreactor. Journal of Applied Phycology, v. 31, n. 4, p. 2197–2205, 7 ago. 2019.

CCCryo Culture Collection of Cryophilic Algae. TAP Medium (Tris-Acetate-Phosphate). Ago. 2014.

DOLGANYUK, Vyacheslav et al. Microalgae: A Promising Source of Valuable Bioproducts. Biomolecules, v. 10, n. 8, p. 1153, 6 ago. 2020.

EGUCHI, Kaoru et al. Evaluation of antimicrobial agents for veterinary use in the ecotoxicity test using microalgae. Chemosphere, v. 57, n. 11, p. 1733–1738, dez. 2004.

GISSIBL, Alexander et al. Bioproducts From Euglena gracilis: Synthesis and Applications. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, v. 7, 15 maio 2019.

KATO, Shota; NAM, Hong Gil. The Cell Division Cycle of Euglena gracilis Indicates That the Level of Circadian Plasticity to the External Light Regime Changes in Prolonged-Stationary Cultures. Plants, v. 10, n. 7, p. 1475, 19 jul. 2021.

KAUR, Sehajpreet et al. Microalgae-based bioremediation of emerging contaminants: techniques, recent developments, and future perspectives. Archives of Microbiology, v. 208, n. 1, p. 29, 20 jan. 2026.

LAUTIER, Thomas et al. Cytochrome P450 Surface Domains Prevent the β-Carotene Monohydroxylase CYP97H1 of Euglena gracilis from Acting as a Dihydroxylase. Biomolecules, v. 13, n. 2, p. 366, 15 fev. 2023.

LENG, Lijian et al. Use of microalgae based technology for the removal of antibiotics from wastewater: A review. Chemosphere, v. 238, p. 124680, jan. 2020.

LIMA, Karla V. L.; DE JESUS, Jany H. F.; NOGUEIRA, Raquel F. P. Occurrence of Antibiotics in Aqueous Matrices: An Outlook about the Situation in Brazil. Journal of the Brazilian Chemical Society, v. 35, n 3, p. 1–14, 2023.

LIRA-SILVA, Elizabeth et al. Removal, accumulation and resistance to chromium in heterotrophic Euglena gracilis. Journal of Hazardous Materials, v. 193, p. 216–224, out. 2011.

NEZBRYTSKA, Inna et al. Application of Euglena gracilis in wastewater treatment processes. BioTechnologia, v. 103, n. 4, p. 323–330, 24 dez. 2022.

NIELSEN, Søren Laurentius; HANSEN, Benni Winding. Evaluation of the robustness of optical density as a tool for estimation of biomass in microalgal cultivation: The effects of growth conditions and physiological state. Aquaculture Research, v. 50, n. 9, p. 2698–2706, 18 set. 2019.

SINGH, Ashish Kumar et al. Antimicrobials and Antibiotic Resistance Genes in Water Bodies: Pollution, Risk, and Control. Frontiers in Environmental Science, v. 10, 28 abr. 2022.

TAHIRA, Sidra et al. Bio-assessment and remediation of arsenic (arsenite As-III) in water by Euglena gracilis. Journal of Applied Phycology, v. 31, n. 1, p. 423–433, 7 fev. 2019.

TOYAMA, Tadashi et al. Enhanced production of biomass and lipids by Euglena gracilis via co-culturing with a microalga growth-promoting bacterium, Emticicia sp. EG3. Biotechnology for Biofuels, v. 12, n. 1, p. 205, 31 dez. 2019.

YAN, Zhen Guang; LI, Zhi Gang; DU, Jin Zhe. Effects of Environmental Organic Pollutants on Environment and Human Health: The Latest Updates. Toxics), v. 12, n 4, 1 abr. 2024.

YUAN, Rongfang et al. Photocatalytic oxidation of sulfamethoxazole in the presence of TiO2: Effect of matrix in aqueous solution on decomposition mechanisms. Chemical Engineering Journal, v. 359, p. 1527–1536, mar. 2019.

ZHANG, Yibo et al. Enhanced removal efficiency of sulfamethoxazole by acclimated microalgae: Tolerant mechanism, and transformation products and pathways. Bioresource Technology, v. 347, p. 126461, mar. 2022.

APLICAÇÃO DE OZÔNIO NO TRATAMENTO DE CORANTE EM EFLUENTES DA INDÚSTRIA TÊXTIL

1 Amanda N. M. de Pádua, 2 Rodrigo de M. Pompeu, 3 Caíque Morelo Passoni, 4 Marcelo Campos, 5 Carlos Nobuyoshi Ide

1Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais – UFMS, e-mail: negreli003@gmail.com; 2Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais – UFMS, e-mail: rodrigo.pompeu@ufms.br; 3Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais – UFMS, e-mail:caique.morelo@ufms.br; 4Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, email:marcelo.campos@ufms.br; 5Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, email: carlos.ide@ufms.br.

Palavras-chave: Ozonização; Box-Behnken; Procion Yellow.

Introdução

A indústria têxtil é um dos setores produtivos de maior impacto ambiental, devido ao elevado consumo hídrico em seus processos de tingimento e acabamento. Estima-se a utilização de 150 litros de água para a produção de apenas um quilo de tecido, sendo que 88% desse volume é descartado como efluente líquido (LEÃO, 2022). Durante o processo de coloração, a fixação incompleta dos corantes resulta em uma perda de aproximadamente 10% da massa utilizada, com 2% lançada diretamente nos corpos hídricos (SARKER *et al*., 2019).

Esses efluentes são caracterizados por uma mistura complexa de compostos tóxicos e recalcitrantes, apresentando elevada carga orgânica e cor acentuada. A persistência desses poluentes no ambiente compromete a qualidade dos recursos hídricos e dificulta a penetração da radiação solar na coluna d'água, afetando a biota aquática (NIAMAT et al., 2023). Os tratamentos convencionais, baseados em processos biológicos ou físico-químicos, frequentemente apresentam limitações na degradação dessas moléculas devido à sua elevada estabilidade química (SRINIVASAN; VIRARAGHAVAN, 2010).

Nesse contexto, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) destacam-se como tecnologias eficazes, fundamentadas na geração de radicais hidroxila (·OH) com alto potencial de oxidação (E^0 = 2,80 V), capazes de degradar contaminantes complexos (SANTIAGO et al., 2024). Dentre os POAs, a ozonização tem recebido destaque por promover a rápida descoloração por meio da quebra das ligações cromóforas sem a geração de resíduos secundários (FORGACS; CSERHATI; OROS, 2004; BILINSKA; GMUREK; LEDAKOWICZ, 2015).

No entanto, a eficiência da ozonização depende de variáveis operacionais como pH, tempo de reação e dosagem de ozônio. Para maximizar o desempenho do sistema com o menor número de ensaios, utiliza-se o planejamento experimental Box-Behnken, que permite avaliar estatisticamente as interações entre essas variáveis (CAMPOS, 2023). Assim, este trabalho teve como objetivo investigar a eficiência da ozonização na remoção do corante reativo Procion Yellow, analisando os parâmetros de cor, DQO e TOC, além de determinar as condições ótimas do processo por meio da modelagem estatística.

Materiais e Métodos

Caracterização e Calibração

A solução do corante Procion Yellow (PY) foi caracterizada por espectroscopia UV-Visível (Hack DR6000) para determinação do comprimento de onda de máxima absorção (λ_{max}). A curva de calibração foi elaborada com concentrações entre 0 e 150 mg L^{-1}, correlacionando absorbância e concentração.

Sistema Experimental

Utilizou-se um ozonizador O&L10.0RM-SO_2 alimentado por O_2 de alta pureza. O ozônio foi injetado por borbulhamento (pedra porosa) em 250 mL de amostra em sistema vedado. A produção de ozônio foi controlada via ajuste do fluxo de gás e do dosador do equipamento.



Figura 01:Sistema de Ozonização.
Fonte: Autor (2024)

Planejamento Experimental

Com base em testes cinéticos preliminares, aplicou-se um delineamento Box-Behnken (DBB) para avaliar quatro variáveis independentes em três níveis (-1, 0, 1): pH (4, 7 e 10), concentração de PY (50, 100 e 150 mg L^{-1}), produção de O_3 (16, 40 e 65 mg L^{-1}) e tempo (5, 22,5 e 40 min), conforme a Tabela 01. As respostas avaliadas foram as remoções de cor (%), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Carbono Orgânico Total (TOC).

Parâmetros		**Níveis**		
		-1	**0**	**1**
Tempo (min)	X_1	5	22,5	40
pH	X_2	4	7	10
Concentração PY (mg L^{-1})	X_3	50	100	150
Produção de Ozônio (mg O_3 L^{-1})	X_4	16	40	65

Tabela 01: Faixa experimental e níveis das variáveis independentes conforme modelo DBB. Fonte: Autor (2025)

Análises e Tratamento Estatístico

As análises seguiram o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23ª ed.). A significância dos fatores e suas interações foi avaliada por ANOVA ($p < 0,05$). A normalidade dos dados foi confirmada pelo teste de Shapiro-Wilk e análise de resíduos (Q-Q plots), garantindo a robustez da regressão múltipla.

Resultados e Discussão

A varredura espectral do corante Procion Yellow (PY) definiu o λ_{max} em 270 nm, com a curva de calibração apresentando linearidade ideal ($R^2 = 1$) na faixa de 0 a 150 mg L^{-1}. Nos ensaios de ozonização, a remoção de cor foi rápida e visual, atingindo 100% de eficiência em condições otimizadas e superando 80% na maioria dos testes. Esse desempenho é atribuído ao elevado potencial de oxidação do O_3 sobre os grupos cromóforos da molécula.

Quanto aos parâmetros de carga orgânica, observou-se remoções de DQO superiores a 80%, enquanto o TOC apresentou redução moderada (média de 34,31%). Essa diferença indica que, embora o ozônio fragmente a molécula original (reduzindo cor e DQO), a mineralização completa em CO_2 e H_2O não é atingida proporcionalmente, sugerindo a formação de subprodutos orgânicos persistentes. A Figura 02 apresenta os gráficos de dispersão entre valores experimentais e modelados.

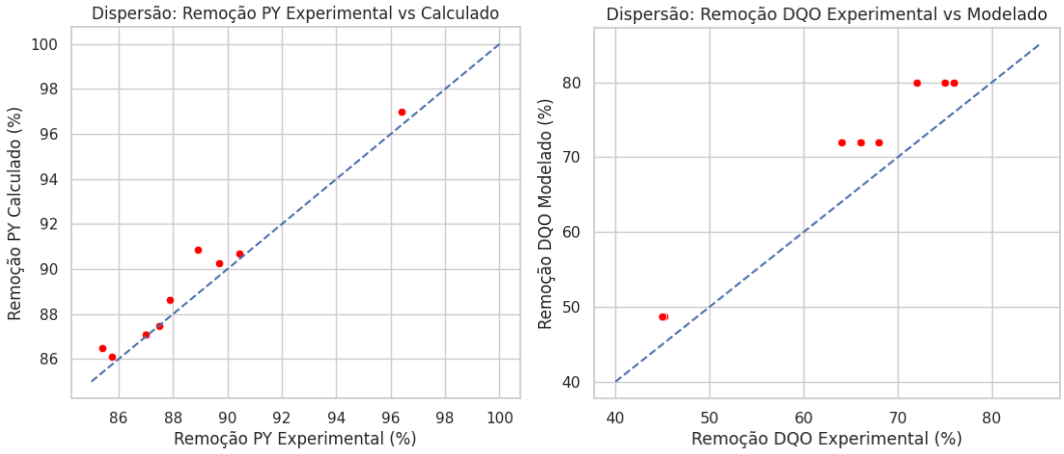


Figura 02: Gráficos de dispersão entre valores experimentais e modelados de remoção de PY e DQO. Fonte: Autor (2025)

A modelagem estatística via delineamento Box-Behnken (DBB) foi validada por ANOVA ($p < 0,05$), apresentando coeficientes de correlação de Pearson de 0,998 para cor e 0,971 para DQO, confirmando a alta capacidade preditiva do modelo. A análise de resíduos validou o modelo, mostrando que os dados seguem uma distribuição normal e têm variação constante. A otimização pela função de desejabilidade estabeleceu como condição ideal para o sistema: pH 4,45; concentração de 143 mg L^{-1} de PY; produção de O_3 de 18 mg L^{-1} e 34 minutos de reação, conforme detalhado na Tabela 02.

Exp.	pH	Concentração Inicial de PY e ((mg L^{-1})	Produção de Ozônio (mg O_3 L^{-1})	Tempo (min)	Remoção PY (%)	Remoção de DQO (%)	Remoção de TOC (%)	Desejabilidade
1	**4,45**	**143**	**18**	**34**	**90,84**	**80,01**	**36,04**	**1,000 (selecionado)**
2	4,00	50	40	22,5	86,09	48,69	30,78	1,000
3	7,00	150	40	5	86,47	71,93	27,37	1,000

Tabela 02: Condições ótimas para maximização de PY, DQO e TOC.
Fonte: Autor (2025)

No estudo cinético, a degradação do PY foi melhor descrita pelo modelo de segunda ordem ($R^2 = 0,7263$), com constante de velocidade $k = 0,0012$ L mol^{-1} min^{-1}. Isso indica que a taxa de descoloração é proporcional ao quadrado da concentração do corante remanescente no sistema sob as condições testadas.

Considerações Finais

O estudo confirmou que a ozonização otimizada por planejamento Box-Behnken, é uma técnica altamente eficaz para o tratamento do corante Procion Yellow. O processo alcançou descoloração completa (100%) e remoções de DQO superiores a 80%, demonstrando grande capacidade de fragmentação da estrutura do contaminante. A condição ótima identificada (pH 4,45; 143 mg L^{-1}; 18 mg O_3 L^{-1}; 34 min) validou a precisão do modelo estatístico com desejabilidade máxima (1,000).

Entretanto, a remoção moderada de TOC (média de 34%) evidencia que o ozônio, de forma isolada, não atinge a mineralização total dos subprodutos gerados sob as condições testadas. Conclui-se que a ozonização é uma alternativa promissora e viável para a remoção de cor e redução da carga orgânica em efluentes têxteis, mas sua aplicação para degradação completa da matéria orgânica residual pode exigir a associação com outros processos oxidativos avançados, visando um tratamento mais robusto e sustentável.

Agradecimentos

Os Autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (PPGTA/FAENG) da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), à Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT) e à UFMS pelo apoio institucional e suporte técnico recebidos para a realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

BILINSKA, Lucyna; GMUREK, Marta; LEDAKOWICZ, Stanislaw. Application of advanced oxidation technologies for decolorization and mineralization of textile wastewaters. Journal of Advanced Oxidation Technologies, v. 18, n. 2, p. 185-194, 2015.

CAMPOS, Marcelo. Otimização da degradação eletroquímica de compostos orgânicos e a ecotoxicidade do efluente gerado. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande – Mato Grosso do Sul, 2023.

FORGACS, Esther; CSERHÁTI, Tibor; OROS, Gyula. Removal of synthetic dyes from wastewater: a review. Environment international, v. 30, n. 7, p. 953-971, 2004.

LEÃO, M. M. D. et al. Controle ambiental na indústria têxtil: acabamento de malhas. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002.

NIAMAT, Humaira et al. Mitigating the Harmful Impacts of Industrial Effluents; The Potential of Biological Treatment Techniques: Biological Treatment of Industrial Effluents. MARKHOR (The Journal of Zoology), p. 12-17, 2023.

SANTIAGO, VHDEO et al. Processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes: Tendências recentes e análise bibliométrica. Brazilian Journal of Production Engineering. Учредители: Universidade Federal do Espirito Santo, v. 10, n. 4, p. 267-283, 2024.

SARKER, M. R., CHOWDHURY, M., DEB, A. K. (2019). Reduction of color intensity from textile dye wastewater using microorganisms: a review. Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci, 8(02), 3407-3415.

SRINIVASAN, Asha; VIRARAGHAVAN, Thiruvenkatachari. Decolorization of dye wastewater by biosorbents: a review. Journal of Environmental Management, v. 91, n. 10, p. 1915-1929, 2010.

DESEMPENHO DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE REATORES NA REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA E NITROGÊNIO AMONIACAL EM EFLUENTE DE ATERRO SANITÁRIO

1 Maria Clara Pilatti, 2 Débora Coraça Possa, 3 Camila Akemy Nabeshima Aquino, 4 Gabriela Medeiros, 5 Vanessa Daufenbach, 6 Lucas Cunha Foster, 7 Ralpho Rinaldo dos Reis

1 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: pilattimariacara@gmail.com; 2 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: deboracpossa@gmail.com; 3 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: camilaakemy@yahoo.com.br ; 4 Centro Universitário Univel, e-mail: gabsmedeiros@gmail.com; 5 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: vanessa.daufenbach@gmail.com; 6 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: lucas.cfoster@gmail.com; 7 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: ralpho.reis@unioeste.br

Palavras-chave: Demanda química de oxigênio; Qualidade de tratamento; Tratamento biológico.

Introdução

O cultivo das microalgas em reatores tem se destacado como uma abordagem promissora e sustentável para diferentes aplicações (Razzak et al., 2024). Esses sistemas permitem a remoção de matéria orgânica e diversos nutrientes e contaminantes, como nitrogênio nas formas de amônio (NH_4-N), nitrato (NO_3-N), ou nitrito (NO_2-N), além de fósforo e metais pesados, simultaneamente à produção de biocompostos de valor comercial. Nesse contexto, as microalgas podem ser cultivadas em diversos efluentes, incluindo lixiviados de aterro sanitário como meio de cultura, promovendo a sua remediação (Porto et al., 2021; Emalya et al., 2023).

Diversos tipos de FBRs são utilizados para o cultivo de microalgas, destacando se os tubulares, os de painel plano e os sistemas abertos (Huang et al., 2021; Kunopagarnwong, & Srinophakun, 2022). Esses sistemas apresentam eficiências variadas na remoção de poluentes, sendo influenciados por fatores como o tipo de reator, as características do efluente e condições operacionais (Oruganti et al., 2022; Masojídek et al., 2023). A compreensão integrada desses fatores é essencial para otimizar o desempenho do sistema e garantir maior estabilidade e eficiência no tratamento de efluentes.

Apesar dos avanços, ainda são necessários estudos que avaliem como diferentes configurações de fotobiorreatores influenciam a remoção de matéria orgânica e de nitrogênio amoniacal em efluentes complexos como o lixiviado de aterro sanitário. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar a eficiência de diferentes configurações de biorreatores na remoção de matéria orgânica, expressa como demanda química de oxigênio (DQO) e de nitrogênio amoniacal.

Material e métodos

Preparação e manutenção das cepas

As cepas de *Chlorella* sp. foram obtidas da Coleção de Culturas de Microalgas de Água Doce da Universidade Federal de São Carlos (CCMA-UFSCar) e previamente mantidas em cultivo autotrófico, em meio BG11, a fim de garantir sua viabilidade e padronização fisiológica antes da aplicação experimental. As culturas foram conduzidas em frascos de 500 mL, com 10% de inóculo, sob fotoperíodo de 12 h claro/12 h escuro, temperatura de 25 ± 1 °C e aeração contínua. Após estabilização, foram utilizadas como inóculo nos ensaios em diferentes configurações de reatores.

Ensaio de tratamento de efluente em diferentes configurações de reatores

O experimento foi conduzido na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus Cascavel (24°59’ S; 53°27’ O), entre 17 de março e 05 de junho de 2025, em ambiente externo sob condições climáticas naturais. Foram avaliadas três configurações de cultivo: reator tubular fechado (R1), reator aberto tipo lagoa (R2) e reator fechado de placa plana (R3) (Figura 1). Cepas padronizadas de *Chlorella* sp. foram inoculadas nos sistemas para avaliar o desempenho do tratamento do efluente em diferentes arranjos estruturais. O meio de cultivo foi composto por água de chuva e efluente de aterro sanitário tratado por osmose reversa. O crescimento celular foi monitorado diariamente por contagem direta em Câmara de Neubauer, utilizando cinco quadrados centrais em aumento de 40× em microscópio óptico. A concentração celular (células mL^{-1}) foi calculada conforme fórmula adaptada de Sipaúba-Tavares e Rocha (2003), sendo a densidade expressa em cm^3 (mL). A cada três dias, amostras de 250 mL foram coletadas de cada reator para análises físico-químicas, incluindo Demanda Química de Oxigênio (DQO) e nitrogênio amoniacal ($N\text{-}NH_3$), de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2023). As análises foram realizadas no Laboratório de Análises Ambientais e Agronômicas (ACQUASOLLUS – Campo Mourão).



Figura 01: Configuração dos reatores: reator tubular fechado (R1), reator aberto tipo lagoa (R2) e reator fechado de placa plana (R3). Fonte: Autores (2026)

Tratamento estatístico dos dados

Os dados foram analisados por meio de estatística descritiva (média, mediana e desvio padrão), seguidos de teste de normalidade (Shapiro-Wilk). Para comparação entre os reatores, foi aplicada análise de variância (ANOVA) de um fator, com nível de significância de 5% ($p < 0,05$). Quando necessário, foram realizados testes post-hoc para identificação de diferenças entre grupos. Adicionalmente, foi avaliado o coeficiente de determinação (R^2) por meio de modelos de regressão, com o objetivo de quantificar a influência da configuração dos reatores sobre os parâmetros analisados. As análises estatísticas foram conduzidas com auxílio do software XLSTAT.

Resultados e discussão

Os reatores R2 e R3 apresentaram maior eficiência na remoção de matéria orgânica, evidenciada pelas menores concentrações médias de DQO, com valores semelhantes entre si (Figura 1), enquanto o R1 registrou a maior concentração média (Tabela 1), indicando menor desempenho no tratamento. Esse resultado pode estar diretamente associado à geometria e configuração dos sistemas. Os reatores R2 e R3 favorecem maior distribuição e incidência de luz ao longo do meio de cultivo, o que potencializa os processos fotossintéticos e metabólicos das microalgas, contribuindo para a remoção de matéria orgânica (Saccardo, Bezzo e Sforza, 2022).

Tabela 01: Parâmetros estatísticos da DQO e do nitrogênio amoniacal para R1, R2 e R3, incluindo coeficiente de correlação (R), coeficiente de determinação (R^2), valor de p, média e desvio padrão para o experimento. Fonte: Autores (2026)

Variável	Reator	R	R^2	p-valor	Média	Desvio padrão
DQO (mg.L^{-1} de O_2)	R1	0,475			678,421	210,403
DQO (mg.L^{-1} de O_2)	R2	-0,240	0,226	< 0,0001	430,333	206,524
DQO (mg.L^{-1} de O_2)	R3	-0,235			431,988	239,848
N-NH_3 (mg.L^{-1})	R1	0,370			157,459	135,761
N-NH_3 (mg.L^{-1})	R2	-0,222	0,139	< 0,0001	66,501	85,688
N-NH_3 (mg.L^{-1})	R3	-0,148			77,804	75,378

Em contraste, o R1, devido sua geometria cilíndrica e maior complexidade estrutural, pode favorecer o aparecimento de incrustações nas superfícies internas do sistema. Essas incrustações reduzem a transmissão de luz no interior do reator, limitando a atividade fotossintética e, consequentemente, o crescimento microalgal e a eficiência na remoção de DQO (Kunopagarnwong e Srinophakun, 2022; Soriano-Jerez et al., 2024). Além disso, reatores tubulares apresentam maior complexidade operacional e limitações de transferência de massa, o que pode comprometer seu desempenho em comparação a outras configurações (Penloglou, 2024).

Para o nitrogênio amoniacal, os resultados indicam comportamento semelhante ao da DQO (Tabela 1), com maior concentração média no R1 e menores valores nos reatores R2 e R3 (Figura 2). A remoção de nitrogênio em sistemas microalgais pode ocorrer por diferentes mecanismos, incluindo assimilação pelas microalgas, volatilização de amônia e processos microbiológicos associados. As microalgas apresentam preferência pela assimilação de amônio (NH_4^+), por ser energeticamente

mais favorável em comparação com nitrato e nitrito (Salbitani et al., 2021). Dessa forma, a redução observada nos reatores pode estar diretamente associada ao crescimento microalgal. No R2, a maior eficiência pode estar relacionada à presença de consórcios microbianos mais complexos, favorecendo processos como nitrificação e assimilação biológica (Schenk et al., 2008). Além disso, a interação com fatores ambientais pode contribuir para a adaptação dos microrganismos, aumentando a resiliência e eficiência do sistema.

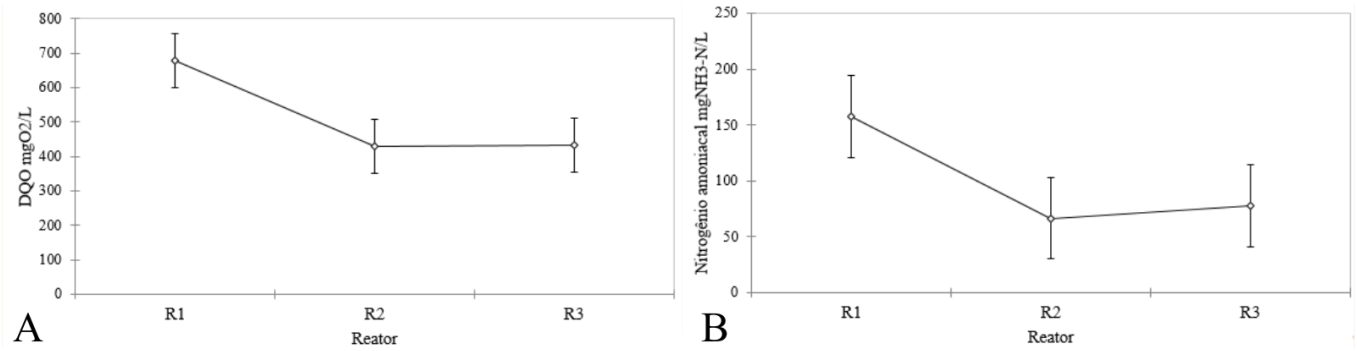


Figura 01: Valores médios e desvios padrão de DQO (A) e de nitrogênio amoniacal (B) nos reatores R1, R2 e R3 do experimento. Fonte: Autores (2026)

Outro fator relevante é a volatilização da amônia, que pode ocorrer em condições de pH elevado e temperaturas mais altas, sendo considerada um dos principais mecanismos abióticos de remoção de nitrogênio (Kube et al., 2018). Em sistemas abertos, esse processo pode ser mais pronunciado devido à maior exposição às condições ambientais. Para o R3, o desempenho semelhante ao R2 pode ser explicado pelo melhor controle operacional e pela eficiência na assimilação de nutrientes em sistemas fechados (Li et al., 2024). No entanto, fatores como limitação de CO_2, variações de pH e intensidade luminosa podem impactar negativamente o desempenho, caso não sejam adequadamente controlados.

Considerações finais

Os resultados demonstram que a configuração dos reatores influenciou a eficiência de remoção de DQO e nitrogênio amoniacal. O R2 e o R3 apresentaram maiores eficiências e comportamento semelhante, enquanto o R1 apresentou menor desempenho. As diferenças observadas estão associadas à geometria dos sistemas, que afeta a incidência de luz e, consequentemente, a atividade microalgal. O reator aberto apresenta vantagens operacionais, enquanto o reator de placa plana oferece maior controle do processo. Assim, a escolha do sistema deve considerar a eficiência, as condições operacionais e a finalidade da aplicação.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas de estudo, bem como ao Laboratório de Análises Ambientais e Agronômicas (ACQUASOLLUS – Campo Mourão).

Referências Bibliográficas

American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF) (2023). In: Lipps, W.C., Braun-Howland E.B., Baxter, T.E. (Eds.), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 24 ed. Washington: APHA Press.

CHEN, B.; LIANG, H.; LI, A.; JI, B.; ZHANG, X.; LIU, Y. Impact of ibuprofen on microalgal-bacterial granular sludge: Metabolic pathways, functional gene responses and biodegradation mechanisms. **Journal of Hazardous Materials**, v. 492, p. 138180, 2025.

EMALYA, N.; MAIRIZA, L.; BILQIS, P. Z.; SUHENDRAYATNA, S.; MUNAWAR, E.; YUNARDI, Y. Removal of Organic and Nitrogen Compounds from Domestic Landfill Leachate by Microalgae. **Biointerface Research in Applied Chemistry**, v. 13, n. 2, p. 131, 2023.

HUANG, J.; WAN, M.; JIANG, J.; ZHANG, A.; ZHANG, D. Evaluating the effects of geometry and arrangement parameter of flat panel photobioreactor on microalgae biomass production and economic performance in China. **Algal Research**, v. 57, p. 102343, 2021.

KUBE, M. JEFFERSON, B.; FAN, L.; RODDICK, F. The impact of wastewater characteristics, algal species selection and immobilisation on simultaneous nitrogen and phosphorus removal. **Algal research**, v. 31, p. 478-488, 2018.

KUNOPAGARNWONG, V.; SRINOPHAKUN, T.R. The development of tubular Photobioreactor for microalgae cultivation. **ASEAN Journal of Chemical Engineering**, v. 22, n. 2, p. 196-205, 2022.

LAEZZA, C.; SALBITANI, G.; CARFAGNA, S. Fungal contamination in microalgal cultivation: biological and biotechnological aspects of fungi-microalgae interaction. **Journal of Fungi**, v. 8, n. 10, p. 1099, 2022.

LI, P.; LUO, Y.; TIAN, J.; CHENG, Y.; WANG, S.; AN, X.; ZHENG, J.; YAN, H.; DUAN, H.; ZHANG, J.; PAN, Z.; CHEN, Y.; WANG, R.; ZHOU, H.; WANG, Z.; TAN, Z.; LI, X. Outdoor tubular photobioreactor microalgae-microorganisms biofilm treatment of municipal wastewater: Enhanced heterotrophic assimilation and synergistic aerobic denitrogenation. **Bioresource Technology**, v. 408, p. 131151, 2024.

LI, R.; SONG, M.; YIN, D.; YE, X.; YU, J.; CHEN, X. Indole-3-acetic acid mediated removal of sludge toxicity by microalgae: Focus on the role of extracellular polymeric substances. **Bioresource Technology**, v. 387, p. 129700, 2023.

MASOJÍDEK, J.; LHOTSKÝ, R.; ŠTĚRBOVÁ, K.; ZITTELLI, G.C.; TORZILLO, G. Solar bioreactors used for the industrial production of microalgae. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 107, n. 21, p. 6439-6458, 2023.

NISHSHANKA, G. K. S. H.; THEVARAJAH, B.; NIMARSHANA, P. H. V.; PRAJAPATI, S. K.; ARIYADASA, T. U. Real-time integration of microalgae-based bioremediation in conventional wastewater treatment plants:Current status and prospects. **Journal of Water Process Engineering**, v. 56, p. 104248, 2023.

ORUGANTI, R. K.; KATAM, K.; SHOW, P. L.; GADHAMSHETTY, V.; UPADHYAYULA, V. K. K.; BHATTACHARYYA, D. A comprehensive review on the use of algal-bacterial systems for wastewater treatment with emphasis on nutrient and micropollutant removal. **Bioengineered**, v.13, n. 4, p. 10412-10453, 2022.

PENLOGLOU, G.; PAVLOU, A.; KIPARISSIDES, C. Recent advancements in photo-bioreactors for microalgae cultivation: a brief overview. **Processes**, v. 12, n. 6, p. 1104, 2024.

PORTO, B.; GONCALVES, A. L.; ESTEVES, A. F.; DE SOUZA, A. A.; VILAR, V. J.; PIRES, J. C. Assessing the potential of microalgae for nutrients removal from a landfill leachate using an innovative tubular photobioreactor, **Chemical Engineering Journal**, v. 413, p. 127546, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127546.

RAZZAK, S.A. et al. Microalgae cultivation in photobioreactors: sustainable solutions for a greener future. **Green Chemical Engineering**, v. 5, n. 4, p. 418-439, 2024.

SACCARDO, A.; BEZZO, F.; SFORZA, E. Microalgae growth in ultra-thin steady-state continuous photobioreactors: assessing self-shading effects. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 10, p. 977429, 2022.

SALBITANI, G.; CARFAGNA, S. Ammonium utilization in microalgae: A sustainable method for wastewater treatment. **Sustainability**, v. 13, n. 2, p. 956, 2021.

SCHENK, P. M.; THOMAS-HALL, S. R.; STEPHENS, E.; MARX, U. C.; MUSSGNUG, J. H.; POSTEN, C.; KRUSE, O.; HANKAMER, B. Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. **Bioenergy research**, v. 1, n. 1, p. 20-43, 2008.

SHASHIREKHA, V.; SIVAKUMAR, M.; SESHADRI, S. Effective C–N–P ratio for growth and nutrient removal efficiency of Scenedesmus obliquus in sugar mill effluent. **Energy, Ecology and Environment**, v. 1, n. 5, p. 283-295, 2016.

SIPAÚBA-TAVARES L. H.; ROCHA, O. **Produção de plâncton (fitoplâncton e zooplâncton) para alimentação de organismos aquáticos**. São Carlos: Rima. 2003.

SORIANO-JEREZ, Y., GALLARDO-RODRÍGUEZ, J.J., LÓPEZ-ROSALES, L., GARCÍA-CAMACHO, F., BRESSY, C., MOLINA-GRIMA, E.; CERÓN-GARCÍA, M.C. Preventing biofouling in microalgal photobioreactors. **Bioresource Technology**, v. 407, p. 131125, 2024.

IMPACTO DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE CULTIVO MICROALGAL EM AMBIENTE NÃO CONTROLADO

1 Débora Coraça Possa, 2 Camila Akemy Nabeshima Aquino, 3 Maria Clara Pilatti, 4 Gabriela Medeiros, 5 Vanessa Daufenbach, 6 Lucas Cunha Foster, 7 Ralpho Rinaldo dos Reis

1 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: deboracpossa@gmail.com; 2 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: camilaakemy@yahoo.com.br; 3 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: pilattimariacara@gmail.com; 4 Centro Universitário Univel, e-mail: gabsmedeiros@gmail.com; 5 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: vanessa.daufenbach@gmail.com; 6 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: lucas.cfoster@gmail.com; 7 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: ralpho.reis@unioeste.br

Palavras-chave: Estabilidade operacional; Reatores; Variabilidade ambiental.

Introdução

As microalgas são organismos fotossintéticos unicelulares ou multicelulares, amplamente distribuídos em ambientes aquáticos, incluindo água doce e marinha. Esses microrganismos apresentam elevada diversidade taxonômica e ecológica, abrangendo diversos grupos como fitoflagelados, diatomáceas, algas verdes e cianobactérias (Reynolds, 2006).

Devido a sua versatilidade metabólica e eficiência fotossintética, as microalgas têm se destacado em diversas aplicações biotecnológicas e ambientais, incluindo a produção sustentável de bioprodutos de valor agregado, biocombustíveis, tratamento de águas residuais, mitigação de CO_2 e controle da poluição (Almomani e Örmeci 2018; Fu *et al*. 2019, Khavari *et al*. 2021, Narayanan 2024, Saritas *et al*. 2025).

O cultivo das microalgas pode ser realizado em sistemas abertos ou em fotobiorreatores fechados, sendo o desempenho das culturas, seu crescimento e a sua composição influenciada diretamente por fatores como temperatura, luminosidade, salinidade e disponibilidade de nutrientes (Egbo *et al*., 2018; Ahmad e Ashraf, 2023).

Em sistemas externos, não controlados, o desempenho das culturas de microalgas representa uma lacuna crítica de conhecimento, uma vez que as condições de campo são altamente variáveis, estando sujeitos a variações diárias, tais como oscilações de luz, flutuações de temperatura e as chuvas podem alterar a salinidade e concentração de nutrientes, influenciando significativamente as condições de crescimento das microalgas. (Ras, Steyer e Bernard, 2013; Green-Gavrielidis e Thornber, 2022; Echenique-Subiabre *et al*., 2023). Diante disso, o presente estudo tem como objetivo analisar como as condições ambientais não controladas influenciam o crescimento da microalga *Chlorella sp.* em sistemas de cultivo abertos e fechados, buscando compreender a resposta da biomassa às variações naturais do ambiente em diferentes configurações de reatores.

Material e métodos

Preparação e manutenção das cepas

As cepas de *Chlorella* sp. foram obtidas da Coleção de Culturas de Microalgas de Água Doce da Universidade Federal de São Carlos (CCMA-UFSCar). Inicialmente, as microalgas foram mantidas em cultivo autotrófico em meios sintéticos BG11 e BBM, com o objetivo de garantir sua viabilidade e padronização fisiológica antes da aplicação experimental. As culturas foram conduzidas em frascos de 500 mL, utilizando 10% de inóculo, sob fotoperíodo de 12 h claro/12 h escuro (lâmpadas LED branca, 6000 K, 18 W), temperatura controlada de 25 ± 1 °C e aeração contínua. As culturas não eram axênicas. Após a fase de manutenção e estabilização, as cepas foram utilizadas como inóculo nos ensaios conduzidos nos diferentes modelos de reatores, com a finalidade de avaliar o potencial de tratamento de efluente por meio do cultivo microalgal.

Ensaio de tratamento com efluente

O experimento foi conduzido na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus Cascavel (24°59’ S; 53°27’ O), no período de 17 de março a 05 de junho de 2025, em ambiente externo, sob condições climáticas naturais. Foram avaliadas três configurações de sistemas de cultivo: reator tubular fechado (R1), reator aberto tipo lagoa (R2) e reator fechado de placa plana (R3) (Figura 1). As cepas de *Chlorella* sp., previamente cultivadas e padronizadas, foram inoculadas nesses sistemas com o objetivo de analisar o desempenho do tratamento do efluente em diferentes arranjos estruturais.

O meio de cultivo foi composto por água de chuva e efluente proveniente de aterro sanitário tratado por osmose reversa. Durante o período experimental, os sistemas foram monitorados quanto ao crescimento celular e às variáveis ambientais, a fim de verificar a eficiência do cultivo microalgal no tratamento do efluente em cada modelo de reator. O crescimento celular foi monitorado diariamente por contagem direta em Câmara de Neubauer. Neste método, cinco quadrados centrais foram utilizados na contagem das células em aumento de 40x, usando microscópio óptico. A média do número de células por mililitro foi calculado conforme a fórmula adaptada de Sipaúba-Tavares e Rocha (2003) e a densidade final é expressa em cm^3 (ml). Os dados meteorológicos, incluindo precipitação, temperatura do ar e radiação solar, foram obtidos junto ao Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR) para o mesmo período experimental.

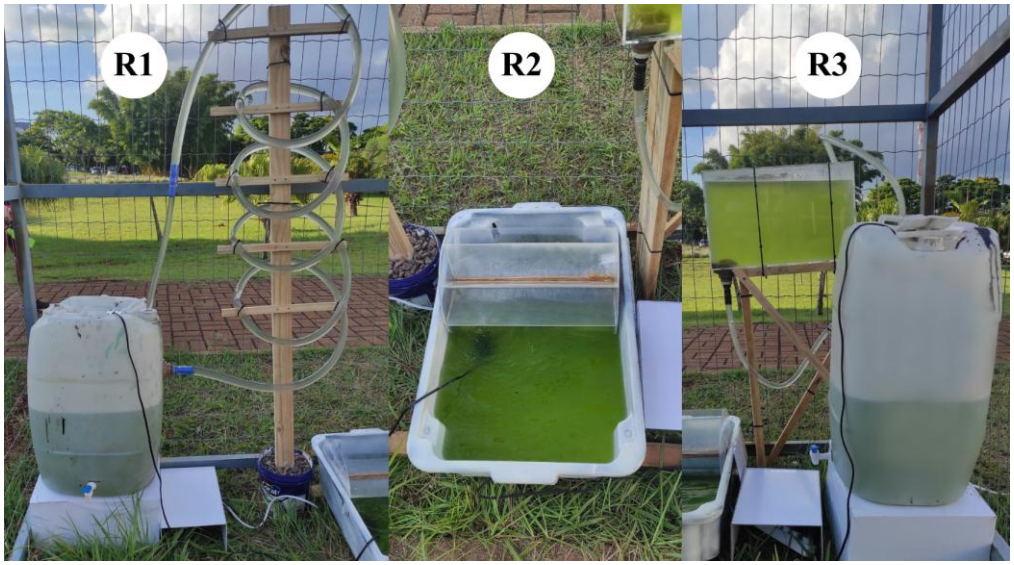


Figura 01: Configuração dos reatores: reator tubular fechado (R1), reator aberto tipo lagoa (R2) e reator fechado de placa plana (R3).
Fonte: Autores (2026)

Tratamento estatístico dos dados

A análise estatística foi realizada de forma independente para cada reator. Inicialmente, foi aplicado o teste de normalidade (Shapiro-Wilk). Em seguida, foram realizadas análises de correlação (Pearson e Spearman) para avaliar a relação entre a densidade celular e as variáveis climáticas. Modelos de regressão linear simples foram ajustados para investigar a dependência da densidade celular em função da precipitação, temperatura e radiação solar. A significância dos modelos foi avaliada por meio da análise de variância (ANOVA da regressão), considerando nível de significância de 5% ($p < 0,05$). O coeficiente de determinação (R^2) foi utilizado para avaliar o poder explicativo dos modelos. Todas as análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software XLSTAT.

Resultados e discussão

De modo geral, observou-se que as variáveis climáticas de precipitação e temperatura exerceram maior influência sobre a densidade de células viáveis nos sistemas fechados (R1 e R3), enquanto o sistema aberto (R2) apresentou menor sensibilidade às condições ambientais avaliadas (Tabela 01).

Variável	Reator	R	R^2	p-valor
Precipitação	R1	0,294	0,087	0,012*
	R2	-0,063	0,004	0,596
	R3	0,340	0,116	0,003*
Radiação solar	R1	0,189	0,036	0,110
	R2	0,140	0,020	0,237
	R3	0,119	0,014	0,318
Temperatura	R1	0,262	0,069	0,025*
	R2	0,132	0,017	0,267
	R3	0,328	0,108	0,005*

Tabela 01: Parâmetros estatísticos da densidade celular para R1, R2 e R3, incluindo coeficiente de correlação (R), coeficiente de determinação (R^2), valor de p para as variáveis analisadas.
Fonte: Autores (2026)

A análise da precipitação evidenciou comportamentos distintos entre os reatores. Nos sistemas fechados, R1 ($R = 0,294$; $p < 0,012$) e R3 ($R = 0,340$; $p < 0,003$), foram observadas correlações positivas e estatisticamente significativas, indicando dependência entre a precipitação e a densidade celular. Esse comportamento pode estar associado ao efeito indireto da precipitação sobre o sistema, especialmente na redução da temperatura do meio, favorecendo condições mais adequadas ao crescimento microalgal. Os reatores fechados apresentam maior capacidade de retenção térmica e resposta às variações ambientais, o que pode intensificar o efeito de fatores externos como a precipitação (Malek *et al*., 2016; Jayaraman e Rhinehart, 2015).

Por outro lado, o R2 apresentou correlação negativa e não significativa (R = -0,063; p = 0,596), indicando ausência de influência relevante da precipitação sobre a densidade celular. Esse comportamento pode ser em decorrência da exposição direta à chuva, que promove diluição do meio e alterações na salinidade, reduzindo a concentração celular e mascarando possíveis efeitos positivos associados a outros fatores ambientais (Lösing, 2011; Roselet *et al*., 2013). Além disso, sistemas abertos são mais suscetíveis à variabilidade ambiental, o que pode resultar em maior dispersão dos dados e menor capacidade de identificação de relações estatísticas consistentes.

Em relação à radiação solar, todos os reatores apresentaram correlação positiva, porém de baixa magnitude e sem significância estatística. Esse resultado sugere que, nas condições experimentais avaliadas, a radiação não foi um fator limitante isolado para o crescimento microalgal. Apesar da influência direta da luz para o crescimento das microalgas, sistemas fechados, como os tubulares e de placa plana, possuem características construtivas que otimizam a distribuição da luz (Malek *et al*., 2016; Yadala e Cremaschi, 2016). Dessa forma, a ausência de significância pode estar associada à atuação conjunta de múltiplos fatores, como temperatura, composição do meio e interações microbianas, que também influenciam o crescimento celular.

A temperatura apresentou influência significativa nos sistemas fechados, especialmente no R3 (R = 0,328; p < 0,005) e no R1 (R = 0,262; p < 0,025), enquanto no sistema aberto (R2) a relação não foi significativa. Esse comportamento reforça a maior sensibilidade dos sistemas fechados às variações térmicas, uma vez que esses reatores permitem maior retenção de calor e controle parcial das condições ambientais (Roselet *et al*., 2013; Sukačová, 2021). Em contrapartida, sistemas abertos apresentam maior dissipação térmica e estão mais sujeitos às flutuações ambientais, reduzindo a influência isolada da temperatura sobre o crescimento microalgal (Lösing, 2011; Lee *et al*., 2014).

Todos esses aspectos devem ser considerados tanto na escolha do modelo de reator quanto na definição da região de implantação. Em áreas de clima temperado, o elevado consumo de eletricidade para controle térmico pode representar o principal impacto ambiental do sistema, tornando as condições climáticas um critério decisivo para sua viabilidade. Nesse contexto, o Brasil se destaca, especialmente nas regiões tropicais próximas à linha do equador, onde a alta incidência solar e a menor necessidade de regulação térmica favorecem a eficiência energética e produtiva dos cultivos (Prado *et al*., 2023).

Portanto, os resultados indicam que a influência das variáveis climáticas sobre o crescimento microalgal é dependente da configuração do reator, sendo mais evidente em sistemas fechados, enquanto sistemas abertos apresentam maior variabilidade e menor previsibilidade em função da exposição direta às condições ambientais.

Considerações finais

As variáveis climáticas influenciaram de forma distinta os sistemas avaliados, com maior impacto da precipitação e da temperatura nos reatores fechados (R1 e R3). O sistema aberto (R2) apresentou menor sensibilidade, possivelmente devido à diluição e maior exposição às variações ambientais. Os resultados indicam que reatores fechados apresentam maior previsibilidade frente às condições climáticas, enquanto sistemas abertos são mais suscetíveis à variabilidade ambiental. Assim, a seleção adequada do sistema de cultivo, associada à escolha estratégica da localidade, é fundamental para otimizar o desempenho produtivo, reduzir impactos ambientais e ampliar a eficiência na recuperação de recursos.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas de estudo.

Referências Bibliográficas

AHMAD, A.; ASHRAF. S. S. Sustainable food feed sources from microalgae: Food security and the circular bioeconomy. **Algal Research**, n. 74, p.103185, 2023.

ALMOMANI, F.A.; ORMECI, B. Monitoring and measurement of microalgae using the first derivative of absorbance and comparison with chlorophyll extraction method. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 90, 2018.

ECHENIQUE-SUBIABRE, I.; GREENE, J. M.; RYAN, A.; MARTINEZ, H.; BALLEZA, M.; GERBER, J.; JEBALI, A.; GETTO, S.; O'KELLY, C.; MANDAL, S.; QUINN, J. C.; STARKENBURG, S. R.; CORCORAN, A. A.; SHURIN, J. B. Site-specific factors override local climatic conditions in determining microalgae productivity in open raceway ponds, **Algal Research**, v. 74, p. 103235, 2023.

EGBO, M.K.; OKOANI, A.O.; OKOH, I.E. Photobioreactors for microalgae cultivation – an overview. **International Journal of Scientific Engineering and Research**, v. 9, n. 11, p. 65-74, 2018.

FU, W.; NELSON, D. R.; MYSTIKOU, A.; DAAKOUR, S.; SALEHI-ASHTIANI, K. Advances in microalgal research and engineering development. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 59, p. 157-164. 2019.

GREEN-GAVRIELIDIS, L. A.; THORNBER, C. S. Will Climate Change Enhance Algal Blooms? The Individual and Interactive Effects of Temperature and Rain on the Macroalgae Ulva. **Estuaries and Coasts**, v. 45, p. 1688–1700, 2022.

JAYARAMAN, S. K.; RHINEHART, R. R. Modeling and optimization of algae growth. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 54, n. 33, p. 8063-8071, 2015.

KHAVARI, F.; SAIDIJAM, M.; TAHERI, M.; NOURI, F. Microalgae: therapeutic potentials and applications. **Molecular Biology Reports**, v. 48, p. 4757-4765. 2021.

LEE, E.; PRUVOST, J.; HE, X.; MUNIPALLI, R.; PILON, L. Design tool and guidelines for outdoor photobioreactors. **Chemical Engineering Science**, v. 106, p. 18-29, 2014.

LÖSING, M. Modelling & simulating microalgae production in an open pond reactor. **System and Control**, 2011.

MALEK, A.; ZULLO, L. C.; DAOUTIDIS, P. Modeling and dynamic optimization of microalgae cultivation in outdoor open ponds. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 55, n. 12, p. 3327-3337, 2016.

NARAYANAN, M. Biorefinery products from algal biomass by advanced biotechnological and hydrothermal liquefaction approaches. **Discover Applied Sciences**, v. 6, n. 146. 2024.

PRADO, L.O.; BOLZANI, H.R.; DE SIMONE SOUZA, H.H.; RUAS, G.; DA SILVA, G.H.R. Microalgal cultivation in open and closed systems under a tropical climate: A life cycle comparison. **Journal of Cleaner Production**, v. 422, p. 138631, 2023.

RAS, M.; STEYER, J. P.; BERNARD, O. Temperature effect on microalgae: a crucial factor for outdoor production. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v.12, n. 2, p. 153-163, 2013.

REYNOLDS, C. S. **The ecology of phytoplankton**. Cambridge University Press, 2006.

ROSELET, F.; MAIZA, P.; MARTINS, T.; ABREU, P. C. Comparison of open-air and semi-enclosed cultivation system for massive microalgae production in sub-tropical and temperate latitudes. **Biomass and bioenergy**, v. 59, p. 418-424, 2013.

SARITAŞ, S.; KALKAN, A. E.; YILMAZ, K.; GURDAL, S.; GÖKSAN, T.; WITKOWSKA, A. M.; LOMBARDO, M.; KARAV, S. Biological and nutritional applications of microalgae. **Nutrients**, v.17, n. 93. 2025.

SIPAÚBA-TAVARES L. H.; ROCHA O. 2003. Produção de plâncton (fitoplâncton e zooplâncton) para alimentação de organismos aquáticos. São Carlos: Rima.

SUKAČOVÁ, K.; LOŠÁK, P.; BRUMMER, V.; MÁŠA, V.; VÍCHA, D.; ZAVŘEL, T. Perspective design of algae photobioreactor for greenhouses - A comparative study. **Energies**, v. 14, n. 5, p. 1338, 2021.

YADALA, S.; CREMASCHI, S. A dynamic optimization model for designing open-channel raceway ponds for batch production of algal biomass. **Processes**, v. 4, n. 2, p. 10, 2016.

DESEMPENHO DO CRESCIMENTO MICROALGAL EM EFLUENTE DE ATERRO SANITÁRIO EM DIFERENTES REATORES

1 Camila Akemy Nabeshima Aquino, 2 Maria Clara Pilatti, 3 Débora Coraça Possa, 4 Gabriela Medeiros, 5 Vanessa Daufenbach, 6 Lucas Cunha Foster, 7 Ralpho Rinaldo dos Reis

1 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: camilaakemy@yahoo.com.br; 2 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: pilattimariaclara@gmail.com; 3 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: deboracpossa@gmail.com; 4 Centro Universitário Univel, e-mail: gabsmedeiros@gmail.com; 5 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: vanessa.daufenbach@gmail.com; 6 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: lucas.cfoster@gmail.com; 7 Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: ralpho.reis@unioeste.br

Palavras-chave: Biorremediação; Economia Circular; Sistemas de cultivo.

Introdução

As microalgas têm se destacado como alternativa promissora e sustentável para a bioeconomia devido à sua elevada eficiência na conversão da luz e $C0^2$ em biomassa e biocompostos, podendo ser aplicadas na produção de biodiesel, alimentos, ração animal, fertilizantes e na reciclagem de nutrientes e tratamento de águas residuais, incluindo efluentes complexos como o lixiviado de aterro sanitário (Nawaz *et al.,* 2020; Penloglou *et al.,* 2024; Razzak *et al.,* 2024).

O cultivo dessas microalgas pode ser realizado em diferentes sistemas, incluindo sistemas abertos e reatores fechados (Egbo *et al.*, 2018). Os sistemas abertos são os mais utilizados em aplicações comerciais de larga escala devido ao baixo custo de construção, à simplicidade operacional e à elevada capacidade de produção, utilizando a luz solar como principal fonte de energia. No entanto, apresentam limitações como maior suscetibilidade à contaminação, perdas por evaporação e alta demanda hídrica (Skifa *et al.*, 2021).

Para superar essas limitações, foram desenvolvidos reatores fechados, que permitem maior controle de variáveis como luz, temperatura, disponibilidade de CO_2 e esterilidade, possibilitando maior padronização das condições ambientais. Embora, sua construção e operação envolvam custos mais elevados, restringindo o seu uso para escala industrial (Penloglou *et al.,* 2024). Entre os diferentes tipos de reatores, destacam-se os tubulares, constituídos por estruturas cilíndricas que apresentam elevada razão área superficial/volume, favorecendo o aproveitamento da luz. Esses sistemas podem ser orientados verticalmente, o que otimiza a captação de luz difusa, ou horizontalmente, aumentando a exposição direta à radiação solar (Kunopagarnwong; Srinophakun, 2022).

Outro modelo amplamente empregado são os reatores de painel plano, que utilizam superfícies transparentes e podem ser iluminados tanto externamente, pela radiação solar ou LEDs, quanto internamente, por fontes artificiais instaladas no próprio painel, reduzindo o autossombreamento e aumentando a produtividade. A agitação interna nesses sistemas costuma ser realizada por aeração, alternativa energeticamente mais eficiente do que bombas mecânicas (Huang *et al.,* 2021).

Dessa forma, a escolha do sistema de cultivo depende dos objetivos do processo e das características do efluente, uma vez que todos os sistemas, sejam abertos, fechados ou híbridos, apresentam vantagens e limitações específicas. Cada configuração oferece benefícios operacionais particulares, como simplicidade construtiva, maior controle ambiental ou maior produtividade, ao mesmo tempo em que impõe desafios próprios, como necessidade de suplementação de CO_2, manejo de luz, riscos de contaminação ou custos de implantação (Masojídek *et al.,* 2023). Nesse sentido, o objetivo desse trabalho é avaliar a influência de diferentes configurações de reatores no cultivo de microalgas em efluente de aterro sanitário, analisando o desempenho do crescimento celular e o potencial do sistema como estratégia de tratamento.

Material e métodos

Preparação e manutenção das cepas

As cepas de *Chlorella* sp. foram obtidas da Coleção de Culturas de Microalgas de Água Doce da Universidade Federal de São Carlos (CCMA-UFSCar) e previamente mantidas em cultivo autotrófico, em meio BG11, a fim de garantir sua viabilidade e padronização fisiológica antes da aplicação experimental. As culturas foram conduzidas em frascos de 500 mL, com 10% de inóculo, sob fotoperíodo de 12 h claro/12 h escuro, temperatura de 25 ± 1 °C e aeração contínua. Após estabilização, foram utilizadas como inóculo nos ensaios em diferentes configurações de reatores.

Ensaio de tratamento de efluente em diferentes tipos de reatores

O experimento foi conduzido na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus Cascavel (24°59’ S; 53°27’ O), no período de 17 de março a 05 de junho de 2025, em ambiente externo, sob condições climáticas naturais. Foram avaliadas três configurações de sistemas de cultivo: reator tubular fechado (R1), reator aberto tipo lagoa (R2) e reator fechado de placa plana (R3) (Figura 1). As cepas de *Chlorella* sp., previamente cultivadas e padronizadas, foram inoculadas nesses sistemas com o objetivo de analisar o desempenho do tratamento do efluente em diferentes arranjos estruturais.

O meio de cultivo foi composto por água de chuva e efluente proveniente de aterro sanitário tratado por osmose reversa. Durante o período experimental, os sistemas foram monitorados quanto ao crescimento celular, a fim de verificar a eficiência do cultivo microalgal no tratamento do efluente em cada modelo de reator. O crescimento celular foi monitorado diariamente por

contagem direta em Câmara de Neubauer. Para a determinação da densidade celular total, todas as células foram contabilizadas, enquanto a densidade de células viáveis foi estimada considerando a morfologia de células íntegras e com coloração característica, e como não viáveis aquelas com alterações em sua estrutura celular. Neste método, cinco quadrados centrais foram utilizados na contagem das células em aumento de 40x, usando microscópio óptico. A média do número de células por mililitro foi calculada conforme a fórmula adaptada de Sipaúba-Tavares e Rocha (2003) e a densidade final é expressa em cm^3 (ml)

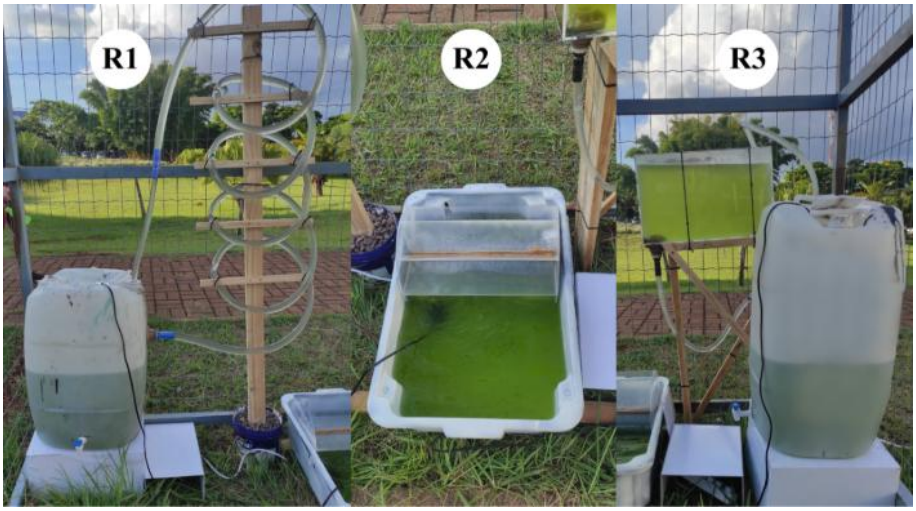


Figura 01: Configuração dos reatores: reator tubular fechado (R1), reator aberto tipo lagoa (R2) e reator fechado de placa plana (R3).
Fonte: Autores (2026)

Tratamento estatístico dos dados

Para avaliação comparativa entre os reatores, os dados foram inicialmente submetidos a teste de normalidade (Shapiro-Wilk). Diante da não normalidade, foram aplicados testes não paramétricos (Kruskal-Wallis) para comparação entre grupos, considerando a mediana como medida de tendência central. Adicionalmente, foi realizada análise de variância (ANOVA) e regressão linear para avaliação da influência da configuração dos reatores sobre a densidade celular. O nível de significância adotado foi de 5% ($p < 0,05$), utilizando o software XLSTAT.

Resultados e discussão

Os resultados demonstraram que o reator aberto (R2) apresentou o melhor desempenho em termos de densidade celular de *Chlorella* sp., superando os sistemas fechados (R1 e R3). A matriz de correlação indicou, para células viáveis, correlação positiva elevada no R2 (R = 0,68), associada às maiores densidades observadas, enquanto o R1 apresentou correlação negativa mais acentuada (R = -0,44) e o R3 correlação negativa intermediária (R = -0,24). Para células totais, o padrão foi semelhante: R2 (R = 0,61), R1 (R = -0,47) e R3 (R = -0,14). Esses resultados evidenciam que a configuração estrutural dos reatores exerceu influência significativa sobre o crescimento microalgal (Tabela 01).

Células	Reator	R	R^2	p-valor	Média	Desvio padrão
Viáveis	R1	-0,44			1527054,795	276459,322
Viáveis	R2	0,68	0,47	< 0,0001	6638013,699	276459,322
Viáveis	R3	-0,24			2454794,521	276459,322
Totais	R1	-0,47			1923630,137	303534,863
Totais	R2	0,61	0,41	< 0,0001	7063356,164	303534,863
Totais	R3	-0,14			3502054,795	303534,863

Tabela 01: Parâmetros estatísticos da densidade celular das células viáveis e totais para R1, R2 e R3, incluindo coeficiente de correlação (R), coeficiente de determinação (R^2), valor de p, média e desvio padrão para o experimento.
Fonte: Autores (2026)

A análise de regressão reforçou essa influência, indicando que 47% da variação nas células viáveis ($R^2 = 0,47$; $p < 0,0001$) e 41% nas células totais ($R^2 = 0,41$; $p < 0,0001$) foram explicadas pelo tipo de reator, confirmando o efeito estrutural sobre a dinâmica de crescimento (Bani *et al*., 2021).

O desempenho superior do sistema aberto pode ser atribuído principalmente à maior disponibilidade e melhor distribuição de luz, favorecida pela menor profundidade e redução do autossombreamento, o que contribui para maiores taxas fotossintéticas e crescimento celular (Metsoviti et al., 2019; Saccardo; Bezzo; Sforza, 2022; Marchese et al., 2025). A configuração estrutural influencia diretamente variáveis como intensidade luminosa, temperatura, disponibilidade de nutrientes, CO_2 e pH, que modulam a fisiologia microalgal (Razzak et al., 2024).

Nos sistemas fechados (R1 e R3), o aumento da biomassa intensifica o sombreamento interno, reduzindo a produtividade volumétrica por unidade de luz incidente. Além disso, limitações na eficiência de mistura podem favorecer a formação de incrustações, diminuindo a transmissão de luz e comprometendo o desempenho operacional, além de elevar custos de manutenção (Egbo et al., 2018; Soriano-Jerez et al., 2024). A limitação de mistura e aeração também promove maiores gradientes de CO_2 e variações de pH nos sistemas fechados, enquanto sistemas abertos favorecem maior homogeneidade na distribuição de carbono e estabilidade do meio. (Zhang et al., 2024).

A comparação entre os três sistemas (Figura 02) confirma a superioridade do R2 em densidade celular, seguido pelo modelo de placa plana (R3) e pelo tubular (R1). Contudo, a definição do sistema mais adequado não deve se basear exclusivamente na produtividade. Sistemas fechados, embora apresentem menor densidade, oferecem maior controle biológico, menor risco de contaminação e menor perda de água por evaporação, além de maior estabilidade térmica (Prado et al., 2023). Em escala ampliada, sistemas abertos apresentam menor custo de construção e operação, além de elevada capacidade produtiva, porém demandam maior área física, enquanto sistemas fechados são mais compactos, embora impliquem maiores custos iniciais e operacionais (Kumar; Singh, 2019).

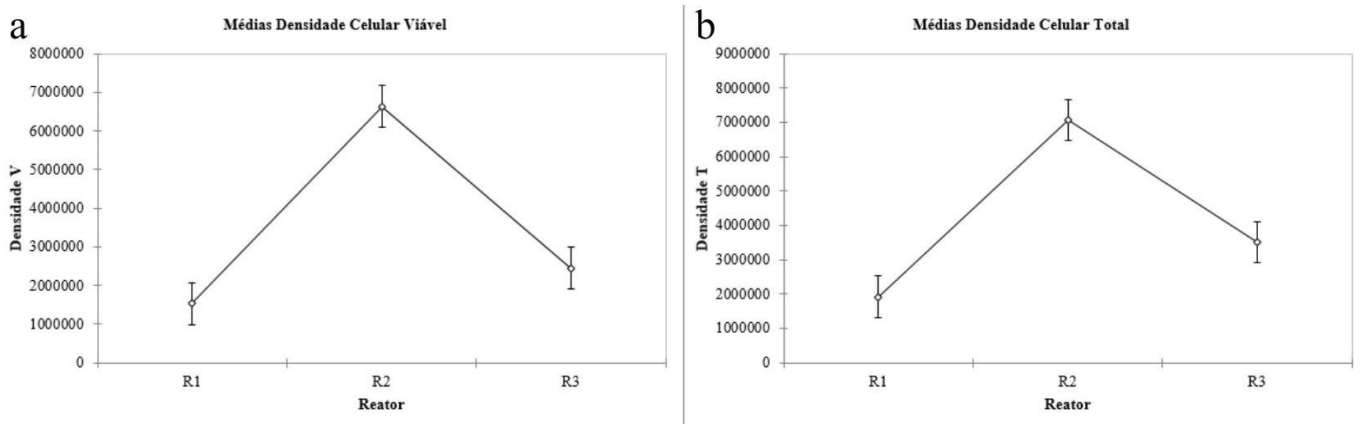


Figura 02: Valores médios e desvios padrão de densidade celular viável (a) e total (b) nos reatores R1, R2 e R3 do experimento.
Fonte: Autores (2026)

Considerações finais

Em síntese, a escolha do sistema de cultivo deve estar alinhada aos objetivos produtivos e às condições operacionais disponíveis. De modo geral, os resultados desta pesquisa confirmam que a configuração do reator exerce influência significativa sobre o crescimento de *Chlorella sp.*, sendo o sistema aberto (R2) o que apresentou maior densidade celular, tornando-o mais vantajoso para produção de biomassa em larga escala, especialmente quando o objetivo é maximizar volume produtivo com menor custo operacional. Por outro lado, embora os sistemas fechados (R1 e R3) tenham demonstrado menor desempenho em termos de densidade celular, oferecem maior controle sobre contaminação, evaporação, temperatura e parâmetros operacionais, características que os tornam mais adequados para a produção de compostos de alto valor agregado ou para o cultivo de cepas sensíveis. Assim, a escolha do reator ideal deve considerar critérios como custo, nível de controle requerido, escala de produção e finalidade do produto, não existindo um sistema universalmente superior, mas sim a alternativa mais apropriada para cada objetivo produtivo.

Agradecimentos

Os Autores agradecem a Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (CAPES) pela concessão das bolsas de estudo.

Referências Bibliográficas

BANI, A. et al. Influence of photobioreactor set-up on the survival of microalgae inoculum. **Bioresource Technology**, v.320, p. 124408, 2021.

EGBO, M.K.; OKOANI, A.O.; OKOH, I.E. Photobioreactors for microalgae cultivation – an overview. **International Journal of Scientific Engineering and Research**, v. 9, n. 11, p. 65-74, 2018.

HUANG, J.; WAN, M.; JIANG, J.; ZHANG, A.; ZHANG, D. Evaluating the effects of geometry and arrangement parameter of flat panel photobioreactor on microalgae biomass production and economic performance in China. **Algal Research**, v. 57, p. 102343, 2021.

KUMAR, D.; SINGH, B. Algal biorefinery: An integrated approach for sustainable biodiesel production. **Biomass and Bioenergy**, v. 131, p. 105398, 2019.

KUNOPAGARNWONG, V.; SRINOPHAKUN, T.R. The development of tubular Photobioreactor for microalgae cultivation. **ASEAN Journal of Chemical Engineering**, v. 22, n. 2, p. 196-205, 2022.

MARCHESE, A.; LIMA, S.; COSENZA, A.; GIAMBALVO, F.; SCARGIALI, F. Effects of Light Quality Adjustment in Microalgal Cultivation: Flashing Light and Wavelength Shifts in Photobioreactor Design. **Processes**, v. 13, p. 1159, 2025.

MASOJÍDEK, J.; LHOTSKÝ, R.; ŠTĚRBOVÁ, K.; ZITTELLI, G.C.; TORZILLO, G. Solar bioreactors used for the industrial production of microalgae. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 107, n. 21, p. 6439-6458, 2023.

METSOVITI, M.N.; PAPAPOLYMEROU, G.; KARAPANAGIOTIDIS, I.T.; KATSOULAS, N. Effect of Light Intensity and Quality on Growth Rate and Composition of C*hlorella vulgaris*. **Plants**, v. 9, p. 31, 2020.

NAWAZ, T. et al. A review of landfill leachate treatment by microalgae. **Processes**, v. 8, n. 4, p. 384, 2020.

PRADO, L.O.; BOLZANI, H.R.; DE SIMONE SOUZA, H.H.; RUAS, G.; DA SILVA, G.H.R. Microalgal cultivation in open and closed systems under a tropical climate: A life cycle comparison. **Journal of Cleaner Production**, v. 422, p. 138631, 2023.

PENLOGLOU, G.; PAVLOU, A.; KIPARISSIDES, C. Recent advancements in photo-bioreactors for microalgae cultivation: a brief overview. **Processes**, v. 12, n. 6, p. 1104, 2024.

RAZZAK, S.A. et al. Microalgae cultivation in photobioreactors: sustainable solutions for a greener future. **Green Chemical Engineering**, v. 5, n. 4, p. 418-439, 2024.

SACCARDO, A.; BEZZO, F.; SFORZA, E. Microalgae growth in ultra-thin steady-state continuous photobioreactors: assessing self-shading effects. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 10, p. 977429, 2022.

SIPAÚBA-TAVARES, L.H.; ROCHA, O. **Produção de plâncton (fitoplâncton e zooplâncton) para alimentação de organismos aquáticos**. São Carlos: Rima, 2003.

SKIFA, I.; CHAUCHAT, N.; COCQUET, P.H.; LE GUER, Y. Microalgae cultivation in raceway ponds: advances, challenges, and hydrodynamic considerations. **EFB Bioeconomy Journal**, v. 5, p. 100073, 2025.

SORIANO-JEREZ, Y., GALLARDO-RODRÍGUEZ, J.J., LÓPEZ-ROSALES, L., GARCÍA-CAMACHO, F., BRESSY, C., MOLINA-GRIMA, E.; CERÓN-GARCÍA, M.C. Preventing biofouling in microalgal photobioreactors. **Bioresource Technology**, v. 407, p. 131125, 2024.

ZHANG, Q., GUAN, Y., ZHANG, Z., DONG, S., YUAN, T., RUAN, Z.; CHEN, M. Sustainable microalgae cultivation: A comprehensive review of open and enclosed systems for biofuel and high value compound production. **E3S Web of Conferences,** v. 577, p. 01008, 2024.

ÍNDICE MULTICRITÉRIO DE RISCO HIDROLÓGICO PARA ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS: INTEGRAÇÃO ENTRE MORFOMETRIA DE BACIAS, EVENTOS EXTREMOS E SENSIBILIDADE AMBIENTAL COM SUPORTE À MODELAGEM HEC-HMS

1 Débora de Jesus Siqueira, 2 Adriana Marques, 3 André Luís Sotero Salustiano Martim
[1]Universidade Estadual de Campinas, e-mail: d231831@dac.unicamp.br; [2]Instituto Federal de São Paulo, e-mail: adriana.marques@ifsp.edu.br; [3]Universidade Estadual de Campinas, e-mail: asmartim@unicamp.br

Palavras-chave: Risco hidrológico; Estação de Tratamento de Esgotos; Modelagem hidrológica

Introdução

A avaliação de risco em infraestruturas de saneamento, especialmente em Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), tem sido tradicionalmente baseada em critérios econômicos e operacionais. Esse tipo de abordagem, embora necessário, frequentemente não contempla de forma integrada a influência de variáveis hidrológicas e ambientais de elevada variabilidade espaço-temporal, como a morfometria de bacias hidrográficas, a ocorrência de eventos extremos de precipitação e a sensibilidade dos corpos receptores. A ausência de um indicador sintético capaz de integrar esses múltiplos fatores reduz a capacidade de planejamento e a resiliência operacional do setor, especialmente em cenários de mudanças climáticas, nos quais se observa a intensificação de eventos extremos de curta duração, conforme discutido por Fowler et al. (2021), conforme destacado por Hutton e Varughese (2016), que enfatizam a necessidade de priorização de investimentos com base em critérios técnicos robustos.

No contexto brasileiro, a caracterização de eventos extremos apresenta elevada heterogeneidade regional, o que demanda abordagens capazes de representar adequadamente essa variabilidade na análise de risco hidrológico, como discutido por ANA (2026). Adicionalmente, a sensibilidade ambiental dos corpos receptores é regulada por instrumentos normativos, como a Resolução CONAMA nº 357/2005, que estabelece classes de qualidade da água e seus respectivos padrões.

Diante desse cenário, o presente estudo propõe um Índice Multicritério de Risco Hidrológico (IRH), concebido para avaliar a vulnerabilidade de ETEs por meio da integração de parâmetros hidrológicos, climáticos e ambientais em uma estrutura matemática única. O índice apresenta caráter adimensional, permitindo comparações entre bacias de diferentes escalas, sendo concebido para aplicação com dados de fácil obtenção. Valores próximos de 1 indicam baixa amplificação do risco hidrológico. A aplicação foi realizada em três bacias representativas de distintos regimes hidroclimáticos: a bacia do rio Coremas (PB), a parte alta da bacia do rio Jundiaí (SP) e a bacia do reservatório de Furnas (MG). O índice foi ainda integrado conceitualmente ao modelo HEC-HMS, possibilitando sua aplicação tanto em cenários simulados quanto em análises prospectivas de risco.

Material e Métodos

A metodologia fundamentou-se no desenvolvimento de um índice estruturado na forma multiplicativa, conforme equação (01) abaixo:

$$IRH = 1 + (FCR \times IPREC \times ICR) \quad (01)$$

Onde: *IRH* é o Índice de Risco Hidrológico; *FCR* representa o fator de concentração de runoff, derivado de parâmetros morfométricos como área, declividade média e densidade de drenagem; *IPREC* é o índice de precipitação extrema, calculado como a razão entre a precipitação máxima diária associada a um período de retorno de 100 anos e a precipitação média anual; e *ICR* corresponde ao índice de classe do corpo receptor, obtido a partir da classificação estabelecida pela Resolução CONAMA nº 357/2005, sendo normalizado pela expressão ICR = (5 – Classe)/4.

Os coeficientes foram definidos com base em relações hidrológicas consolidadas e em parâmetros fisicamente interpretáveis, como morfometria da bacia e intensidade relativa de precipitação, dispensando calibração empírica específica. Para integração com o modelo HEC-HMS, o FCR foi associado diretamente a parâmetros hidrológicos como Curve Number, tempo de concentração e perdas iniciais, permitindo a simulação de hidrogramas de cheia em diferentes cenários. Observou-se relação consistente entre o aumento do pico de vazão e o crescimento do FCR, indicando que o índice representa adequadamente a resposta hidrológica das bacias.

Resultados e Discussão

Os resultados evidenciam diferenciação entre as bacias analisadas não apenas em termos dos valores absolutos do IRH, mas principalmente na estrutura de controle de seus componentes e em suas implicações para o desempenho hidráulico de ETEs sob condições de eventos extremos.

Na bacia de Coremas (PB), caracterizada por baixa declividade e reduzida densidade de drenagem, obteve-se IRH ≈ 1,000, configurando uma condição hidrologicamente neutra. Nesse cenário, a limitada capacidade de geração de escoamento superficial implica menor probabilidade de ocorrência de picos de vazão capazes de provocar sobrecarga hidráulica em sistemas de tratamento, reduzindo o risco de extravasamentos e falhas operacionais associadas a eventos extremos.

Na parte alta da bacia do rio Jundiaí (SP), o índice atingiu IRH ≈ 1,0004, indicando uma condição de baixa amplificação do risco, porém com maior participação dos fatores hidrológicos e climáticos. Esse comportamento reflete maior responsividade hidrológica da bacia aos eventos de precipitação, o que pode resultar em incrementos relevantes nas vazões afluentes às ETEs, elevando a necessidade de estratégias operacionais de controle, como sistemas de amortecimento ou adequação de capacidade hidráulica.

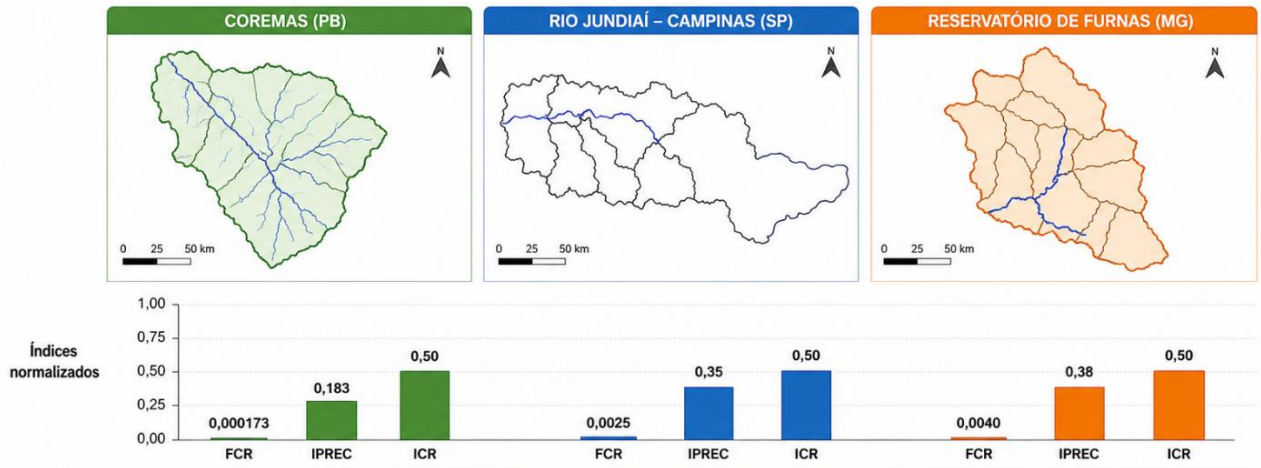
Para a bacia de Furnas (MG), os resultados indicaram IRH ≈ 1,0015, também classificado como condição de baixa amplificação do risco, porém com predominância mais evidente da resposta hidrológica. Nesse contexto, a maior energia do relevo e a disponibilidade hídrica favorecem a intensificação dos processos de escoamento, aumentando a probabilidade de ocorrência de picos de vazão mais elevados, o que pode comprometer a eficiência dos sistemas de tratamento em situações de eventos extremos.

Embora os valores absolutos do índice apresentem variações reduzidas, a análise da decomposição dos fatores revela mudanças estruturais relevantes no controle do risco hidrológico. Na bacia de Coremas, o produto FCR×IPREC apresenta ordem de grandeza de 10^{-5}, indicando baixa contribuição dos processos hidrológicos na amplificação do risco. Na bacia do rio Jundiaí, esse termo atinge aproximadamente 10^{-4}, enquanto em Furnas alcança valores da ordem de 10^{-3}, evidenciando a crescente dominância da resposta hidrológica.

Esse comportamento evidencia uma transição progressiva no regime de controle do risco hidrológico, com implicações diretas para o planejamento e operação de ETEs. Em bacias com baixa capacidade de geração de escoamento, o risco está mais associado à sensibilidade ambiental do corpo receptor, enquanto em bacias mais energéticas o risco passa a ser dominado pela dinâmica hidrológica, aumentando a exposição das infraestruturas a eventos extremos.

A integração com o modelo HEC-HMS amplia significativamente a aplicabilidade do índice, ao permitir sua utilização em cenários simulados de precipitação e vazão. Dessa forma, o IRH deixa de atuar apenas como um indicador diagnóstico baseado em condições observadas e passa a atuar como uma ferramenta prospectiva, capaz de apoiar a avaliação de risco sob diferentes cenários climáticos e de uso do solo. Essa abordagem possibilita, por exemplo, a análise da adequação da localização de ETEs, a verificação da necessidade de medidas de adaptação e o suporte à tomada de decisão em planejamento de longo prazo.

A Figura 01 sintetiza a comparação entre os componentes do índice para as bacias analisadas, evidenciando as diferenças na contribuição relativa de cada fator e a transição no controle do risco hidrológico entre os cenários estudados.



FCR	Fator de Concentração de Runoff	0,000173	0,0025	0,0040
IPREC	Índice de Precipitação Extrema	0,183	0,35	0,38
ICR	Índice de Classe do Rio	0,50 (Classe 3)	0,50 (Classe 3)	0,50 (Classe 3)
IRH	Índice de Risco Hidrológico	1,000	1,0004	1,0015

Figura 01: Comparação dos componentes do Índice de Risco Hidrológico (IRH) e seus fatores FCR, IPREC e ICR para bacias nas áreas de estudo
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Considerações Finais

Os resultados demonstram que o Índice Multicritério de Risco Hidrológico é capaz de integrar, de forma consistente, variáveis morfométricas, climáticas e ambientais em uma métrica única de avaliação de risco. O índice apresentou comportamento consistente com a dinâmica hidrológica das bacias analisadas, sendo sensível tanto às características físicas do terreno quanto à variabilidade climática.

A aplicação em diferentes regimes hidroclimáticos evidenciou sua capacidade de representar gradientes de risco, desde condições hidrologicamente neutras até cenários com maior influência da resposta hidrológica. A integração com o modelo HEC-HMS amplia sua aplicabilidade para análises prospectivas, especialmente em contextos de intensificação de eventos extremos.

Apesar dos avanços conceituais, o índice ainda requer validação empírica com dados observados de falhas operacionais em ETEs, etapa essencial para sua consolidação como ferramenta de apoio à gestão. Nesse contexto, o IRH representa um avanço relevante na integração entre modelagem hidrológica e planejamento de infraestruturas de saneamento. Além disso, sua estrutura simplificada e interpretável favorece sua aplicação como ferramenta de apoio à tomada de decisão em planejamento e gestão de sistemas de saneamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro e institucional.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023: Informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

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.

FOWLER, H. J.; BLENKINSOP, S.; TEBALDI, C. Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. Nature Reviews Earth & Environment, v. 2, n. 2, p. 107–122, 2021. DOI: 10.1038/s43017-020-00128-6.

HUTTON, G.; VARUGHESE, M. The Costs of Meeting the 2030 Sustainable Development Goal Targets on Drinking Water, Sanitation, and Hygiene. Washington, DC: World Bank, 2016. Disponível em: https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/cfbfaf80-3930-5ffd-a5bf-6ded12a1340e.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual. Version 4.3. Davis, CA: Hydrologic Engineering Center, 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Atlas Pluviométrico do Brasil. Brasília: ANA, 2013. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home.

PARTIDA DE UM REATOR FBBR UTILIZANDO SABUGO DE MILHO PARA PÓS-TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO

1 Elaine Macedo Sakuno, 2 Millena C. dos S. Correa, 3 Ana Cláudia Barana

1 Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), e-mail: e.elaine.macedo@gmail.com; 2 Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), e-mail: 23350925@uepg.br; 3 Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), e-mail: acbarana@uepg.br

Palavras-chave: Leito Fixo; Compostos Nitrogenados; Fonte de Carbono

Introdução

As estações de tratamento de esgotos (ETE) do Paraná utilizam, predominantemente Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente (RALF) como etapa principal do processo, obtendo alta eficiência na remoção de matéria orgânica, porém eficiência nula na remoção de nutrientes, como nitrogênio (Barana *et al.,* 2013). Os impactos ambientais associados à presença de nitrogênio em efluentes lançados em corpos hídricos incluem a promoção da eutrofização, a toxicidade aos organismos aquáticos e a depleção de oxigênio dissolvido nos corpos receptores (Alves *et a*l., 2021; Silva *et al.*, 2024). Dessa forma, a remoção de compostos nitrogenados dos efluentes é de grande importância não apenas do ponto de vista ambiental, mas também sob a perspectiva da saúde pública. Para o tratamento desses efluentes a utilização de suportes surge como alternativa. O suporte fornece uma ampla área superficial possibilitando a fixação e o desenvolvimento de biofilme (Massoompour *et al.*, 2020; Wu *et al.,* 2022; Maurya *et al.,* 2023). Isso permite que os reatores operem com uma densidade de biomassa superior a dos sistemas de lodo ativado convencionais (Shi *et al.,* 2023; Visnevschi e Povar, 2025). Além disso, os suportes garantem que a biomassa não seja lavada (*washout*) do sistema, mantendo um tempo de retenção de lodo elevado, o que é essencial para o crescimento de bactérias nitrificantes de reprodução lenta (Liu *et al.,* 2018; Kawan *et al.,* 2022; Wu *et al.,* 2022; Shi *et al.,* 2023). A estrutura do biofilme nos suportes também cria gradientes de concentração de oxigênio dissolvido, favorecendo assim a Nitrificação e Desnitrificação Simultâneas (NDS). O oxigênio penetra apenas nas camadas externas do biofilme (zona aeróbia), onde ocorre a nitrificação, enquanto as camadas internas permanecem em condições anóxicas ou anaeróbias, permitindo que a desnitrificação ocorra simultaneamente no mesmo reator. Isso reduz a necessidade de tanques separados e economiza energia com aeração (Liu *et al.,* 2022b; Wu *et al.,* 2022; Shi *et al.,* 2023; De Marque *et al.,* 2025; Zhao *et al.,* 2025). Alguns tipos de suportes específicos vêm sendo estudados como fontes alternativas ao uso de suportes de sintéticos, como os polímeros biodegradáveis e os resíduos agrícolas (sabugo de milho, fibra de coco, palha), onde eles podem atuar simultaneamente como suporte físico e como fonte interna de carbono de liberação lenta (Han *et al.,* 2018; Liu *et al.,* 2022; Yu *et al.,* 2022; Hong *et al.,* 2023; Loh *et al.,* 2024; Liu *et al.,* 2025). O que se torna uma alternativa para o tratamento de efluentes com baixa relação C/N, onde a baixa presença de carbono orgânico normalmente limita a desnitrificação O trabalho teve como objetivo avaliar a partida de um Reator de Biofilme de Leito Fixo (FBBR) em escala de bancada, para tratar efluente do RALF utilizando sabugo de milho como suporte para fixação dos microrganismos e como fonte de carbono para a desnitrificação. A partida do reator foi feita sem adição de inóculo, utilizando apenas efluente do RALF. O reator foi monitorado por 5 semanas, com análises de parâmetros operacionais e físico-químicos, como pH, nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato e DQO. A eficiência média de remoção de nitrogênio amoniacal foi de 84% após o período de incubação. Os parâmetros monitorados apresentaram pequena variação nas duas últimas semanas de monitoramento, indicando estabilidade do sistema.

Materiais e Métodos

O estudo foi desenvolvido na Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG/Ponta Grossa-Pr), no Laboratório de Estudos em Meio Ambiente (LEMA) do Centro de Tecnologia Agroalimentar (CTA) do Departamento de Engenharia de Alimentos.

Foi utilizado um reator de acrílico, com formato cilíndrico, altura de 22 cm, diâmetro externo de 7,2 cm, diâmetro interno de 6 cm e volume total de 700 mL. Como suporte para fixação dos microrganismos foram utilizados pedaços de sabugo de milho, altura de 1,5 cm e diâmetro de 3,5 cm. O reator foi preenchido com 50% do volume, resultando em um volume útil de 350 mL.

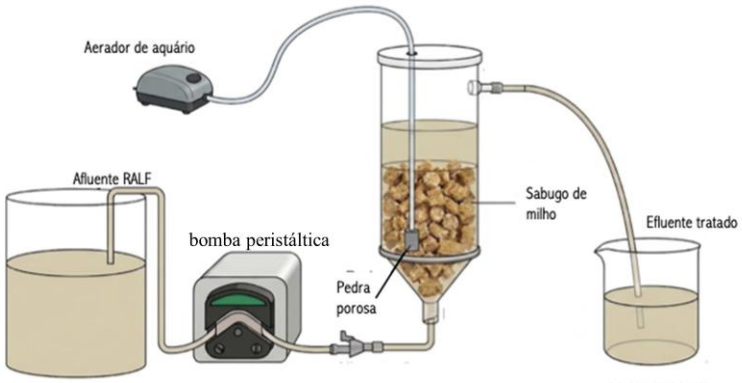


Figura 01: Configuração do sistema.
Fonte: Os Autores (2026)

O reator foi auto inoculado com o efluente do Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado (RALF) coletado em uma Estação de Tratamento de Esgotos do estado do Paraná, utilizado como substrato para alimentação do sistema. O reator foi operado com aeração contínua por 2 semanas no processo de inoculação e com aeração intermitente de 30 min ligados e 150 min desligados no processo de NDS. A aeração do sistema foi feita por meio de aerador de aquário com pedra porosa conectada na extremidade da mangueira de saída do ar e temporizador para acionamento do mesmo. O reator foi operado com fluxo ascendente e a alimentação do sistema foi feita com o uso de bomba peristáltica (Marca Ismatec, modelo Ecoline ISM1089C) e temporizador. Para acompanhamento do processo foram realizadas análises de determinação de nitrogênio amoniacal ($N\text{-}NH_4^{+)}$, nitrito ($N\text{-}NO_2^-$) nitrato ($N\text{-}NO_3^-$), pH e demanda química de oxigênio (DQO) de acordo com APHA (2005).

Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta a caracterização do substrato utilizado. Verifica-se que ele possui baixa concentração de DQO, como já era esperado, uma vez que já passou pelo tratamento no RALF, porém ainda possui concentração de nitrogênio amoniacal ($N\text{-}NH_4^{+)}$ suficiente para ser estudada.

Tabela 1 - Caracterização do efluente RALF

Parâmetro	RALF
pH	7,30
$N\text{-}NH_4^+$ ($mg.L^{-1}$)	57,40
$N\text{-}NO_2^-$ ($mg.L^{-1}$)	ND
$N\text{-}NO_3^-$ ($mg.L^{-1}$)	4,76
DQO ($mg.L^{-1}$)	73,00

Legenda: $N\text{-}NH_4^+$: Nitrogênio Amoniacal, $N\text{-}NO_2^-$: Nitrito, $N\text{-}NO_3^-$: Nitrato, DQO: Demanda Química de Oxigênio, ND: Não Detectado

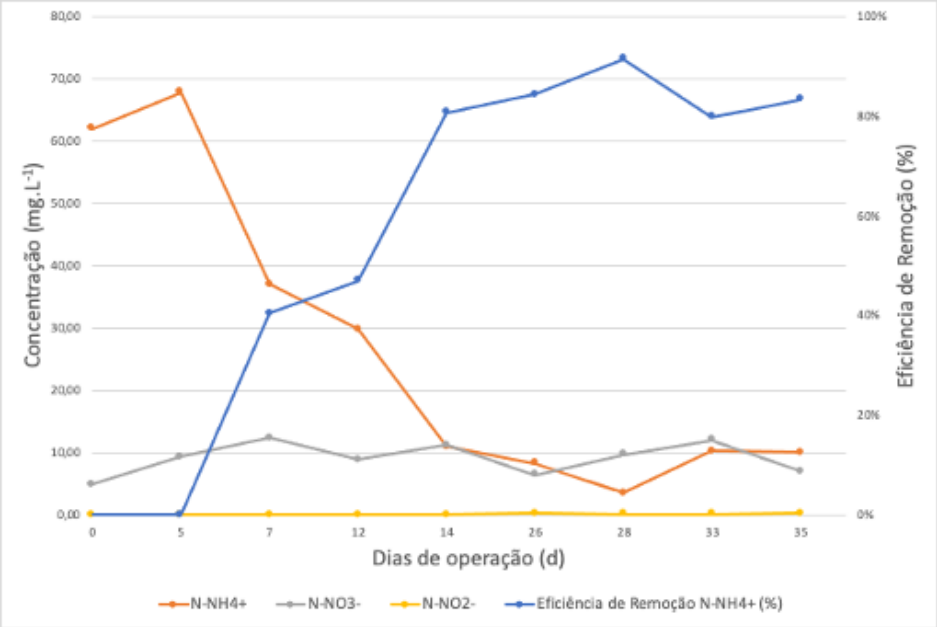


Figura 02: Teores de $N\text{-}NH_4^+$, $N\text{-}NO_2^-$ e $N\text{-}NO_3^-$ e eficiência de remoção de $N\text{-}NH_4^+$ do efluente do reator durante o período estudado.
Fonte: Os Autores (2026)

A Figura 02 apresenta as concentrações de nitrogênio amoniacal ($N\text{-}NH_4^+$), nitrito ($N\text{-}NO_2^-$) nitrato ($N\text{-}NO_3^-$) nas 5 semanas de acompanhamento do funcionamento do reator. Observa-se que, passados 05 dias de operação, há queda constante na concentração de $N\text{-}NH_4^+$. Concentração esta que chega no seu ponto mínimo a partir do 26º dia, demonstrando que os microrganismos se adaptaram rapidamente às novas condições. O efluente do reator teve pH médio de 7,78 (Figura 03), estes resultados mostraram que o sistema atingiu um perfil mais estável após o período de incubação. Observa-se já a partir do 14º dia eficiências de remoção de $N\text{-}NH_4^+$ sempre superiores a 85% (Fig. 02), confirmando a rápida adaptação dos microrganismos e estabilidade do reator. Em contrapartida, observou-se aumento nas concentrações de DQO (Figura 03), o que pode indicar a liberação de compostos orgânicos solúveis decorrentes da atividade de bactérias responsáveis pela degradação de macromoléculas complexas (celulose, hemicelulose e lignina). Esse processo gera compostos orgânicos mais simples, que podem ser utilizados como fonte de carbono pelos microrganismos desnitrificantes (Liu *et al.,* 2022a; Liu *et al.,* 2025; Gu *et al.,* 2026), o que pode ser observado com a baixa concentração de $N\text{-}NO_3^-$ no efluente tratado (Figura 02).

A Figura 04 mostra a tendência de crescimento de biofilmes bacterianos no suporte de sabugo de milho ao longo do tempo. O processo de colonização microbiana observado neste estudo apresentou comportamento semelhante ao descrito por Yu *et al.* (2022), onde no estágio inicial verificou-se colonização gradual do suporte, com baixo acúmulo de biomassa (Figura 4b). Já no decorrer do processo, observou-se aumento expressivo da formação de biofilme, evidenciado visualmente pela maior cobertura superficial do material suporte (Figura 4c e 4d).

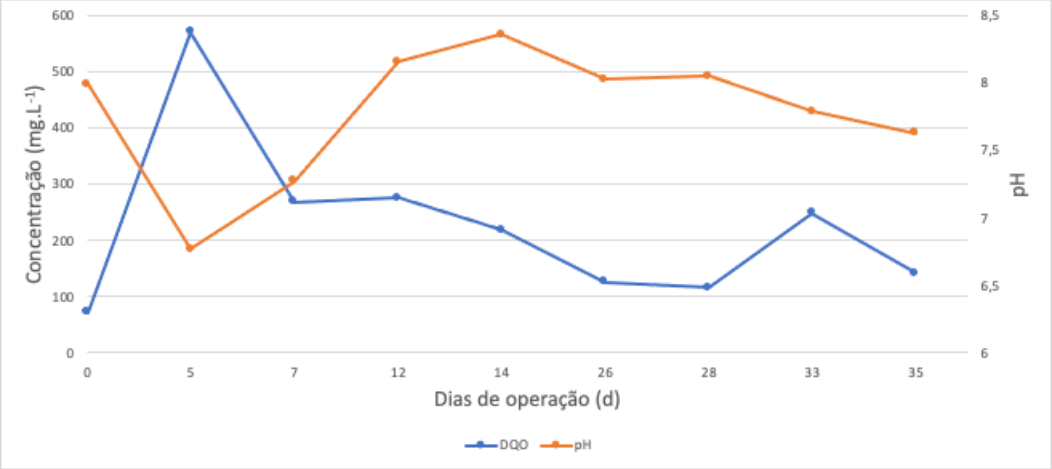


Figura 03: Demanda Química de Oxigênio (DQO) e pH durante a partida do reator.
Fonte: Os Autores (2026)

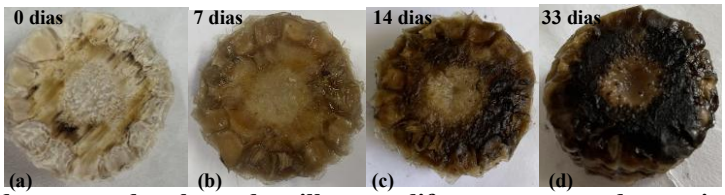


Figura 04: Foto do suporte de sabugo de milho com diferentes tempos de crescimento de biofilme
Fonte: Os Autores (2026)

Considerações Finais

A partir dos resultados obtidos, a partida do reator utilizando apenas o efluente do RALF como inóculo, se mostrou viável. Além disso, o sabugo de milho se torna uma opção promissora para ser estudada, não só como suporte para microrganismos, mas também como fonte de carbono para remoção de compostos nitrogenados em efluentes domésticos.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ALVES, R. N., MARIZ JR, C. F., DE MELO ALVES, M. K., CAVALCANTI, M. G. N., DE MELO, T. J. B., DE ARRUDA-SANTOS, R. H., CARVALHO, P. S. Contamination and toxicity of surface waters along rural and urban regions of the Capibaribe River in tropical northeastern Brazil. **Environmental toxicology and chemistry**, v. 40, n. 11, p. 3063-3077, 2021.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21 ed. Washington: 2005.

BARANA, A. C., LOPES, D. D., MARTINS, T. H., POZZI, E., DAMIANOVIC, M. H. R. Z., DEL NERY, V., FORESTI, E. Nitrogen and organic matter removal in an intermittently aerated fixed-bed reactor for post-treatment of anaerobic effluent from a slaughterhouse wastewater treatment plant. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 1, n. 3, p. 453-459, 2013.

DE MARQUE, M.B., SILVA, B.G., FORESTI, E. Ammonia diffusivity in biofilm reactors: impact of polyurethane foam thickness and pore clogging on simultaneous nitrification and denitrification. **Bioprocess Biosyst Eng** v. 48, p. 1909–1918, 2025.

GU, X. Y., CUI, Y. W., SUI, Y., LI, J. Y., SU, M. X., LU, Z. Y., YANG, R. C. Enhancement role of corncob slow-release carbon source on heterotrophic nitrification and aerobic denitrification process in low C/N wastewater treatment. **Journal of**

Environmental Management, v. 398, p. 128511, 2026.

HAN, F., YE, W., WEI, D., XU, W., DU, B., WEI, Q. Simultaneous nitrification-denitrification and membrane fouling alleviation in a submerged biofilm membrane bioreactor with coupling of sponge and biodegradable PBS carrier. **Bioresource technology**, v. 270, p. 156-165, 2018.

HONG, X., TANG, L., FENG, H., ZHANG, X., HU, X. Agriculture Waste as Slow Carbon Releasing Source of Mixotrophic Denitrification Process for Treating Low C/N Wastewater. **Separations,** v. 9, n. 10, p. 323, 2022.

KAWAN, J. A., SUJA', F., PRAMANIK, S. K., YUSOF, A., ABDUL RAHMAN, R., ABU HASAN, H. Effect of Hydraulic Retention Time on the Performance of a Compact Moving Bed Biofilm Reactor for Effluent Polishing of Treated Sewage. **Water**, v. 14, n. 1, p. 81, 2022.

LIU, T., JIA, G., QUAN, X. Accelerated start-up and microbial community structures of simultaneous nitrification and denitrification using novel suspended carriers. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology,** v. 93, n. 2, p. 577-584, 2018.

LIU, J., FU, X., YUAN, R., CHEN, Z., ZHOU, B., CHEN, H. Carbon sources derived from corncobs enhanced nitrogen removal in SBBR treating low C/N domestic sewage. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 166, p. 628-637, 2022a.

LIU, T., LI, Q., WU, N., QUAN, X. Enhancing the formation of simultaneous nitrification and denitrification (SND) biofilm and nitrogen removal performance using two-units IFFAS process filled with surface-modified carriers. **Biochemical Engineering Journal**, v. 179, p. 108316, 2022b.

LIU, H., YANG, C., QIN, S., ZHANG, Q. Metagenomic insights into carbon–nitrogen metabolism of heterotrophic nitrification–aerobic denitrification bacteria utilizing different biodegradable polymers. **Environmental Research**, p. 122864, 2025

LOH, Z. Z., ZAIDI, N. S., YONG, E. L., Bahrodin, M. B., Aris, A. Simultaneous nitrification and denitrification of real domestic wastewater using novel biodegradable Cocos Nucifera fibre as biofilter media and carbon source: Performances and microbial community composition. **Journal of Water Process Engineering**, v. 57, p. 104592, 2024.

MASSOOMPOUR, A. R., BORGHEI, S. M., RAIE, M. Enhancement of biological nitrogen removal performance using novel carriers based on the recycling of waste materials. **Water research**, v. 170, p. 115340, 2020.

MAURYA, A., KUMAR, R., RAJ, A. Biofilm-based technology for industrial wastewater treatment: current technology, applications and future perspectives. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 39, n. 5, p. 112, 2023.

SHI, W., TIAN, Z., WANG, Y., YU, B., TIAN, Y., YANG, M. Effects of biocarrier type and size on the performance of nitrification and simultaneous nitrification and denitrification. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 3, p. 110000, 2023.

SILVA, F. H. R., ANDRADE, E. J. A., LIBÂNIO, M., OLIVEIRA, V. E. S. Evaluating total nitrogen and phosphorous concentrations in a watershed impacted by diverse anthropic activities in a developing country. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 196, n. 2, 195, 2024.

VISNEVSCHI, A., POVAR, I. New biological treatment method of domestic wastewater with simultaneous nitrification and denitrification based on detached biofilm. **Applied Water Science**, v. 15, n. 4, p. 69, 2025.

WU, T., DING, J., YANG, S. S., ZHONG, L., LIU, B. F., XIE, G. J., REN, N. Q. A novel cross-flow honeycomb bionic carrier promotes simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in IFAS system: Performance, mechanism and keystone species. **Water research**, v. 225, p. 119132, 2022.

YU, N., ZHANG, D., LEI, Y., WANG, J., DONG, Y., CHEN, Y. Innovative Coating–Etching Method of Biocarrier Fabrication for Treating Wastewater with a Low C/N Ratio. **Polymers**, v. 14, n. 15, p. 3010, 2022.

ZHAO, J., ZHANG, J., YU, H., YANG, W., ZHAO, J., LEI, S., YANG, J. Short-cut nitrogen removal from high-strength ammonia wastewater in a sequencing batch biofilm reactor: roles of NO and its production mechanism. **Frontiers in Microbiology**, v. 16, p. 1653308, 2025.

AVALIAÇÃO DO TEMPO DE DETENÇÃO HIDRÁULICA DE *WETLANDS* CONSTRUÍDOS EM ESCALA REDUZIDA

1 Beatriz Oliveira Silva, 2 Andressa Caroline Ferreira de Oliveira, 3 Caique Morelo Passoni, 4 Karen Midori Takahashi, 5 Paula Loureiro Paulo

1 Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, e-mail: beatriz.oliveira08198@gmail.com; 2 Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, e-mail: dressacfo@gmail.com; 3 Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, e-mail: caique.morelo@ufms.br; 4 Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, e-mail: karen.takahashi@ufms.br; 5 Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, e-mail: paula.paulo@ufms.br

Palavras-chave: Água Cinza, *Wetlands* de Tratamento, Traçadores Colorimétricos, Hidrodinâmica.

Introdução

O aumento da demanda por ecotecnologias para tratamento de efluentes domésticos tem favorecido o uso de *wetlands* construídos (CW), que se consolidam como importantes Soluções baseadas na Natureza (SbN) reconhecidos pela eficiência e baixo custo (KADLEC; WALLACE, 2009). Nessa perspectiva, o grupo Saneamento Focado em Resursos (SanFRec) da UFMS utilizando a proposta dos CWs e do Tanque de Evapotranspiração, projetou o sistema Evapotranspiração e Tratamento de Água Cinza (EvaTAC). A proposta visa o reuso do esgoto em escala domiciliar, focando na água cinza (AC) composta pelos efluentes de chuveiros, lavatórios e lavanderias, com exclusão da bacia sanitária (ERIKSSON et al., 2002). A escolha pela AC justifica-se por representar o maior volume de efluente gerado em uma residência, entre 60% a 80% do total (LEAL et al., 2011), e por apresentar menor potencial de contaminação por microrganismos patogênicos e carga orgânica em comparação ao esgoto convencional (ARDEN; MA, 2018). O sistema é composto por uma Câmara de Evapotranspiração e Tratamento (CEvaT) em série com um CW de fluxo horizontal subsuperficial (CW-FHSS) (MAGALHÃES FILHO; PAULO, 2021).

As CEvaTs podem atuar de forma independente, baseadas na interação entre solo e plantas, sendo preenchidas com camadas de diferentes substratos. O efluente entra no sistema pela CEvaT através da Câmara de Digestão Anaeróbia (C-dig), percolando de forma ascendente através das camadas de substrato até chegar à camada de solo, de onde resultam forças capilares, vento e calor, além da absorção de água pelas raízes das plantas, combinadas para a perda parcial de água por meio da evapotranspiração.

A avaliação da hidrodinâmica em sistemas de tratamento é fundamental para compreender o comportamento do fluxo e garantir que o tempo de contato entre o efluente e o meio filtrante seja suficiente para os processos de remoção de poluentes. Para isso, o uso de traçadores permite identificar falhas hidráulicas, como zonas mortas ou curtos-circuitos, que comprometem a eficiência do sistema (RAMOS et al., 2022). O uso de corantes alimentícios como traçadores justifica-se por ser uma metodologia de baixo custo e fácil aplicação visual, apresentando a vantagem de serem substâncias biodegradáveis e de baixa toxicidade, o que garante a preservação da microbiota e das espécies vegetais utilizadas no tratamento.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a hidrodinâmica de diferentes unidades de CEvaTs em escala reduzida, por meio da aplicação de corantes azuis (INS 132 e INS 133) como traçador, visando determinar o tempo de detenção hidráulica real (TDH) e identificar possíveis escoamentos preferenciais.

Material e Métodos

Caracterização dos sistemas

Foram avaliadas seis unidades da (CEvaT), duas unidades com geometria quadrada (CQ2 e CQ4) de dimensões de 0,5 m x 0,5 m x 0,5 m (largura x comprimento x altura), totalizando uma área superficial de 0,25 m². Preenchidas com pedrisco (brita n° 0) apresentando uma altura de substrato de 0,32 m (porosidade (k)= 0,44; d10= 13 mm; d60 = 10 mm e Uc = 1,6). As demais quatro unidades possuíam geometria retangular, com dimensões de 1,0 m × 0,25 m (área superficial de 0,25 m²), das quais duas foram preenchidas com brita nº 0 (CR2 e CR4), apresentando altura de substrato de 0,16 m e camada de solo de 0,06 m, e duas com argila expandida (CR1 e CR3), todas construídas em fibra de vidro. Em todas as unidades, o substrato foi recoberto com manta geotêxtil e camada de solo, sendo de 0,15 m para as unidades quadradas e 0,06 m para as unidades retangulares, sendo que cada unidade foi plantada com *Polygonum acuminatum e Ludwigia lagunae,* conforme descrito por Takahashi (2022).



Figura 1 – Câmara de Evapotranspiração e Tratamento (CEvaT).
Fonte: Próprio autor (2024).

Ensaio hidrodinâmicos

A água cinza (AC) utilizada nos ensaios foi gerada em um banheiro experimental (BanhEx) localizado na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia (FAENG) na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) unidade Campo Grande/MS. Neste estudo, a AC foi composta pelos efluentes provenientes do chuveiro e da máquina de lavar roupa, gerados e aplicados de forma alternada ao longo dos dias da semana. O sistema simulou a produção de residência de até três pessoas, com uma vazão total de 72 L/dia Em cada unidade, foram aplicados 12 L de solução contendo corante azul (INS 132 e INS 133) na concentração de 0,92 mg/L diluídos em AC, em pulso único e contínuo, com auxílio de bomba peristáltica Watson Marlow 505S. A alimentação ocorreu diariamente por sete dias consecutivos. A dinâmica de amostragem foi realizada de forma fracionada ao longo do dia, em seis tempos de coletas (T0, T1,T2,T3,T4,T5), sendo cada amostra coletada a cada 2 litros de efluentes produzido por unidade. Ressalta-se que no dia 0 (zero) não foram realizadas coletas devido a um erro de amostragem durante o procedimento inicial. As coletas diárias para análise espectrofotométrica da cor a 630 nm e convertida em concentração normalizada (C/C_0) com base em curva de calibração prévia, com a proposta de determinar o tempo de detenção hidráulica (TDH) em cada unidade de CEvaT.

O comportamento hidráulico das CEvaTs foi avaliado por ensaio com traçador, conforme metodologia proposta por Kadlec e Wallace (2009), calculados pela Equação 1:

$$E(\theta) = \frac{C(\theta)}{\int_0^{\infty} C(\theta) d\theta} \qquad (1)$$

Em que: E(θ) é função de distribuição do tempo de residência, C(θ) é a concentração normalizada do traçador no tempo t, e θ é tempo adimensional (θ=t/tn).

A partir da função E(θ), foram determinados os parâmetros hidráulicos: eficiência volumétrica (eV) expressa pela razão entre o tempo médio real e o tempo nominal (tm/tn); eficiência hidráulica (λ) proposta por Persson et al. (1999) e adotada por Kadlec e Wallace (2009), que quantifica o desvio em relação ao fluxo pistão ideal, combinando uniformidade e dispersão; razão entre o tempo de pico e o tempo nominal (Tp/Tn) indicativo de curto-circuito ou fluxos preferenciais; e o índice de momento [Mpre=Σ(1−θ).C′(θ)], relacionado à assimetria da curva de saída e à dispersão longitudinal.

Testes estatísticos

Para a análise dos dados, os resultados obtidos foram agrupados de acordo com a semelhança das unidades experimentais. Foi realizada a média aritmética dos resultados entre as unidades de geometria e substratos idênticos (CQ2 com CQ4; CR1 com CR3; e CR2 com CR4), visando garantir a representatividade dos parâmetros hidrodinâmicos avaliados para cada configuração de CEvaT.

Resultados e Discussão

Os parâmetros hidráulicos calculados resultados dos ensaios hidrodinâmicos performados estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros hidráulicos e porcentagem de massa recuperada.

	eV	λ	Tp/Tn	% massa recuperada
CQ brita nº 0	0,44	0,33	0,61	13,82
CR argila expandida	0,52	0,42	0,45	14,00
CR brita nº 0	0,58	0,51	0,64	13,72

As curvas de distribuição obtidas no ensaio de traçador revelam diferenças significativas no comportamento hidráulico entre as unidades CEvaT de geometrias quadradas e retangulares, bem como entre os diferentes substratos avaliados, conforme demonstrado na Figura 2, onde o eixo y das curvas de distribuição representa E(θ), que é a concentração adimensional do traçador normalizada em função do tempo θ (eixo x). É possível observar que houve aumento inicial das concentrações normalizadas após o primeiro dia de teste para as CRs e após o segundo dia de teste para as CQs, seguido de redução a partir do segundo dia para as CRs e após o terceiro dia para as CQs, indicando dispersão e retenção do traçador no meio filtrante. As unidades quadradas apresentaram tempo de detenção hidráulica (TDH) de aproximadamente 4 dias, enquanto as retangulares apresentaram cerca de 3 dias, sugerindo maior uniformidade do escoamento nas unidades quadradas.

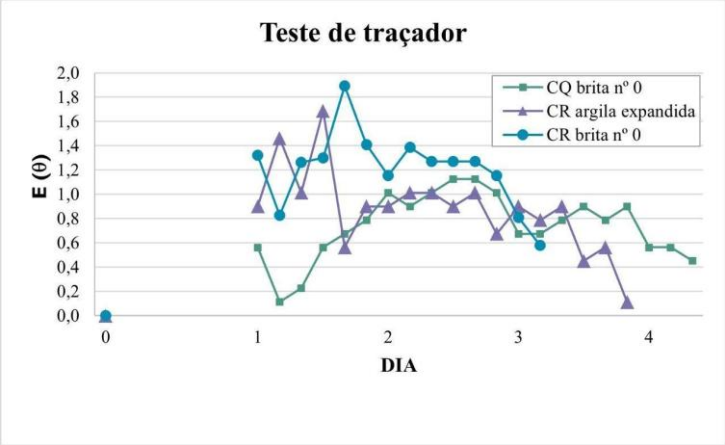


Figura 2 - Curvas de distribuição do traçador.

A análise dos parâmetros hidrodinâmicos (Tabela 1) confirma esse comportamento. Todas as unidades apresentaram (eV) inferior a 1, o que, de acordo com a teoria de reatores de Levenspiel (1999), evidencia a ocorrência de curto-circuitos hidráulicos. Esse resultado indica que parte do fluxo encontrou trajetórias preferenciais mais rápidas, não utilizando integralmente o volume útil da unidade. Os valores de λ (0,33 a 0,51) indicaram padrão de escoamento mais próximo da mistura completa do que do fluxo pistão, apontam para um padrão de escoamento mais próximo ao fluxo misturado do que ao pistão ideal, reforçando a interpretação de que houve intensa dispersão do corante dentro do sistema.

A variação da λ foi influenciada pela geometria do sistema. A geometria quadrada apresentou menor valor da λ (0,33) em função do menor volume da Cdig, que favoreceu caminhos preferenciais de fluxo e maior dispersão do corante ao longo do sistema. Já a geometria retangular apresentou valores mais elevados de λ em razão do maior volume da câmera. Além disso, o tipo de substrato influencia diretamente o desempenho do sistema: a argila expandida, por ser mais porosa, permite maior penetração e movimentação do corante, o que se reflete em um valor intermediário de λ (0,42). Em contraste, a brita nº 0, menos porosa, restringe essa movimentação, resultando em um λ mais elevado (0,51). Portanto, tanto o formato quanto a natureza do substrato impactam significativamente a eficiência da triagem e a recuperação de massa nos sistemas analisados.

Outro parâmetro relevante foi a razão Tp/Tn, que apresentou valores inferiores a 1 em todas as configurações avaliadas, indicando que o pico de concentração do traçador ocorreu antes do tempo de residência nominal (Tn), definido como a razão entre o volume útil da unidade e a vazão aplicada. De acordo com Persson et al. (1999), valores de Tp/Tn próximos de 1 representam escoamento ideal, enquanto valores inferiores a 1 sugerem a ocorrência de fluxos preferenciais. Os resultados obtidos confirmam esse comportamento, evidenciando a presença de caminhos preferenciais de escoamento, conforme também observado por (Paoli & Von Sperling, 2013). Entre as unidades analisadas, as CRs com brita nº 0 apresentou Tp/Tn de 0,64 e eficiência volumétrica (eV) de 0,58, indicando melhor aproveitamento do volume hidráulico e maior retenção do traçador. Por outro lado, as unidades CRs com argila expandida apresentou Tp/Tn de 0,45, evidenciando maior antecipação do pico de concentração e, consequentemente, maior influência de escoamento preferencial.

A recuperação do corante foi baixa em todas as unidades, em torno de 14%, possivelmente em decorrência da adsorção no substrato e da ausência de coleta no dia 0, o que pode ter ocasionado perda de informações sobre a saída inicial do traçador. De modo geral, os sistemas CEvaT apresentaram comportamento hidrodinâmico próximo à mistura completa, com evidências de curto-circuitos e fluxos preferenciais. Ainda assim, o uso de corante alimentício mostrou-se uma alternativa viável, de baixo custo e fácil aplicação para avaliação preliminar da hidrodinâmica desses sistemas.

Considerações Finais

Este estudo demonstrou que a geometria e o substrato das (CEvaTs) exercem uma influência direta no (TDH), com as unidades quadradas alcançando um TDH de 4 dias, e as unidades retangulares alcançaram um TDH de 3 dias.

Além da profundidade do substrato, o dimensionamento da CDig e o volume útil de 0,19 L para as unidades quadradas e 0,35 L para as retangulares — mostraram-se fatores relevantes no desempenho. O posicionamento das perfurações laterais da CDig a 3,5 cm de altura também foi determinante para permitir a decantação do lodo. As unidades quadradas com 32 cm de profundidade demonstraram um melhor desempenho hidrodinâmico, com maior retenção e uniformidade de fluxo. O teste com

corante traçador, apesar da baixa recuperação, confirmou um padrão de escoamento similar ao de mistura completa, com a presença de curtos-circuitos e fluxos preferenciais, refletida em valores de (eV) inferiores a 1,0.

O método simplificado com corante alimentício se provou uma ferramenta de baixo custo, fácil aplicação e com potencial para a avaliação preliminar da hidrodinâmica dos sistemas, permitindo a identificação de ajustes necessários no projeto.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi realizada com apoio do: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Soluções baseadas na Natureza — INCT "SbN" (INCT "Nature based Solutions"); Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES; Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq - Brasil; Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS; e Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul - FUNDECT (Termo de outorga nº 103/2023).

Referências Bibliográficas

ARDEN, S.; MA, X. Constructed wetlands for greywater recycle and reuse: A review. **Science of the Total Environment,** v. 630, p. 587–599, 2018.

ERIKSSON, E.; AUFFARTH, K.; HENZE, M.; LEDIN, A. Characteristics of grey wastewater. **Urban Water,** v. 4, n. 1, p. 85-104, 2002

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. D. Treatment Wetlands. 2. ed. Boca Raton: **CRC Press**, 2009.

PAOLI, A. C. de; VON SPERLING, M. Avaliação das condições hidrodinâmicas de wetlands construídos de escoamento horizontal subsuperficial: unidades plantada e não plantada. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 2, p. 123–130, 2015.

PERSSON, J.; SOMES, N. L. G.; WONG, T. H. F. Hydraulic efficiency of constructed wetlands and ponds. **Water Science and Technology**, v. 40, n. 3, p. 291–300, 1999.

LEAL, L. H. et al. Characterization and anaerobic biodegradability of grey water. **Desalination**, v. 270, n. 1–3, p. 111–115, 1 abr. 2011.

LEVENSPIEL, O. Engenharia das reações químicas. Tradução de José Carlos Pinto e Márcio Schwaab. São Paulo: **Edgard Blücher**, 1999.

MAGALHÃES FILHO, F. J. C.; PAULO, P. L. Tratamento de água cinza empregando wetlands construídos. In: SEZERINO, P. H.; PELISSARI, C. (Eds.). Wetlands Construídos como Ecotecnologia para o Tratamento de Águas Residuárias: Experiências Brasileiras. 1ed. ed. Curitiba: **Brazil Publishing**, 2021. p. 118–136.

RAMOS, N. F. S. et al. Tratamento de Águas Residuais de Suínos em Sistemas Úmidos Construídos: Modelagem Hidráulica e Cinética. **Water**, [s. l.], v. 14, n. 5, p. 681, 2022.

TAKAHASHI, K. M. Uso de macrófitas do bioma pantanal em soluções baseadas na natureza para o tratamento de água cinza. **Tese (Doutorado)** - Universidade do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2021.

APLICAÇÃO DE PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE LAVANDERIAS DE JEANS: POTENCIAL PARA REÚSO E CONFORMIDADE COM NORMAS INTERNACIONAIS

1 Nícolas Heberte Coelho, 2 Luzia Sergina de França Neta, 3 Patrícia Sueli de Rezende
1 Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), e-mail: nicolasheberte@gmail.com;
2 CEFET-MG, e-mail: lsfranca@cefetmg.br; 3 CEFET-MG, e-mail: patriciarezende@cefetmg.br

Palavras-chave: Reúso de água; Efluente têxtil; Processos de separação por membranas.

Introdução

A indústria têxtil, em especial o setor de beneficiamento de *denim*, destaca-se como uma das maiores consumidoras de recursos hídricos no cenário industrial global, sendo também responsável pela geração de efluentes de elevada complexidade química e biológica (MARIN et al., 2017). Caracterizada por corantes recalcitrantes (*índigo blue*), surfactantes e resíduos de processos abrasivos, essa matriz impõe desafios rigorosos aos sistemas de tratamento convencionais.

Embora os processos físico-químicos tradicionais sejam eficazes na remoção de cor e turbidez para descarte, apresentam limitações severas para o reúso industrial (SOUZA, 2020). O principal entrave é o "paradoxo têxtil": a dosagem de auxiliares químicos para remover poluentes visíveis eleva a força iônica e a condutividade do efluente. Esse incremento da salinidade interfere na interação entre corantes e fibras, comprometendo a uniformidade cromática em etapas críticas, como o retingimento (SOUZA, 2023).

Frente à escassez hídrica e a normativas como a DN CERH-MG nº 65/2020 e o Regulamento (UE) 2020/741, a economia circular torna-se estratégica para a competitividade do setor (CEBDS, 2021). Nesse cenário, os processos de separação por membranas (PSM) emergem como uma alternativa robusta. A integração híbrida entre ultrafiltração (UF) e osmose inversa (OI) possibilita tanto a remoção de macromoléculas quanto o polimento iônico necessário (EPA, 2012). Enquanto a UF atua como barreira física inicial e mitiga o *fouling* (HABERT et al., 2006), a OI garante a desmineralização indispensável à reinserção da água no processo produtivo.

Este trabalho avalia o desempenho de um sistema integrado UF/OI operando com efluente real de lavanderia de jeans. Objetiva-se demonstrar a conversão de um passivo ambiental em insumo estratégico, promovendo a segurança hídrica e a sustentabilidade industrial.

Material e Métodos

O desenvolvimento experimental desta pesquisa foi conduzido em escala de bancada, utilizando efluente bruto real coletado em uma unidade industrial de lavanderia de jeans situada no estado de Minas Gerais. O delineamento metodológico baseou-se na integração sequencial de duas operações unitárias fundamentais: UF e a OI. Inicialmente, o efluente bruto passou por uma etapa de pré-filtração em filtro de tecido, procedimento essencial para a remoção de sólidos grosseiros e fibras capilares que poderiam comprometer a integridade dos módulos de membrana.

A unidade experimental de UF operou em regime tangencial, utilizando membranas de fibra oca (*Hollow Fiber*) em PVDF reforçado, fabricadas pela Vitaltec Engenharia Ltda. (área efetiva de 0,024 m²). A propulsão do fluido foi assegurada por uma bomba de deslocamento positivo SEAFLO, com capacidade nominal de 5,1 $L \cdot min^{-1}$. Para o controle e monitoramento das variáveis, o sistema dispunha de um rotâmetro Shunhuan na linha de alimentação e um manômetro analógico Cofermeta, com escala de até 4 $kgf \cdot cm^{-2}$. O ajuste preciso da pressão transmembrana (ΔP) foi realizado via válvula de agulha DECA (1/2”), instalada estrategicamente na linha de concentrado. A disposição física e a montagem real do aparato experimental encontram-se ilustradas na Figura 1.

Previamente aos ensaios com efluente, as membranas foram submetidas a um protocolo de compactação sob pressão constante de 2,0 bar durante 60 minutos, visando a acomodação estrutural da matriz polimérica. A caracterização funcional da UF incluiu a determinação da permeabilidade hidráulica (Lp) em um intervalo de pressão de 0,5 a 2,0 bar.

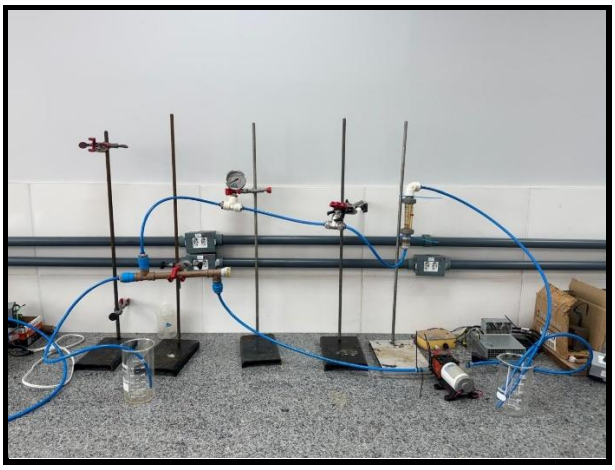


Figura 01: Sistema de filtração para ensaios de ultrafiltração em escala de bancada

O permeado gerado na unidade de UF serviu como alimentação para o sistema de polimento por Osmose Inversa. Esta unidade foi equipada com uma membrana densa de filme fino de poliamida (PA) em configuração plana (*Flat Sheet*), modelo DOW™ Filmtec™ TW30-1812-100HR, com área de 0,0113 m². Esta unidade experimental é composta por um reservatório de alimentação de onde o fluido é succionado por uma bomba de alta pressão. O controle operacional é viabilizado por um conjunto de instrumentação que inclui um rotâmetro para monitoramento da vazão de entrada, um manômetro acoplado a uma válvula de agulha para o ajuste preciso da pressão transmembrana (ΔP) e sensores para o registro da temperatura do processo. A disposição física e a montagem real do aparato experimental utilizado no Laboratório de Processos e Controle Ambiental (LAPEC), encontram-se ilustradas na Figura 2.

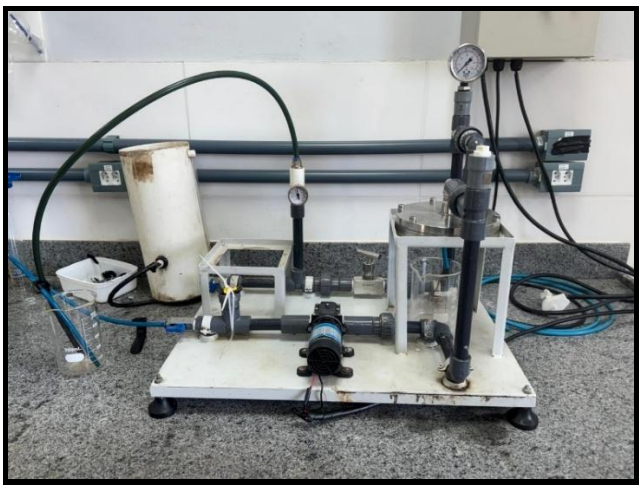


Figura 02: Sistema de Osmose Inversa.

Os ensaios de OI foram realizados sob pressão transmembrana constante de 10 bar e vazão de alimentação de 1,5 L/min em regime de circuito fechado (recirculação), avaliando-se o desempenho do sistema em taxas de recuperação de até 75%. A seletividade iônica da OI foi avaliada por meio de ensaio padrão com solução de NaCl (2.000 ppm) sob pressão de 12 bar.

Por fim, a caracterização físico-química das correntes do sistema (bruto, permeado de UF e permeado de OI) fundamentou-se nos protocolos do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. O plano experimental consistiu em três campanhas de amostragem, com análises conduzidas em triplicata para assegurar a reprodutibilidade dos resultados. As concentrações de cloretos e dureza foram determinadas por espectrofotometria em equipamento Hach DR 3900. Paralelamente, a quantificação de Carbono Orgânico Total (TOC) foi realizada em um analisador Shimadzu TOC-L, operando via oxidação por combustão catalítica a 680 °C. O protocolo analítico contemplou ainda o monitoramento de parâmetros críticos para o reúso industrial, como turbidez e condutividade elétrica.

Resultados e Discussão

A avaliação funcional inicial revelou que a membrana de ultrafiltração apresentou uma estabilização de fluxo precoce, atingindo o regime estacionário nos primeiros 30 minutos de operação. A permeabilidade hidráulica determinada, foi de 36,85 L m^{-2} h^{-1} bar^{-1}, apresentando um bom ajuste do modelo linear (R^2=0,9647), o que confirma que o transporte no intervalo de pressão avaliado seguiu estritamente a Lei de Darcy. No tratamento do efluente real, a UF atuou como uma barreira física absoluta, promovendo a clarificação total da matriz.

No que tange ao polimento iônico, a membrana de osmose inversa (OI) apresentou seletividade superior a 97% (Tabela 1), valor condizente com o desempenho de membranas densas de poliamida. A permeabilidade hidráulica obtida, de 6,57 L h^{-1} m^{-2} bar^{-1}, ratifica a estabilidade operacional do módulo e indica a preservação da integridade estrutural da matriz polimérica, descartando a ocorrência de deformações plásticas sob as condições de pressão aplicadas.

Pressão (bar)	Vazão (m^3/h)	Condutividade Alim.	Condutividade Perm.	Rejeição (%)
12	0,144	4.380 uS/cm	120,7 uS/cm	**97,25%**

Tabela 01: Ensaio de Rejeição Salina Padrão (Solução de NaCl 2000 ppm)

A integração dos sistemas de UF e OI apresentou elevada performance na remoção da carga poluidora, resultando em um polimento avançado do efluente bruto. A eficácia desse tratamento híbrido é visualmente atestada pela nítida clarificação das amostras, conforme ilustrado na comparação entre o efluente bruto e os respectivos permeados de UF e OI (Figura 3).

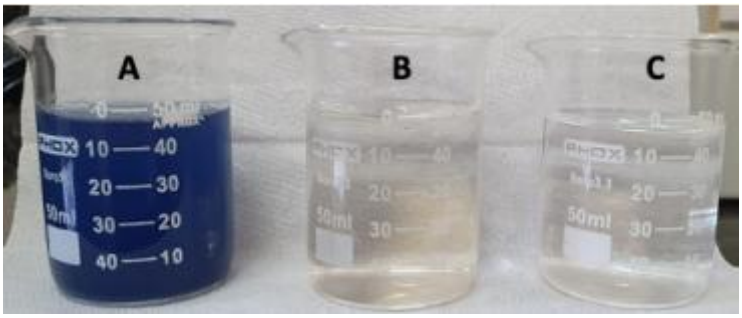


Figura 3: A) Efluente bruto; B) Efluente pós Ultrafiltração; C) Efluente após a Osmose Inversa.

A análise do desempenho físico-químico, cujos valores médios estão consolidados na Tabela 2, evidencia a robustez operacional do sistema integrado UF/OI. A etapa de ultrafiltração atuou como uma barreira física de elevada eficiência, reduzindo a turbidez média de 120,33 NTU para apenas 0,24 NTU, o que representa a remoção praticamente integral do material particulado. Esse nível de clarificação é fundamental não apenas para o enquadramento normativo, mas, primordialmente, para a proteção da unidade de osmose inversa, ao mitigar riscos de colmatação e abrasão da camada seletiva de poliamida por sólidos em suspensão.

Parâmetro	Efluente Bruto	Permeado UF	Permeado OI (Final)	Remoção Global (%)
Turbidez (NTU)	120,33	0,24	**0,00**	100%
Condutividade (uS/cm)	764,33	639,00	**75,10**	90,17%
Cloreto (mg/L)	506,58	122,06	**21,44**	95,77%
Dureza (mg CaCO3/L)	188,10	151,47	**4,62**	97,54%
Carbono Orgânico (mg/L)	28,61	19,32	**4,32**	84,90%

Tabela 02: Caracterização físico-química média das correntes do sistema integrado UF/OI.

No que concerne ao polimento iônico, a osmose inversa demonstrou uma seletividade superior, promovendo a desmineralização acentuada do efluente. A condutividade elétrica, parâmetro determinante para a viabilidade do reúso têxtil, foi reduzida de 764,33 µS/cm para 75,10 µS/cm (remoção de 90,17%). Este resultado é tecnicamente estratégico, pois o permeado final situa-se abaixo do limite crítico de 100 µS/cm, patamar exigido pela literatura industrial para garantir a uniformidade cromática e a reprodutibilidade do tingimento com índigo *blue*. Tal desempenho reverte o "paradoxo têxtil" observado no tratamento convencional, que tipicamente eleva a salinidade do efluente devido à dosagem de coagulantes inorgânicos.

A eficiência do sistema também foi verificada no abrandamento da água, com a dureza total decrescendo de 188,10 mg/L para 4,62 mg/L de $CaCO_3$, uma remoção de 97,54%. A produção de uma água com dureza residual tão baixa é um diferencial competitivo para a indústria, pois previne incrustações em caldeiras e evita manchas nas peças beneficiadas. Complementarmente, a remoção de 95,77% de cloretos e 84,90% de Carbono Orgânico Total (COT) consolida o enquadramento do permeado na Classe A da Deliberação Normativa CERH-MG nº 65/2020 e atende aos requisitos do Regulamento (UE) 2020/741. Conclui-se que o sistema híbrido transforma o efluente em um insumo de alta performance, garantindo a segurança técnica necessária para o fechamento do ciclo hídrico industrial.

Considerações Finais

As etapas experimentais validaram a hipótese de que a integração entre UF e OI atua como um tratamento avançado eficaz, garantindo a clarificação total e a estabilidade operacional do sistema híbrido. A OI consolidou-se como a barreira desmineralizadora essencial, convertendo o efluente salino em um insumo estratégico de alta performance, apto ao retingimento e em conformidade com padrões internacionais de segurança sanitária.

Como perspectivas para a conclusão desta pesquisa, os trabalhos futuros contemplarão a realização de novas campanhas de amostragem, ampliando o escopo analítico por meio da inclusão de parâmetros como a série de sólidos, o potencial hidrogeniônico (pH), sulfato e fosfato. Adicionalmente, serão conduzidos ensaios comparativos utilizando o efluente submetido ao tratamento convencional da própria unidade industrial, visando consolidar a superioridade técnica e a reprodutibilidade do sistema de membranas sob diferentes condições operacionais. Paralelamente, será desenvolvido um estudo de viabilidade econômica detalhado (CAPEX e OPEX), contemplando custos energéticos e insumos de manutenção. Almeja-se, com isso, fornecer subsídios técnicos para a implementação de modelos de economia circular no setor têxtil mineiro, demonstrando que a independência hídrica industrial é tecnicamente viável e regulatoriamente segura.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos (PPGTPP), à CAPES e ao Grupo de Estudos e Aplicações de Processos de Separação por Membranas (GEAPS) pelo apoio à pesquisa. À unidade industrial parceira pelo fornecimento das amostras.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO ESTRATÉGICO (Brasil). Relatório de conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021. Brasília, DF: ANA, 2021.

CONSELHO BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (CEBDS). Guia de boas práticas em reúso de água na indústria. Rio de Janeiro: CEBDS, 2021.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (Brasil). Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e conceitos gerais de reúso direto não potável de água, e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2005.

ESTADO DE MINAS GERAIS. Deliberação Normativa CERH-MG nº 65, de 03 de setembro de 2020. Estabelece diretrizes e critérios para o reúso direto de água não potável em Minas Gerais. Diário do Executivo: Belo Horizonte, MG, 2020.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. Processos de separação com membranas. Rio de Janeiro: E-papers, 2006.

MARIN, P. *et al*. Water management in the textile industry: operational risks and strategic opportunities. Washington, DC: World Bank Group, 2017.

MULDER, M. Basic principles of membrane technology. 2. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.

PARLAMENTO EUROPEU. Regulamento (UE) 2020/741 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de maio de 2020, relativo aos requisitos mínimos para o reúso da água. Jornal Oficial da União Europeia, 2020.

SOUZA, R. S. Tecnologias avançadas de tratamento de efluentes têxteis. São Paulo: Editora Técnica, 2020.

SOUZA, R. S. Reúso de água e seletividade iônica no beneficiamento têxtil. Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 28, n. 2, p. 145-158, 2023.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). 2012 Guidelines for Water Reuse. Washington, DC: EPA, 2012.

AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MEIOS FILTRANTES NO TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE BOVINOCULTURA ORGÂNICA LEITEIRA

1 Eurico Tomaz Figueiredo, 2 Matheus Souza de Oliveira, 3 Vitória Machado Barbosa, 4 Barbara Costa Pereira, 5 Rozileni Piont Kovsky Caletti, 6 Evandro Francisco Ferreira da Silva Souza, 7 Ricardo Ganem Leal, 8 Leonardo Duarte Batista da Silva

1 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail: eurico.tfigueiredo@gmail.com; 2 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail: dessouzamatheus@gmail.com; 3 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail: vitoriamachado0808@gmail.com; 4 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail: barbaracp90@gmail.com; 5 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail: rozileni.pkc@hotmail.com; 6 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail: evandroffss@gmail.com; 7 PortosRio - Companhia Docas do Rio de Janeiro, e-mail: ricardo.ganem@portosrio.gov.br; 8 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail:monitoreambiental@gmail.com

Palavras-chave: Tratamento de efluentes; Filtros biológicos; Resíduo industrial

Introdução

Embora a agropecuária seja um pilar estratégico da economia brasileira, a intensificação da produção elevou proporcionalmente a geração de resíduos, bem como o impacto ambiental da atividade (FAO, 2018; Matos, 2014).

A água residuária de bovinocultura (ARB) é um efluente que apresenta elevadas concentrações de matéria orgânica e de sólidos, o que lhe confere um alto potencial poluidor. Seu descarte inadequado em corpos hídricos receptores provoca a redução do oxigênio dissolvido, elevada demanda bioquímica de oxigênio, processos de eutrofização e a disseminação de doenças de veiculação hídrica (Matos, 2014; Metcalf; Eddy, 2016).

Nesse sentido, o tratamento prévio da ARB é indispensável antes de sua disposição final. Diversas metodologias podem ser empregadas, abrangendo processos físico-químicos e biológicos. Contudo, a complexidade e os custos de manutenção de certos sistemas convencionais ainda restringem sua adoção em áreas rurais. Por essa razão, torna-se necessário o estudo de alternativas economicamente sustentáveis, como o uso de filtros preenchidos com materiais orgânicos ou materiais que são resíduos de outras atividades, que apresentam facilidade operacional e eficiência na remoção de poluentes (Dordio; Carvalho, 2013; Stefanakis, 2019).

Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de filtros compostos por diferentes materiais no tratamento de efluentes provenientes da bovinocultura leiteira.

Material e Métodos

O experimento foi realizado no laboratório de Monitoramento Ambiental I - Águas e Efluente do Departamento de Engenharia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). A água residuária foi obtida no estábulo do Sistema Integrado de Produção Agroecológica (SIPA). Os materiais filtrantes utilizados foram o sabugo de milho, serragem de madeira (ambos com granulometria entre 2,38 e 4,00 mm, conforme recomendado por Lo Monaco et al. (2004)), bambu (gomos com tamanho médio de 4 cm de altura e 3 cm de diâmetro) e escória de aciaria elétrica (granulometria entre 1,18 e 4,75 mm), conforme ilustrado na Figura 01. Com exceção da escória, que foi obtida junto a uma usina siderúrgica situada no sul do estado do Rio de Janeiro, todos os materiais foram obtidos no campus da UFRRJ.



Figura 01: Materiais usados como meios filtrantes.
Fonte: Autoria própria (2026)

Como foram realizadas três repetições para cada material filtrante, foram confeccionadas 12 colunas de filtragem a partir de tubo PVC de 150 mm e 600 mm de comprimento. Na extremidade inferior dos tubos, foi colado um tampão com um furo onde foi conectada uma torneira para permitir a drenagem do efluente. Foram adicionadas duas camadas de 10 cm constituídas por brita 0, uma ao fundo e outra ao topo, para evitar o entupimento dos drenos e para impedir o selamento superficial na parte superior, respectivamente. O orifício de saída do filtro foi adaptado com uma malha de nylon de 1 mm. A fim de evitar o fluxo preferencial da ARB no filtro, colou-se areia nas paredes internas da coluna de filtragem, aumentando sua rugosidade.

Os materiais triturados foram adicionados às colunas em camadas de 10 cm de espessura, sob compressão até ser atingida a altura de 50 cm. Após a compactação do material filtrante, foi aplicada lâmina de ARB, por fluxo descendente, para que operasse na condição saturada durante todo o tempo. Com as válvulas das colunas fechadas, os filtros foram saturados com ARB até ser atingido o nível máximo de cada coluna. Após a saturação, as válvulas das colunas filtrantes foram abertas, permitindo o movimento do líquido nos interstícios do material filtrante, sendo as colunas mantidas saturadas durante o período de filtração, procurando manter, por meio de controle nas válvulas, a carga hidrostática inicialmente estabelecida.

Foram filtrados 30 litros de ARB, em que a cada 5 litros, amostras de 500 mL eram coletadas para realização de análises de DQO (Demanda Química de Oxigênio) e SST (Sólidos Suspensos Totais). As análises dos parâmetros definidos para avaliar o desempenho dos filtros foram realizadas em triplicata. As metodologias utilizadas para a determinação dos parâmetros foram baseadas nos procedimentos recomendados pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012).

Os parâmetros avaliados foram submetidos a testes de análise de variância (ANOVA), e havendo significância, as médias foram comparadas através do teste de Tukey, com nível de confiança de 95%, ou seja, ao nível de 5% de probabilidade de erro ($p \leq 0,05$). O programa de análises estatísticas utilizado foi o Minitab 17.

Resultados e Discussão

A ARB utilizada nos experimentos apresentou valores médios de concentração de DQO e SST de 3.400 mg L-1 e 484 mg L-1, respectivamente. Na Figura 02(A) estão representados os valores de eficiência de remoção de DQO obtidos com o uso dos diferentes meios filtrantes. No eixo das abcissas tem-se o volume filtrado e no eixo das ordenadas estão os valores de concentração relativa de DQO. Como a concentração relativa (C/Co) expressa a relação entre as concentrações de saída (efluente) e de entrada no filtro (afluente), um valor de C/Co maior que 1 significa que o efluente apresenta concentração da variável em referência maior que a do afluente. O meio filtrante com escória foi o que removeu o maior percentual de matéria orgânica do efluente. Sendo o filtro com meio filtrante Bambu, que menos removeu DQO. No entanto, como mostrado na Figura 02(B), o teste de Tukey indica que as médias correspondentes aos diferentes meios filtrantes não apresentam diferenças estatísticas significativas.

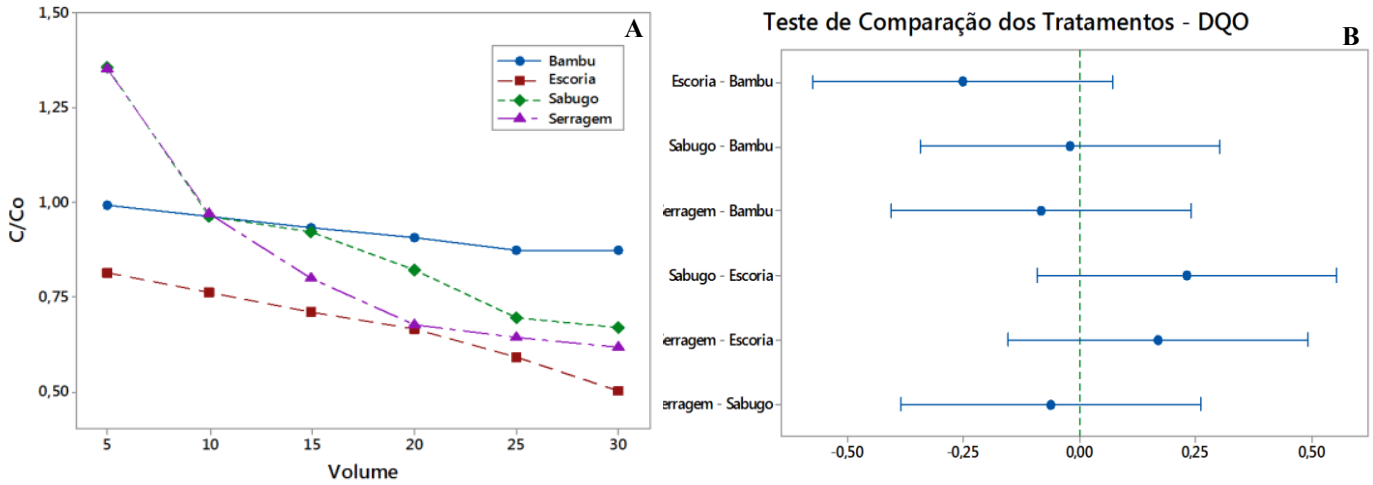


Figura 02: (A) Valores médios de eficiência de remoção de DQO obtidos nos diferentes filtros. (B) Diferenças de médias para DQO (Tukey≤0,05).
Fonte: Autoria própria (2026)

Observando o desempenho dos filtros com sabugo e serragem, percebe-se que nos primeiros 5 litros houve um acréscimo nas concentrações de DQO no efluente. Tal comportamento também foi reportado por Lo Monaco et al. (2004), quando utilizaram serragem de madeira e sabugo de milho triturado, e o que se constatou é que os dois materiais filtrantes liberaram, nas primeiras lâminas filtradas elevada quantidade de sólidos e solutos de fácil oxidação bioquímica.

As maiores eficiência de remoção de DQO foram obtidas conforme a ARB era filtrada, tendo seus maiores valores na última fase de filtração, fato este também corroborado por Lo Monnaco (2011). A remoção média de DQO no filtro com bambu foi de 15%. Segundo Tonetti et al. (2011) valores de remoção de 81% de DQO foram observados com a utilização de recheio de bambu para filtros anaeróbicos. O baixo valor de eficiência obtido no presente trabalho pode ser atribuído à ausência de período

de aclimatação do meio filtrante, estratégia adotada por Tonetti et al. (2011) que propicia o crescimento de biofilme que fica aderido à superfície do bambu, resultando em melhores eficiências de remoção de DQO.

Com o uso do meio filtrante de escória de aciaria, obteve-se a eficiência de remoção de DQO de 50%. Avelar (2008) relatou eficiência de remoção de DQO superior a 70% com o uso de escória de aciaria, porém vale ressaltar que os sistemas de filtragem utilizados no trabalho diferem quanto à granulometria e à fase do tratamento.

Na Figura 03(A) estão representados os valores de eficiência de remoção de SST obtidos com o uso dos diferentes meios filtrantes. Foi possível observar que o filtro com meio filtrante de sabugo de milho, foi o que obteve maior remoção de sólidos, enquanto os meios filtrantes com bambu e escória de aciaria, foram os que conferiram as menores eficiências de remoção.

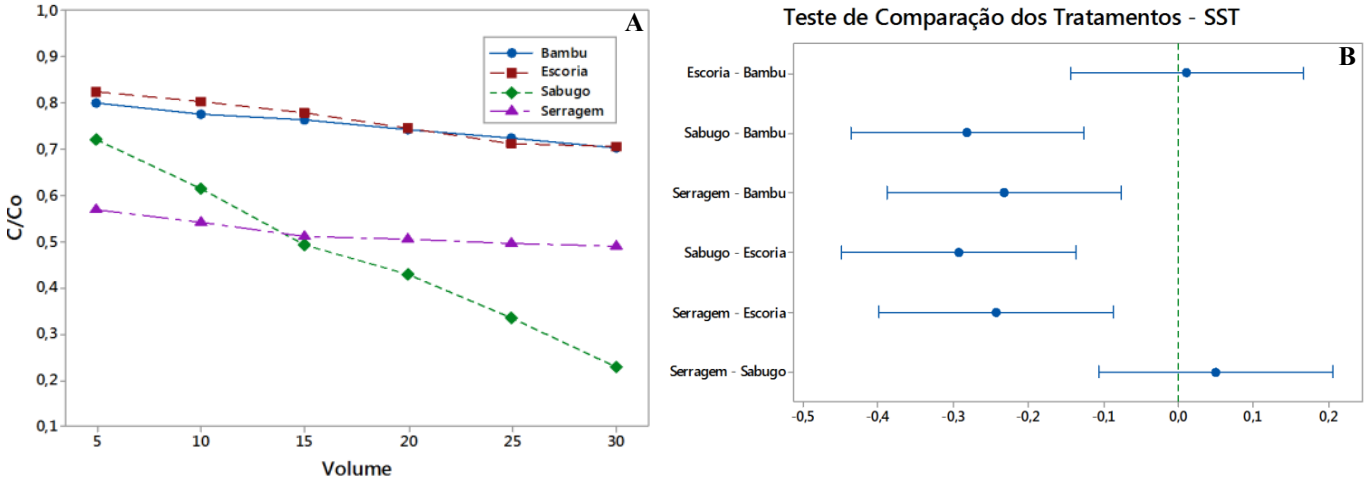


Figura 03: (A) Valores médios de eficiência de remoção de SST obtidos nos diferentes filtros. (B) Diferenças de médias para SST (Tukey≤0,05).
Fonte: Autoria própria (2026)

O valor máximo de eficiência de remoção de SST obtido com o sabugo foi de 80%, resultado semelhante ao que foi descrito por Lo Monaco (2011) que observou valores de eficiência entre 60-70%. Os valores de remoção para os filtros que continham serragem de madeira como meio filtrante chegaram a 50%. Essas eficiências ficaram abaixo dos valores obtidos por Lo Monaco (2004), que reportou remoções de até 70%, e uma hipótese que pode explicar tal diferença diz respeito ao tipo de água residuária tratada.

Na Figura 03(B), o teste de Tukey mostra que, para os tratamentos entre os meios Escória-Bambu e Sabugo-Serragem não se observou diferença entre eles, já os meios Sabugo-Bambu, Serragem-Bambu, Sabugo-Escória, Serragem-Escória não foram estatisticamente semelhantes.

Considerações Finais

Os meios filtrantes estudados, sabugo de milho, serragem de madeira, bambu e escória de aciaria elétrica se mostraram como alternativas viáveis para o tratamento de ARB, no que diz respeito à remoção de DQO e SST. O melhor resultado de remoção de DQO foi alcançado pelo filtro constituído de escória de aciaria. Para os resultados de remoção de SST o meio filtrante constituído de sabugo de milho, obteve o melhor resultado de remoção. Para estudos futuros recomenda-se adotar um período de aclimatação dos meios filtrantes em contato com a água residuária e avaliar a influência da variação da granulometria no desempenho dos filtros.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental da UFRRJ (PGEAAmb), à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA Agrobiologia) e à Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro (PESAGRO – RIO).

Referências Bibliográficas

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; American Water Works Association; Water Environment Federation. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22. ed. Washington: APHA, 2012.

AVELAR, J. C. **Avaliação da escória de aciaria (LD) como leito cultivado e leito filtrante no pós-tratamento de efluente de reator UASB compartimentado**. 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

DORDIO, A. V.; CARVALHO, A. J. P. Organic xenobiotics removal in constructed wetlands, with emphasis on the importance of the support matrix. **Journal of Hazardous Materials**, v. 252–253, p. 272–292, 2013. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.03.008

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **World livestock: transforming the livestock sector through the sustainable development goals**. Rome: FAO, 2018. Disponível em: https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/3e7ba7ed-1eb1-48cf-8792-ae4773e9a79b/content. Acesso em: 08 abr. 2026.

LO MONACO, P. A.; MATOS, A. T.; JORDÃO, C. P.; CECON, P. C.; MARTINEZ, M. A. Influência da granulometria da serragem de madeira como material filtrante no tratamento de águas residuárias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 116-119, 2004. DOI: 10.1590/S1415-43662004000100017

LO MONACO, P. A.; MATOS, A. T.; BRANDÃO, V. S. Influência da granulometria dos sólidos triturados de sabugo de milho e bagaço de cana-de-açúcar como materiais filtrantes no tratamento de águas residuárias da suinocultura. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 5, p. 974-984, 2011. DOI: 10.1590/S0100-69162011000500015

MATOS, A. T. **Tratamento e aproveitamento agrícola de resíduos da bovinocultura leiteira**. Viçosa: UFV, 2014.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

STEFANAKIS, A. I. The role of constructed wetlands as green infrastructure for sustainable wastewater management. **Sustainability**, v. 11, n. 6981, 2019. DOI:10.3390/su11246981

TONETTI, A. L.; FILHO, B. C.; GUIMARÃES, J. R.; CRUZ, L. M. O.; NAKAMURA, M. S. Avaliação da partida e operação de filtros anaeróbios tendo bambu como material de recheio. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 1, p. 11-16, 2011. DOI: 10.1590/S1413-41522011000100004.

TESTES DE PERFIS HIDRÁULICOS AVALIANDO O COMPORTAMENTO DE UM WETLAND CONSTRUÍDO PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA CINZA

1 Isadora da Silva dos Santos, 2 Caique Morelo Passoni, 3 Karen Midori Takahashi, 4 Paula Loureiro Paulo
1 Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, e-mail: s.isadora@ufms.br; 2 Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, e-mail: caique.morelo@ufms.br; 3 Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, e-mail: karen.takahashi@ufms.br; 4 Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, e-mail: paula.paulo@ufms.br

Palavras-chave: Solução baseada na Natureza (SbN); tratamento de efluentes; ecotecnologia.

Introdução

Os *wetlands* construídos (CW) vem ganhando espaço sendo fortemente recomendada como ecotecnologia para o tratamento de efluentes. São sistemas que não necessitam de mão-de-obra qualificada para instalação, com possibilidade de aplicação em estações de pequeno porte e a nível domiciliar (Arunbabu et al., 2015) e baixo custo de implementação (Hu et al., 2016). Representam uma solução baseada na natureza (Arden e Ma, 2018) com combinação de técnicas simples, sem necessitar de altas técnicas operacionais. A eficiência global do tratamento de esgoto doméstico nos CWs é definida pela combinação da configuração hidráulica, tipo de vegetação e tipo de meios filtrantes (Makopondo et al., 2020; Button et al., 2016; Faulwetter et al., 2009), determinando as condições ambientais que definirão os processos dentro do CW responsáveis pelo tratamento. Apesar das diversas vantagens que os CWs apresentam, alguns desafios têm sido identificados, como no caso da configuração de fluxo horizontal subsuperficial em que ocorre o entupimento derivado da retenção de partículas orgânicas e inorgânicas e precipitação de poluentes na entrada do sistema (Knowles et al., 2011).

O grupo de pesquisa SanFRec (Saneamento Focado em Recursos), da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), propôs um sistema denominado EvaTAC (Evapotranspiração e Tratamento de Água Cinza), que é composto por um *wetland* construído adaptado, definido como câmara de evapotranspiração e tratamento (CEvaT), com a adição de uma câmara de digestão anaeróbia (Cdig) ao sistema CW (Magalhães Filho et al., 2021). Por sua vez, a CEvaT é conectada em série com um *wetland* construído de fluxo horizontal subsuperficial (CW-FHSS). A Cdig é o compartimento responsável por receber o efluente e tem a função de absorver a carga de sólidos, através da retenção, sedimentação e digestão da maior parte da biomassa (Bernardes et al., 2019). Posteriormente, o CW-FHSS visa a fase de polimento do efluente.

Dentre os diferentes tipos de *wetlands* construídos, o EvaTAC tem se destacado como uma ecotecnologia eficaz para o tratamento de água cinza. Os *wetlands* construídos combinam os processos de evapotranspiração das plantas com a filtragem no substrato e no solo e a atividade microbiana, proporcionando uma remoção eficiente de poluentes além de seu potencial paisagístico (Liu et al., 2015). A avaliação do desempenho do sistema EvaTAC ao longo do tempo de detenção hidráulica (TDH) é fundamental para garantir sua eficácia a longo prazo já que descreve o tempo que um determinado fluído percorreria da entrada até a saída da unidade (Kadlec e Knight, 1996), sendo que, de acordo com Wahl et al. (2010), ao aumentar o TDH do sistema, há maior probabilidade de redução de poluentes, por causa do aumento do tempo de contato destes com os mecanismos de remoção.

Os testes de perfil emergem como uma ferramenta para entender o comportamento orgânico e hidráulico do sistema, e os efeitos exercidos sobre a qualidade do efluente tratado (Da Silva et al., 2017), possibilitando a identificação de variações na concentração de poluentes, matéria orgânica e outros parâmetros de interesse, fornecendo informações muito significativas sobre a eficiência de tratamento de água cinza de lavanderia (AC_L) ao longo do sistema (Da Silva et al., 2017). Dessa forma, auxilia no desenvolvimento de estratégias para melhorar o desempenho oferecendo meios para otimizar o sistema como, por exemplo, variar as condições de configurações.

Portanto, para este estudo foram aplicados testes de perfil para avaliar a eficiência e o comportamento hidráulico do sistema EvaTAC, bem como para a caracterização qualitativa do efluente tratado através dos parâmetros pH, série de sólidos, demanda química de oxigênio (DQO) e surfactantes aniônicos.

Material e Métodos

EvaTAC piloto

O estudo foi conduzido em um sistema de *wetland* construído adaptado, o EvaTAC (Figura 1), implantado em escala piloto na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) em Campo Grande – MS. As unidades do sistema foram construídas em fibra de vidro, com a CEvaT apresentando 1,20 m de altura, 1,00 m de altura de meio filtrante composto por quatro camadas e 1,00 m² de área superficial. As camadas que compõem o meio filtrante, observadas na Figura 1, são: brita nº 4 (40 cm de altura (h), porosidade (k) = 0,50, d10 = 60 mm, d60 = 100 mm e coeficiente de uniformidade (Uc) = 1,67), brita nº 2 (h = 22,5 cm, k = 0,48, d10 = 15 mm, d60 = 22 mm e Uc = 1,47), escória de alto forno (h = 17,5 cm, k = 0,46, d10 = 8 mm, d60 = 20 mm e Uc = 2,5) e solo (h = 20 cm). O CW-FHSS apresenta 70 cm de altura e 1,00 m² de área superficial, contendo um talude de escória de alto forno cobrindo a tubulação de entrada e meio filtrante de 50 cm de altura composto por pedrisco (k = 0.44, d10 = 13 mm, d60 = 10 mm, e Uc = 1.6). O CW-FHSS, objeto do estudo, apresenta nível de saturação 30 cm (Teste T1).

O sistema está em operação há 10 anos e manteve-se nessa configuração apresentada por mais de 5 anos.

O plantio realizado na CEvaT utilizou mudas de três espécies tropicais e ornamentais, *Heliconia psittacorum, Canna x generalis e Canna glauca,* que apresentam tolerância a áreas úmidas ou alagadas (Cáspar, 2020; Coelho, 2016; Karungamye, 2022), em distribuição uniforme sobre a camada de solo e com uma matriz de quatro linhas e colunas, na qual em cada linha e coluna plantou-se, uma muda de cada espécie. No CW-FHSS, plantou-se mudas de *Canna x generalis*, igualmente distribuídas.

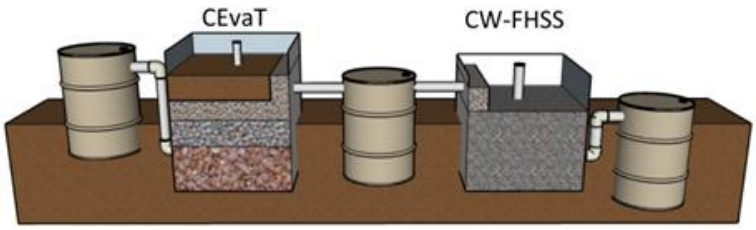


Figura 01: Configuração do EvaTAC.
Fonte: Autores (2025).

Alterações hidráulicas

Foram realizados dois testes de perfil: o Teste 1 (T1) e o Teste 2 (T2). O Teste 1 foi realizado com a configuração inicial do sistema (Figura 02), com o leito saturado de 0,30m, que possui operação nessa configuração há mais de 5 anos, enquanto o Teste 2 foi realizado após as alterações hidráulicas do sistema e a sua posterior adaptação durante 3 meses.

As alterações hidráulicas feitas no sistema foram a mudança do leito de saturação do CW-FHSS, buscando o aumento do leito em 10 cm para alcançar o nível de 40 cm (Figura 03). Esta mudança foi realizada após a observações da mortalidade das espécies de macrófitas aquáticas plantadas na unidade anterior ao plantio das espécies tropicais e ornamentais, levantando a hipótese que o nível de 30 cm de leito saturado (Figura 02) não proporcionava a devida disponibilidade de água para o desenvolvimento das plantas.

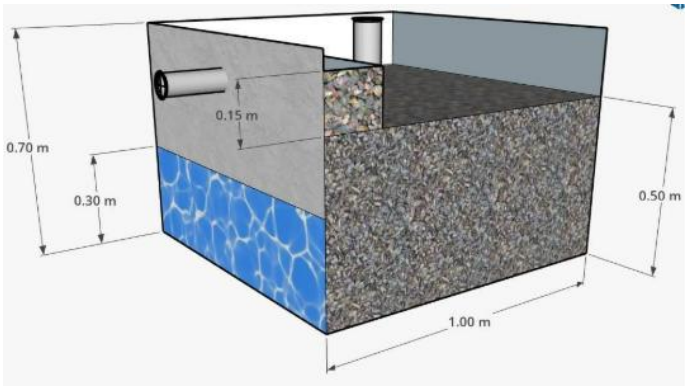


Figura 02: Representação do nível do leito saturado em 0,30m.
Fonte: Autores (2025).

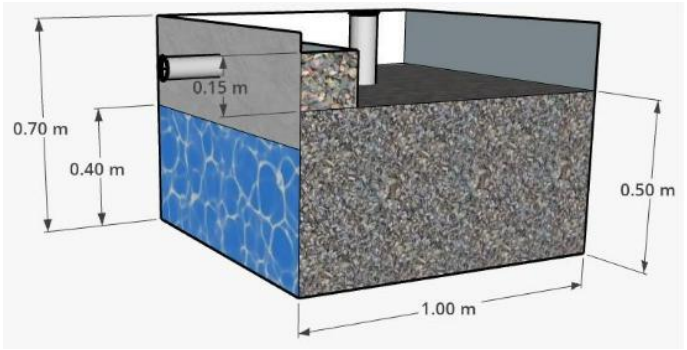


Figura 03: Representação do nível do leito saturado em 0,40m.
Fonte: Autores (2025).

Alimentação, coleta e amostragem

A alimentação do sistema foi feita com água cinza de lavanderia (AC_L), gerada em máquina de lavar roupas Samsung, modelo RNW, com padronização do ciclo em lavagem rápida de três enxágues, com um hidrômetro conectado para monitoramento do volume de efluente gerado e periodicidade de alimentação em três vezes por semana, duas vezes ao dia. A

vazão média de alimentação do sistema era de 99,7 ± 6,2 $L.d^{-1}$.

O Teste de perfil 1 apresentou 14 dias de duração e o Teste de perfil 2 teve duração de 16 dias, com amostragem simples de 36 amostras cada e realizadas em frascos plásticos de 200mL.

Parâmetros analisados e testes de perfil hidráulico

Foram realizados dois testes de perfil hidráulico em triplicata: o Teste 1 (T1) e o Teste 2 (T2). O Teste 1 foi realizado com a condição inicial de saturação do CW-FHSS, com 0,30 m de leito saturado (Figura 02), enquanto o Teste 2 foi realizado com a mudança do nível do leito de saturado, de 0,30 m para 0,40 m (Figura 03). Foi realizada análises dos parâmetros pH, temperatura, turbidez, série de sólidos e surfactante aniônico na amostra dos pontos de entrada da CEvaT (P1), saída da CEvaT e entrada do CW (P3) e na saída da CW (P5). O EvaTAC foi alimentado, no T1, com uma vazão de 84,9 $L.d^{-1}$, e taxa de aplicação hidráulica de 0,085 $m^3.m^{-2}.d^{-1}$. A alimentação no T2 foi realizada com uma vazão de 111,1 $L.d^{-1}$, enquanto a taxa de aplicação hidráulica foi de 0,111 $m^3.m^{-2}.d^{-1}$.

Resultados e Discussão

A Tabela 01 apresenta as médias e desvios-padrão dos dados analisados em cada ponto amostral nos testes T1 e T2.

	T1			T2		
	P1	P3	P5	P1	P3	P5
pH	8,4 ± 0,4	8,3 ± 0,0	7,7 ± 0,1	9,0 ± 0,7	8,4 ± 0,2	7,6 ± 0,3
Turbidez (NTU)	115,7 ± 77,3	22,2 ± 1,2	35 ± 10,5	84,8 ± 80,2	19,3 ± 9,5	12,7 ± 3,1
ST ($mg.L^{-1}$)	1256,8 ± 818,6	448,3 ± 15,6	522,9 ± 437,7	713,1 ± 465,3	539,6 ± 125,0	672,2 ± 497,5
SST ($mg.L^{-1}$)	59,4 ± 33,9	45,3 ± 26,5	16,2 ± 10,4	52,7 ± 62,5	8,9 ± 2,8	14,6 ± 6,8
SDT ($mg.L^{-1}$)	1144,3 ± 644,3	403,0 ± 12,7	506,7 ± 437,7	660,5 ± 428,7	530,7 ± 123,8	657,6 ± 495,2
DQO ($mg.L^{-1}$)	425,4 ± 317,5	93,0 ± 33,6	61,9 ± 19,7	274,6 ± 109,3	103,3 ± 43,1	61,1 ± 25,2
Surf. Aniônico ($mg.L^{-1}$)	30,5 ± 17,6	6,1 ± 4,3	2,5 ± 1,3	26,8 ± 20,1	20,9 ± 5,3	9,3 ± 2,8

Tabela 01: Média e desvio padrão dos parâmetros analisados em cada ponto amostral nos testes T1 e T2. Fonte: Autores (2025).

É possível observar que a turbidez na saída do sistema CW, apresenta menor valor no T2, demonstrando que a alteração hidráulica do leito saturado pode ter auxiliado em uma redução da turbidez. Pode-se perceber que os sólidos totais apresentaram aumento entre a entrada (P3) e a saída (P5) do CW em ambos os testes, indicando que o aumento no nível do leito saturado do CW não apresentou efeito significativo na remoção de sólidos totais. A eficiência de remoção da DQO no CW foi de 33,4 % no T1 e de 40,9 % no T2, indicando que o aumento do leito saturado na unidade pode ter auxiliado em sua remoção. A concentração de surfactante aniônico no CW sofreu redução significativa no T2, com remoção de 55,5%. Entretanto, o EvaTAC apresentou maior redução na concentração de surfactante aniônico no T1 quando considerado o sistema completo (CEvaT e CW), ainda considerando que houve uma maior concentração de surfactante aniônica na entrada do EvaTAC neste teste.

As modificações empregadas no EvaTAC, no nível de saturação do *wetland* construído, proporcionaram redução nos valores de turbidez e remoção da DQO, enquanto a remoção do surfactante aniônico e sólidos totais foram mais significativas na configuração inicial do EvaTAC, no T1. Segundo Barco e Borin (2020), as macrófitas funcionam como um filtro, capturando os sólidos suspensos nos rizomas e raízes. A alta remoção da turbidez pode ter sido motivada pelas raízes das macrófitas, que, com o aumento do leito saturado, podem ter se desenvolvido melhor e auxiliado na remoção da turbidez, através da remoção de sólidos suspensos, que estão diretamente relacionados com esse parâmetro físico-químico (Opitz et al., 2020). Ademais, uma maior transferência de oxigênio favorece a degradação de compostos, como surfactantes aniônicos e DQO (Collivignarelli et al., 2019), portanto, devido à maior saturação do leito proporcionado pela alteração hidráulica para o T2, não houve remoção significativa de surfactantes aniônicos quando comparado ao T1, que apresentou uma maior remoção conforme foi possível ver com os resultados da Tabela 01.

Considerações Finais

O presente estudo teve por objetivo avaliar a influência de mudanças construtivas e operacionais do sistema EvaTAC na eficiência do tratamento de água cinza de lavanderia, através de testes de perfil hidráulico. A modificação do leito saturado de 0,30 m para 0,40 m no CW-FHSS, favoreceu a redução da turbidez e, ligeiramente, do pH, e a remoção da DQO, enquanto a configuração inicial, de menor saturação e menor zona anaeróbia no leito, favoreceu a remoção de surfactante aniônico e da concentração de sólidos. Os resultados gerados buscaram a otimização do tratamento empregado no CW, contribuindo para estudos futuros e a implementação de um CW em escala real. Verifica-se que o EvaTAC apresenta importância ambiental e social, sendo uma ecotecnologia em Solução baseada na Natureza para tratamento de efluentes com aplicabilidade em domicílios e comunidades de pequeno porte, no tratamento de água cinza doméstica.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi realizada com apoio do: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Soluções baseadas na Natureza — INCT "SbN" (INCT "Nature based Solutions"); Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Capes; Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq - Brasil; e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul - FAPERGS; Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul - FUNDECT (Termo de outorga nº 103/2023).

Referências Bibliográficas

ARDEN, S.; MA, X. Constructed wetlands for greywater recycle and reuse: a review. **Science of The Total Environment**, v. 630, p. 587–599, 2018.

ARUNBABU, V.; SRUTHY, S.; ANTÔNIO, I.; RAMASAMY, E. V. Sustainable greywater management with Axonopus compressus (broadleaf carpet grass) planted in sub surface flow constructed wetlands. **Journal of Water Process Engineering**, v. 7, p. 153–160, 2015.

BERNARDES, F. S.; HERRERA, P. G.; CHIQUITO, G. M.; MORALES, M. F.; CASTRO, A. P.; PAULO, P. L. Relationship between microbial community and environmental conditions in a constructed wetland system treating greywater. **Ecological Engineering**, v. 139, 2019.

BUTTON, M.; RODRIGUEZ, M.; BRISSON, J.; WEBER, K. P. Use of two spatially separated plant species alters microbial community function in horizontal subsurface flow constructed wetlands. **Ecological Engineering**, v. 92, p. 18–27, 2016.

DA SILVA, J. B.; OLIVEIRA, P. J. A.; BONCZ, M.; PAULO, P. L. A modified constructed wetland system for greywater treatment. **Desalination and Water Treatment**, v. 91, p. 31–39, 2017.

FAULWETTER, J. L.; GAGNON, V.; SUNDBERG, C.; CHAZARENC, F. ; BURR, M. ; BRISSON, J. ; CAMPER, A. K.; STEIN, O. R. Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review, v. 39, p. 987-1004, 2009.

HU, M.; FAN, B.; WANG, H.; QU, B.; ZHU, S. Constructing the ecological sanitation: a review on technology and methods. **Journal of Cleaner Production**, v. 125, p. 1–21, 2016.

LIU, R.; ZHAO, Y.; DOHERTY, L.; HU, Y.; HAO, X. A review of incorporation of constructed wetland with other treatment processes. **Chemical Engineering Journal**, v. 279, p. 220-230, 2015.

STEIN, O. R. Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: a review. **Ecological Engineering**, v. 35, n. 6, p. 987–1004, 2009.

KADLEC, R.H.; KNIGHT, R. L. Treatment Wetlands. **Lewis Publishers**, Boca Raton, 1996.

KNOWLES, P.; DOTRO, G.; NIVALA, J.; GARCÍA J. Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Occurrence and contributing factors. **Ecological Engineering**, v. 37, n. 2, p. 99–112, 2011.

MAGALHAES FILHO, F. J. C.; DA SILVA, J. B.; PAULO, P. L. Hidrodinâmica De Um Wetland Construído Combinado Com Um Sistema Por Evapotranspiração Como Pré-Tratamento. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 1, n. 2, p. 276, 2013.

MAKOPONDO, R. O. B.; ROTICH, L. K.; KAMAU, C. G. Potential Use and Challenges of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Conservation in Game Lodges and Resorts in Kenya. **Scientific World Journal**, v. 2020, 2020.

WAHL, M. D.; BROWN, L. C.; SOBOYEJO, A. O.; MARTIN, J.; DONG, B. Quantifying the hydraulic performance of treatment wetlands using the moment index. **Ecological Engineering**. v. 36, ed. 12, p. 1691-1699, 2010.

WETLANDS CONSTRUÍDOS NA REMOÇÃO DE CONTAMINANTES EMERGENTES EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS: POTENCIAL, MECANISMOS E DESAFIOS

1 Noémia Antónia Afonso Mavinga, 2 Larissa Rodrigues Souza Costa
1 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: noemia.mavinga@ufu.br;
2 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: larissa.costa2@ufu.br

Palavras-chave: wetlands construídos; contaminantes emergentes; águas residuárias

Introdução

A presença de contaminantes emergentes em águas residuárias tem se consolidado como uma preocupação ambiental crescente, especialmente devido à ocorrência de compostos como fármacos, produtos de higiene pessoal e outros micropoluentes orgânicos que em muitos casos não são completamente removidos pelos sistemas convencionais de tratamento. Segundo Ravikumar et al. (2022), esses compostos podem permanecer no ambiente aquático e representar riscos ecológicos, o que reforça a necessidade de tecnologias complementares e mais sustentáveis para seu controle. De forma semelhante, Hou et al. (2025) destacam que a presença contínua desses contaminantes em efluentes e corpos hídricos tem ampliado o interesse por alternativas de tratamento mais eficientes.

Nesse contexto, os wetlands construídos têm ganhado destaque como uma alternativa promissora para o tratamento de águas residuárias contendo contaminantes emergentes. De acordo com Kushwaha et al. (2024), esses sistemas apresentam potencial relevante para a remoção de micropoluentes orgânicos, associando tratamento de efluentes com princípios de sustentabilidade ambiental. Além disso, Hou et al. (2025) apontam que os wetlands construídos vêm sendo reconhecidos como uma tecnologia baseada em processos naturais, com vantagens como menor consumo energético, simplicidade operacional e possibilidade de aplicação em diferentes contextos de tratamento.

A remoção desses contaminantes em wetlands construídos ocorre por meio da atuação conjunta de diferentes mecanismos físicos, químicos e biológicos. Segundo Sánchez, Ruiz e Soto (2022), processos como sorção, fotodegradação e interações com a vegetação podem contribuir de forma significativa para a atenuação de contaminantes emergentes. Ravikumar et al. (2022) também ressaltam que a biodegradação microbiana, a retenção no substrato e a absorção pelas plantas estão entre os principais mecanismos envolvidos nesses sistemas. Além disso, Hou et al. (2025) destacam que a eficiência do tratamento varia conforme o tipo de wetland, o meio suporte, as espécies vegetais utilizadas, o tempo de detenção hidráulica e as características físico-químicas dos contaminantes.

Apesar do potencial dessa tecnologia, a literatura também evidencia limitações importantes relacionadas à variabilidade de remoção entre diferentes compostos. Segundo Sánchez, Ruiz e Soto (2022), nem todos os contaminantes emergentes respondem da mesma forma aos processos presentes nos wetlands construídos, o que pode comprometer a eficiência do sistema em alguns casos. Da mesma forma, Kushwaha et al. (2024) observam que o desempenho desses sistemas depende fortemente da configuração adotada e das propriedades dos poluentes presentes no efluente. Assim, discutir o potencial, os mecanismos e os desafios dos wetlands construídos é fundamental para compreender sua aplicabilidade no tratamento de águas residuárias e sua contribuição para a proteção da qualidade ambiental.

Material e Métodos

O presente trabalho foi desenvolvido por meio de pesquisa bibliográfica, com caráter descritivo e abordagem qualitativa, a partir da análise de publicações científicas relacionadas ao uso de wetlands construídos na remoção de contaminantes emergentes em águas residuárias. Esse tipo de abordagem foi adotado por permitir a reunião, interpretação e discussão de conhecimentos já consolidados na literatura acerca do potencial dessa tecnologia, de seus principais mecanismos de remoção e de seus desafios de aplicação.

Para a elaboração do estudo, foram selecionados quatro artigos científicos de revisão, escolhidos em função de sua pertinência temática, atualidade e aderência ao objetivo proposto. As publicações analisadas discutem o emprego de wetlands construídos na remoção de contaminantes emergentes em águas residuárias, com enfoque nos mecanismos envolvidos no tratamento, nos fatores que influenciam a eficiência do processo e nas limitações ainda existentes para a aplicação ampliada dessa tecnologia. A seleção dessas referências permitiu reunir diferentes perspectivas sobre o tema, abrangendo tanto revisões voltadas a compostos farmacêuticos quanto discussões mais amplas sobre micropoluentes orgânicos e poluentes emergentes em geral (Ravikumar et al., 2022; Sánchez, Ruiz e Soto, 2022; Kushwaha et al., 2024; Hou et al., 2025).

A análise do material bibliográfico foi conduzida a partir da leitura integral dos artigos selecionados, com posterior organização das informações em três eixos principais: potencial dos wetlands construídos para o tratamento de águas residuárias contaminadas por compostos emergentes, mecanismos de remoção envolvidos no processo e desafios associados à eficiência e à aplicabilidade da tecnologia. A partir dessa organização, foi realizada uma síntese interpretativa das contribuições apresentadas pelos autores, buscando identificar convergências quanto ao desempenho dos sistemas, aos processos predominantes de remoção e aos fatores operacionais e estruturais que condicionam seus resultados.

Resultados e Discussão

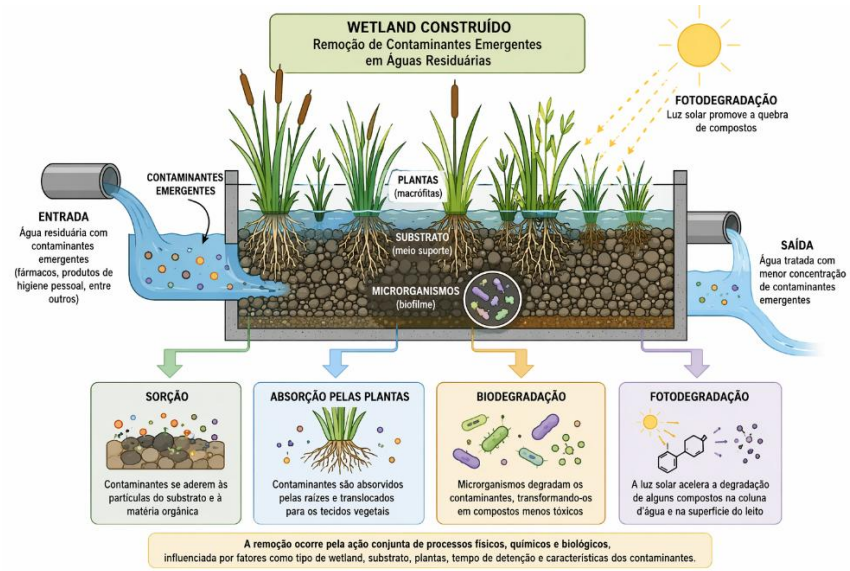


Figura 01: Esquema conceitual de wetland construído e dos principais mecanismos envolvidos na remoção de contaminantes emergentes em águas residuárias
Fonte: Elaboração própria, com base em Ravikumar et al. (2022), Sánchez, Ruiz e Soto (2022), Kushwaha et al. (2024) e Hou et al. (2025).

A análise dos estudos selecionados evidencia que os wetlands construídos apresentam potencial relevante para a remoção de contaminantes emergentes em águas residuárias, sendo considerados uma alternativa promissora no contexto do tratamento sustentável de efluentes. A Figura 1 apresenta, de forma esquemática, os principais mecanismos envolvidos na remoção de contaminantes emergentes em wetlands construídos. Ravikumar et al. (2022) destacam que esses sistemas têm sido estudados especialmente para a remoção de compostos farmacêuticos, enquanto Kushwaha et al. (2024) ampliam essa discussão ao indicar sua aplicabilidade para diferentes micropoluentes orgânicos presentes em águas residuárias. De forma complementar, Hou et al. (2025) mostram que, ao longo da última década, diversos estudos demonstraram a capacidade dos wetlands construídos em remover diferentes tipos de poluentes emergentes, incluindo compostos de cuidados pessoais e microplásticos.

Os resultados apresentados na literatura indicam que a eficiência desses sistemas está relacionada à atuação simultânea de diferentes mecanismos de remoção. Segundo Ravikumar et al. (2022), a presença das plantas exerce papel importante no tratamento, contribuindo para processos que envolvem absorção, estímulo à atividade microbiana e interação com o meio suporte. Kushwaha et al. (2024) apontam a fitorremediação, a adsorção no substrato e a degradação microbiana como estratégias centrais para a remoção de micropoluentes orgânicos. De forma semelhante, Sánchez, Ruiz e Soto (2022) ressaltam que processos como sorção, fotodegradação e interações associadas à vegetação podem atuar de forma complementar na atenuação dos contaminantes emergentes.

Outro aspecto recorrente nos artigos analisados é que o desempenho dos wetlands construídos não depende apenas da presença desses mecanismos, mas também de características específicas do sistema e dos compostos tratados. Hou et al. (2025) destacam que fatores como o tipo de wetland, a escolha do substrato, as espécies vegetais, os parâmetros operacionais e as propriedades físico-químicas dos poluentes influenciam diretamente a remoção. Nesse mesmo sentido, Kushwaha et al. (2024) observam que a eficiência desses sistemas pode variar de acordo com a configuração adotada e com a natureza dos micropoluentes presentes no efluente. Assim, os estudos analisados convergem ao indicar que o desempenho dos wetlands construídos é condicionado por múltiplas variáveis estruturais, operacionais e químicas.

Apesar do potencial identificado, a literatura também aponta desafios importantes. Sánchez, Ruiz e Soto (2022) observam que nem todos os contaminantes emergentes respondem da mesma forma aos processos de remoção presentes nesses sistemas, o que limita a uniformidade do tratamento. Ravikumar et al. (2022) também indicam que a remoção pode variar significativamente conforme o composto avaliado e as condições do sistema. Além disso, Hou et al. (2025) reforçam que ainda existem lacunas relacionadas à padronização de configurações mais eficientes e à ampliação do conhecimento sobre o comportamento de diferentes poluentes emergentes em wetlands construídos.

Dessa forma, os resultados discutidos na literatura demonstram que os wetlands construídos representam uma tecnologia com potencial significativo para o tratamento de águas residuárias contendo contaminantes emergentes, especialmente por associarem processos naturais de remoção a uma proposta mais sustentável de tratamento. No entanto, os estudos também deixam claro que sua aplicação demanda atenção às características do sistema, ao tipo de contaminante e às limitações de desempenho observadas para determinados compostos, o que evidencia a necessidade de aprofundamento técnico e de avanços na otimização dessa tecnologia.

Considerações Finais

A análise dos estudos permitiu verificar que os wetlands construídos constituem uma alternativa relevante no tratamento de águas residuárias com presença de contaminantes emergentes, especialmente por aliarem capacidade de remoção e proposta ambientalmente mais sustentável. A literatura revisada também mostra que essa tecnologia tem apresentado resultados promissores para diferentes classes de compostos, o que reforça sua importância no cenário atual do saneamento e da proteção dos recursos hídricos.

Ao mesmo tempo, os trabalhos analisados indicam que ainda existem limitações associadas à variabilidade de desempenho entre os contaminantes e às condições de aplicação dos sistemas. Dessa forma, conclui-se que os wetlands construídos possuem grande potencial de uso, mas seu avanço depende do aprimoramento técnico e da ampliação de estudos que favoreçam sua aplicação de forma mais segura e eficiente.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio institucional recebido e aos docentes do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária pela contribuição acadêmica ao desenvolvimento deste trabalho.

Referências

HOU, Y.; REN, B.; LI, X.; BUQUE, A. L.; ZHAO, Y. Constructed wetlands for emerging pollutants removal: A decade of advances and future directions (2014–2024). *Journal of Water Process Engineering*, v. 69, 2025.

KUSHWAHA, A.; GOSWAMI, L.; KIM, B. S.; LEE, S. S.; PANDEY, S. K.; KIM, K.-H. Constructed wetlands for the removal of organic micropollutants from wastewater: Current status, progress, and challenges. *Chemosphere*, v. 360, 2024.

RAVIKUMAR, Y.; YUN, J.; ZHANG, G.; ZABED, H. M.; QI, X. A review on constructed wetlands-based removal of pharmaceutical contaminants derived from non-point source pollution. *Environmental Technology & Innovation*, v. 26, 2022.

SÁNCHEZ, M.; RUIZ, I.; SOTO, M. The Potential of Constructed Wetland Systems and Photodegradation Processes for the Removal of Emerging Contaminants—A Review. *Environments*, v. 9, n. 9, 2022.

EFICIÊNCIA DE FUNGOS DA PODRIDÃO BRANCA DO GÊNERO *TRAMETES* NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE MADEIREIRA

1 Barbara T. Shiga, 2 Vitoria M. Shiga, 3 Orlando de C. Junior, 4 Mário A. A. Cunha, 5 Lucas M. Abreu, 6 Juliana F. S. Daniel

1Universidade Tecnológica Federal (UTFPR), Câmpus Londrina, e-mail: bshiga@alunos.utfpr.edu.br; 2Universidade Tecnológica Federal (UTFPR), Câmpus Londrina, e-mail: vitoriashiga@alunos.utfpr.edu.br; 3Universidade Tecnológica Federal (UTFPR), Câmpus Londrina; 4Universidade Tecnológica Federal (UTFPR), Câmpus Pato Branco; Universidade Federal de Viçosa (UFV); 6Universidade Tecnológica Federal (UTFPR), Câmpus Londrina, e-mail:julianafeisouza@gmail.com

Palavras-chave: *Trametes;* efluente; biorremediação

Introdução

A indústria madeireira gera efluentes com elevada carga poluente, resultantes principalmente das etapas de processamento e tratamento da madeira. Embora o setor de painéis apresente menor consumo hídrico em comparação a indústrias de celulose e papel (TOCZYŁOWSKA-MAMIŃSKA,2017), ainda há geração significativa de efluentes ao longo do processo produtivo (KLOCH; TOCZYŁOWSKA-MAMIŃSKA,2020).

Durante o tratamento hidrotérmico, ocorre a solubilização de compostos orgânicos, como lignina, taninos e fenóis, contribuindo para o aumento da demanda química de oxigênio (DQO) e da presença de substâncias recalcitrantes e potencialmente tóxicas (VEK; OVEN; POLJANŠEK,2016). Compostos fenólicos possuem anéis aromáticos com grupos hidroxila, favorecendo reações redox e danos celulares (MICHALOWICZ; DUDA,2007). Os taninos também interferem em processos metabólicos (SCALBERT,1991), enquanto a lignina pode originar compostos fenólicos mais reativos após degradação POKHREL; (VIRARAGHAVAN,2004). Nesse contexto, a biorremediação com fungos da podridão branca, como o gênero *Trametes*, destaca-se pela produção de enzimas ligninolíticas capazes de degradar compostos aromáticos complexos (OCHOA-OCAMPO et al., 2025).

Este estudo teve como objetivo avaliar o potencial de dois fungos ligninolíticos do gênero *Trametes* na biorremediação de efluente de madeireira, com foco na degradação da lignina e redução de compostos fenólicos. Foram analisados a produção da enzima oxidativa lacase, a redução de fenólicos totais, alterações por UV-Vis e a caracterização físico-química do efluente.

Material e Métodos

Amostra e microrganismos

O efluente foi fornecido por uma indústria de processamento mecânico de madeira no sudoeste do Paraná e coletado em garrafas PET de 2 L diretamente do escoamento do tratamento hidrotérmico, sendo depois armazenado adequadamente.

Os fungos JUMAD 75 e JUMAD 84, isolados de ambiente natural pelo grupo Quimibio, foram incorporados à micoteca do laboratório e posteriormente identificados como *Trametes cingulata* e *Trametes sanguinea* por sequenciamento molecular e análise filogenética. A identificação foi realizada no Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Cultivo em meio sólido

A capacidade de crescimento de *T. cingulata* e *T. sanguinea* foi avaliada em meio sólido com diferentes concentrações de efluente (50–100%). Para 100%, utilizou-se ágar com glicose; nas demais, meio BDA. A inoculação foi feita com discos miceliais de 5 mm, em triplicata. As placas foram incubadas a 28 °C por 5 dias. O crescimento foi medido pelo diâmetro das colônias e comparado ao controle (BDA sem efluente).

Cultivo em meio líquido para degradação do efluente

Os fungos foram previamente reativados em placas contendo meio BDA, incubadas a 28 °C por 7 dias. Em seguida, cinco discos miceliais (5 mm de diâmetro) foram transferidos para frascos Erlenmeyer de 125 mL contendo 40% de meio mínimo de Vogel (VOGEL,1956), 60% de efluente, 2,5 g L^{-1} de $CuSO_4$ e 3 g L^{-1} de extrato de levedura-dextrose (1% m/v), adicionado após autoclavagem. O pH foi ajustado para 6.

Os cultivos foram mantidos sob agitação (180 rpm), a 28 °C, por 16 dias (SOUZA DANIEL et al.,2025). Após o período de incubação, as amostras foram centrifugadas a 6000 rpm por 15 minutos. O sobrenadante foi coletado, armazenado em microtubos e mantido sob congelamento para análises posteriores. A biomassa micelial foi lavada com água destilada e armazenada para análises futuras.

Atividade de lacase

A atividade de lacase foi determinada usando ABTS como substrato. A mistura reacional (1 mL) continha 775 µL de água destilada, 50 µL de ABTS (0,05 M), 150 µL de tampão citrato-fosfato (0,25 M, pH 3) e 25 µL do extrato enzimático bruto. Após incubação a 50 °C por 5 minutos, a absorbância foi medida a 420 nm (ε_{420} = 36.000 M^{-1} cm^{-1}) (BOURBONNAIS; PAICE,1990).

Análises espectroscópicas (UV-Vis)

As análises foram realizadas em espectrofotômetro UV-Vis com cubetas de quartzo (1 cm), usando água destilada como branco e varredura de 200 a 800 nm. As amostras foram centrifugadas (3000 rpm, 15 min), ajustadas para pH 7,6 com ácido sulfúrico e diluídas quando necessário. As leituras foram feitas antes e após o tratamento para avaliar alterações espectrais associadas à remoção de compostos cromóforos (MENEGUZZI,2024).

Análises físico-químicas

As análises físico-químicas foram realizadas para caracterizar o efluente antes e após tratamento.

A demanda química de oxigênio (DQO) foi determinada por método colorimétrico, com digestão a 150 °C por 2 horas, seguida de leitura a 600 nm (MORENO-CASILLAS et al.,2007).

A turbidez foi medida em turbidímetro digital previamente calibrado (APHA; AWWA; WEF,2017), enquanto a cor foi determinada por espectrofotometria a 465 nm, após centrifugação e diluição das amostras (APHA; AWWA; WEF,2017).

Os compostos fenólicos totais foram quantificados pelo método de Folin-Ciocalteau, com leitura a 740 nm. Os resultados foram expressos em mg L^{-1} de equivalentes de ácido gálico (APHA,2005).

Resultados e Discussão

Crescimento em meio sólido

O crescimento radial dos fungos foi avaliado em função da concentração de efluente. Observou-se ausência de crescimento nas concentrações de 80% e 100%, indicando elevada toxicidade nessas condições. Em contrapartida, o maior desenvolvimento micelial foi registrado na concentração de 60%, sugerindo que esse valor representa um limite de tolerância mais favorável para os isolados.

Esse comportamento pode ser atribuído à presença de compostos fenólicos e derivados da lignina, que, em elevadas concentrações, exercem efeito inibitório sobre o crescimento fúngico, interferindo em processos metabólicos essenciais (POINTING,2001).

Atividade de lacase

A atividade de lacase manteve-se elevada na presença do efluente, com 20,18 U mL^{-1} para *T. sanguinea* e 22,91 U mL^{-1} para *T. cingulata*, valores próximos aos controles, indicando ausência de inibição significativa do metabolismo oxidativo.

Esse comportamento é consistente com estudos com compostos xenobióticos, nos quais a atividade máxima atingiu 10,7 U mL^{-1} em meio com corante RR 239, em comparação a 8,1 U mL^{-1} no controle (SOUZA DANIEL et al.,2025).

A lacase tem papel central na degradação de compostos aromáticos, catalisando a oxidação de fenóis e promovendo a formação de radicais livres que levam à desestruturação de polímeros como a lignina (KUNAMNENI et al.,2008) (BALDRIAN, 2006)

Análise UV-Vis

Na Figura 01, pode-se observar que o espectro do efluente bruto apresentou uma banda de absorção em aproximadamente 280 nm, característica de compostos aromáticos, como lignina e seus derivados. Após o tratamento, verifica-se uma redução significativa na intensidade dessa banda, indicando a degradação parcial desses compostos.

Essa diminuição está associada à transformação estrutural de moléculas aromáticas promovida por enzimas ligninolíticas (POKHREL; VIRARAGHAVAN,2004). Adicionalmente, mecanismos de biossorção pela biomassa fúngica podem contribuir para a remoção de compostos cromóforos presentes no efluente (POINTING,2001).

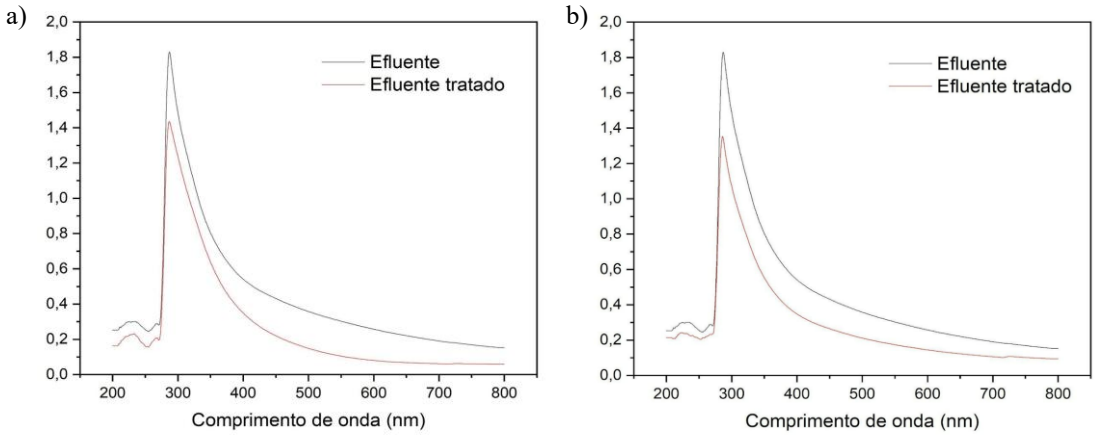


Figura 01 - a) UV-Vis do efluente antes e após o tratamento com *T. sanguinea* b) Uv-Vis do efluente antes e após o tratamento com *T. cingulata*
Fonte: Próprio Autor (2026)

Análises físico-químicas

A DQO inicial do efluente bruto foi de 12.192 mg O_2 L^{-1}, evidenciando elevada carga orgânica. Após diluição (60%), o valor inicial foi de 9.272,35 mg O_2 L^{-1}. O tratamento resultou em reduções de 25% para *T. sanguinea* e 48% para *T. cingulata*.

Esses valores são inferiores aos frequentemente reportados na literatura para fungos ligninolíticos, os quais podem atingir maiores eficiências de remoção dependendo das condições operacionais e da composição do efluente (POINTING,2001) (POKHREL; VIRARAGHAVAN,2004). Essa diferença pode ser atribuída à elevada carga orgânica inicial e à presença de compostos recalcitrantes, especialmente derivados da lignina, que apresentam maior resistência à degradação biológica.

Por outro lado, a remoção de compostos fenólicos foi de aproximadamente 70% para ambos os fungos, valor consistente com estudos que relatam elevada eficiência na degradação desses compostos por sistemas ligninolíticos (BALDRIAN,2006). Essa eficiência está diretamente relacionada à ação de enzimas oxidativas, especialmente a lacase. Resultados semelhantes foram relatados por Valenzuela et al. (2010), que observaram remoções entre 60 e 85% de fenóis totais em efluentes da indústria de celulose, ainda que com concentrações iniciais inferiores. Esse paralelo reforça a relevância do desempenho dos fungos em cenários de elevada carga fenólica.

A turbidez foi significativamente reduzida, atingindo 80% para T. *sanguinea* e 85% para T. *cingulata*. Da mesma forma, observou-se diminuição expressiva da cor, com reduções de 46% e 50%, respectivamente, evidenciando a remoção de compostos cromóforos. Esses resultados indicam que, além da biodegradação, ocorre também a biossorção de partículas e moléculas orgânicas pela biomassa fúngica, processo amplamente descrito para fungos de podridão branca (POINTING,2001).

De forma integrada, os resultados mostram que a atividade de lacase está associada à redução de compostos fenólicos e da absorbância em 280 nm, indicando degradação enzimática de compostos aromáticos. A diminuição de cor, turbidez e DQO reforça a atuação de biodegradação e biossorção. Contudo, a DQO residual sugere a presença de compostos recalcitrantes, indicando a necessidade de tratamentos complementares (POKHREL; VIRARAGHAVAN, 2004).

Considerações Finais

Os fungos do gênero *Trametes* demonstraram potencial na biorremediação de efluente madeireiro, promovendo redução de compostos fenólicos, cor e turbidez. A manutenção da atividade de lacase indica a atuação de mecanismos enzimáticos na degradação de compostos aromáticos. Entre os isolados, *T. cingulata* apresentou maior eficiência na redução da carga orgânica. Apesar da redução parcial da DQO, os resultados evidenciam a viabilidade do uso desses fungos como alternativa sustentável, podendo ser associados a tratamentos complementares.

Agradecimentos

Agradecemos à UTFPR, ao laboratório multiusuário do campus Londrina e ao técnico Thiago Andrade pelo suporte.

Referências

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21. ed. Washington, D.C., 2005.

APHA; AWWA; WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23. ed. Washington, D.C., 2017.

APHA; AWWA; WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater: método 2120 C – cor*. 23. ed. Washington, D.C., 2017.

BALDRIAN, P. Fungal laccases: occurrence and properties. *FEMS Microbiology Reviews*, v. 30, n. 2, p. 215–242, 2006.

BOURBONNAIS, R.; PAICE, M. G. Oxidation of non-phenolic substrates: an expanded role for laccase in lignin biodegradation. *FEBS Letters*, v. 267, n. 1, p. 99–102, 1990.

KLOCH, M.; TOCZYŁOWSKA-MAMIŃSKA, R. Toward optimization of wood industry wastewater treatment in microbial fuel cells: mixed wastewaters approach. *Energies*, v. 13, p. 263, 2020.

KUNAMNENI, A. et al. Laccases and their applications: a patent review. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 77, p. 1–12, 2008.

MENEGUZZI, D. *Biorremediação de um efluente da indústria de laminados de madeira pelo fungo Trichoderma koningiopsis*. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2024.

MICHALOWICZ, J.; DUDA, W. Phenols – sources and toxicity. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 16, n. 3, p. 347–362, 2007.

MORENO-CASILLAS, H. A. et al. Electrocoagulation mechanism for COD removal. *Separation and Purification Technology*, v. 56, n. 2, p. 204–211, 2007.

OCHOA-OCAMPO, M. A. et al. Trametes polyzona as a source for bioremediation and industrial applications: a systematic review. *Journal of Fungi*, 2025.

POINTING, S. B. Feasibility of bioremediation by white-rot fungi. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 57, n. 1–2, p. 20–33, 2001.

POKHREL, D.; VIRARAGHAVAN, T. Treatment of pulp and paper mill wastewater: a review. *Science of the Total Environment*, v. 333, n. 1–3, p. 37–58, 2004.

SCALBERT, A. Antimicrobial properties of tannins. *Phytochemistry*, v. 30, n. 12, p. 3875–3883, 1991.

SOUZA DANIEL, J. F. et al. Trametes cingulata: a white rot fungus in decolorization of azo dye Reactive Red 239. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2025.

TOCZYŁOWSKA-MAMIŃSKA, R. Limits and perspectives of pulp and paper industry wastewater treatment: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 78, p. 764–772, 2017.

VALENZUELA, S. V. et al. Evaluation of tertiary treatment by fungi, enzymatic and photo-Fenton oxidation on the removal of phenols from a kraft pulp mill effluent. *Water Science and Technology*, v. 62, n. 10, p. 2379–2385, 2010.

VEK, V.; OVEN, P.; POLJANŠEK, I. Review on lipophilic and hydrophilic extractives in tissues of common beech. *Drvna Industrija*, v. 67, p. 85–96, 2016.

VOGEL, H. J. A convenient growth medium for Neurospora (Medium N). *Microbial Genetics Bulletin*, v. 13, p. 42–43, 1956.

OTIMIZAÇÃO DA DESCOLORAÇÃO DO VERDE DE MALAQUITA POR *BACILLUS CEREUS* IMOBILIZADO EM NANOFIBRAS DE POLI(ADIPATO DE BUTILENO-CO-TEREFTALATO) (PBAT)

1 Vitória M. Shiga, 2 André M. S. S. Dias, 3 Juliana F. S. Daniel, 4 Elisângela Corradini
1 UTFPR, e-mail: vitororiashiga@alunos.utfpr.edu.br; 2 UEL, e-mail: andremssdias@gmail.com; 3 UTFPR, e-mail: julianafeisouza@gmail.com; 4 UTFPR, e-mail: elisangela.corradini@hotmail.com

Palavras-chave: Biorremediação; *Bacillus cereus*; Verde de malaquita

Introdução

A indústria têxtil é uma das principais poluidoras de corpos d'água, sendo responsável por 17–20% da poluição hídrica global devido ao uso de corantes sintéticos (Saravanan *et al*., 2016). O verde de malaquita (VM), um corante catiônico da classe dos trifenilmetanos, causa danos neurológicos, hepáticos e renais, além de reduzir a fotossíntese em ecossistemas aquáticos (Raval *et al.*, 2016). Métodos convencionais de remoção de corantes apresentam limitações como alto custo e geração de lodo (Ozacar e Keskin, 2023). A biorremediação surge como alternativa eficiente e de baixo custo (Adane, 2021). *Bacillus cereus*, bactéria Gram-positiva formadora de endósporos resistentes (Shinagawa, 1990), é capaz de descolorir corantes, e sua imobilização confere vantagens como reutilização e maior resistência ambiental (San *et al*., 2014). A eletrofiação produz nanofibras com alta área superficial e porosidade, ideais para fixação bacteriana e formação de biofilme (Sarioglu *et al*., 2017). O uso do polímero biodegradável poli(adipato de butileno-co-tereftalato) (PBAT) confere sustentabilidade ao sistema (Wei *et al*., 2019). Assim, este trabalho avaliou a eficiência de *Bacillus cereus* imobilizado em nanofibras de PBAT na descoloração do verde de malaquita.

Material e Métodos

Materiais

O polímero PBAT foi fornecido pela BASF. Os solventes diclorometano (DCM) e ácido fórmico (AF) 98% foram adquiridos da Êxodo Científica e Panreac, respectivamente. O corante VM foi obtido da Dinâmica Química Contemporânea. A cepa *Bacillus cereus* group UELAsF2.2 foi cedida pela Profa. Dra. Daniele Sartori (UEL, Brasil).

Eletrofiação das nanofibras de PBAT

As nanofibras de PBAT foram preparadas por eletrofiação conforme Silva (2024). O PBAT foi dissolvido na concentração de 10% (m/V) em mistura de DCM e AF na proporção 9:1 (v/v). A solução foi agitada por 2h à temperatura ambiente. Os parâmetros de eletrofiação foram: voltagem de 15 kV, vazão de 1 mL/h e distância agulha-coletor de 14 cm. O coletor foi revestido com papel alumínio e o processo durou 3h. As nanofibras obtidas foram secas à temperatura ambiente.

Cultivo e imobilização de *Bacillus cereus*

Bacillus cereus foi cultivado em placas de Petri por 24 h. Então a massa bacteriana foi suspensa em solução salina (NaCl 0,89%) até turbidez equivalente à escala de McFarland 2 (≈6×10^8 UFC/mL) (Mahesh *et al.*, 2025). O meio de cultura utilizado continha extrato de levedura (0,5%), peptona (1%) e NaCl (1%), autoclavado a 120 °C por 15 min. Para a imobilização, as nanofibras de PBAT (massa conforme Tabela 01) foram adicionadas ao meio contendo 1 mL do inóculo bacteriano e mantidas sob agitação de 140 rpm a 34 °C por 3 dias (San *et al*., 2014).

Ensaio de descoloração do verde de malaquita

Após a imobilização, os biocompósitos (PBAT/*B. cereus*) foram transferidos para novo meio contendo o corante VM nas concentrações estabelecidas no planejamento experimental (Tabela 01). Os ensaios foram conduzidos sob agitação de 180 rpm a 37 °C por até 96 h. Alíquotas foram coletadas em intervalos pré-definidos e centrifugadas. A absorbância do sobrenadante foi medida em espectrofotômetro UV-Vis no comprimento de onda de 620 nm (Raval *et al*., 2016). A porcentagem de descoloração foi calculada por:

$$Descoloração\ (\%) = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100$$

Planejamento experimental Box-Behnken

O processo de descoloração foi otimizado utilizando delineamento Box-Behnken, com três fatores em três níveis: tempo (48, 72 e 96 h), concentração de corante (10, 50 e 90 mg/L) e massa de fibra (5, 8 e 11 mg) (Tabela 01). A matriz consistiu de 15 ensaios, incluindo 12 pontos fatoriais e triplicata do ponto central. A porcentagem de descoloração foi a resposta analisada. Os dados foram ajustados a um modelo polinomial de segunda ordem por regressão múltipla (software Minitab 19). A significância dos termos foi avaliada por ANOVA ($p < 0,05$). As condições ótimas foram determinadas por análise de superfície de resposta.

Tabela 01: Níveis dos parâmetros para o planejamento Box-Behnken.
Fonte: Autoria própria (2026)

Parâmetro	Nível inferior	Nível médio	Nível superior
Tempo (h)	48	72	96
Concentração de MG (mg/L)	10	50	90
Massa de fibra (mg)	5	8	11

Resultados e Discussão

Biorremediação do verde de malaquita usando PBAT/*Bacillus cereus* group UELAsF2.2

Os resultados dos experimentos seguindo o delineamento Box-Behnken para o sistema com VM são apresentados na Tabela 02.

Tabela 02: Resultados do ensaio de biorremediação utilizando PBAT/*Bacillus cereus* group UELAsF2.2.
Fonte: Autoria própria (2026)

Nº do Experimento	Fatores			Resposta
	Tempo (h)	Massa (mg)	Concentração (mg/L)	% Descoloração (Y)
1	48	5	50	78,45
2	96	5	50	80,49
3	48	11	50	84,27
4	96	11	50	83,25
5	48	8	10	97,1
6	96	8	10	98,14
7	48	8	90	73,53
8	96	8	90	60,61
9	72	5	10	82,4
10	72	11	10	97,58
11	72	5	90	54,54
12	72	11	90	73,85
13	72	8	50	76,81
14	72	8	50	72,93
15	72	8	50	82,23

Fatores	Valores Reais		
	-1	0	1
X1: Tempo de Descoloração (h)	6	15	24
X2: Massa de Fibra (mg)	5	8	11
X3: Concentração de Corante (mg/L)	10	50	90

A ANOVA para a porcentagem de descoloração (Tabela 02) indicou que o modelo linear foi o mais adequado, apresentando significância estatística (valor-p < 0,0001; F = 22,29 > 5). A falta de ajuste não foi significativa (valor-p = 0,5049; F = 1,31 < 5).. O coeficiente de determinação (R^2 = 0,8587) indica que 85,9% da variabilidade da resposta é explicada pelo modelo.

Tabela 03: ANOVA para a porcentagem de descoloração do VM utilizando PBAT/*Bacillus cereus*.
Fonte: Autoria própria (2026)

Fonte	Soma dos Quadrados	df	Quadrado da Média	Valor-F	Valor-p
Modelo	1834	3	611,33	22,29	< 0,0001
A-Tempo	14,74	1	14,74	0,5374	0,4788
B-Massa	231,88	1	231,88	8,45	0,0143
C-Concentração	1587,38	1	1587,38	57,87	< 0,0001
Resíduos	301,75	11	27,43		
Falta de Ajuste	258,11	9	28,68	1,31	0,5049
Erro Puro	43,64	2	21,82		
Cor Total	2135,75	14			

A equação do modelo em termos de fatores codificados foi:

$$Y(\%Descoloração) = 79{,}75 - 1{,}36 \cdot A + 5{,}38 \cdot B - 14{,}09 \cdot C$$

onde A = tempo (h), B = massa de fibra (mg) e C = concentração de corante (mg/L). Os coeficientes indicam que a concentração do corante exerce forte efeito negativo sobre a descoloração (coeficiente -14,09), enquanto a massa de fibra apresenta efeito positivo (coeficiente +5,38). O tempo de descoloração não apresentou significância estatística (valor-p = 0,4788; F = 0,54 < 5), indicando que, na faixa estudada (48–96 h), este fator não é determinante para a resposta.
Dentre os três fatores, a concentração de corante foi a mais influente, com contribuição percentual de 86,6% para a explicação dos dados, calculada por:

$$\%Contribuição = \frac{SS_{fator}}{\Sigma SS_{fatores}} \times 100 = \frac{1587{,}38}{1834} = 86{,}6\%$$

A relação inversamente proporcional entre concentração de corante e eficiência de descoloração está bem documentada na literatura (El-Bendary *et al.*, 2023). O diagrama de correlação (Figura 01) evidenciou forte correlação negativa entre concentração de corante e porcentagem de descoloração (r = -0,862). O tempo e a massa de fibra apresentaram correlações baixas com a resposta.

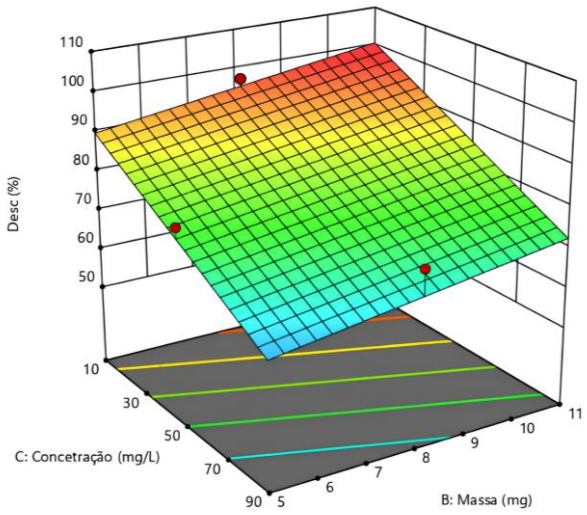


Figura 01: Diagrama de correlação entre os fatores estudados e a porcentagem de descoloração para o sistema de biorremediação do VM.
Fonte: Autoria própria (2026)

Utilizando o software Design Expert 13, realizou-se a otimização do processo com foco na maximização da porcentagem de descoloração. O tempo foi minimizado devido à sua não significância estatística, enquanto massa de fibra e concentração foram mantidas dentro da faixa experimental. A condição ótima encontrada foi: tempo de 53,6 h, massa de fibra de 11 mg e concentração de corante de 16 mg/L, resultando em uma descoloração prevista de 98,1% e desejabilidade (desirability) de 0,954. O experimento de validação conduzido sob a condição ótima resultou em 98,0% de descoloração, demonstrando excelente concordância com o valor previsto pelo modelo (diferença de apenas 0,1%), o que valida a robustez do modelo estatístico. Nas mesmas condições, o ensaio utilizando apenas nanofibras de PBAT (sem bactérias imobilizadas) alcançou descoloração máxima de 58,15%, indicando que a imobilização de *Bacillus cereus* proporcionou um incremento de 39,85% na eficiência de

Considerações Finais

O biocompósito PBAT/*Bacillus cereus* foi eficiente na descoloração do verde de malaquita. Utilizando o delineamento Box-Behnken, foi possível otimizar o processo identificando a concentração de corante como o fator mais influente, com contribuição de 86,6% para o modelo. A condição ótima obtida foi: tempo de 53,6 h, massa de fibra de 11 mg e concentração de corante de 16 mg/L, alcançando 98,1% de descoloração prevista e 98,0% confirmada experimentalmente. O modelo linear mostrou-se adequado ($R^2 = 0,8587$; $p < 0,0001$), com falta de ajuste não significativa ($p = 0,5049$). A validação experimental demonstrou excelente concordância com o valor previsto, confirmando a robustez do modelo. O sistema PBAT/*Bacillus cereus* é promissor para aplicações no tratamento de efluentes têxteis, combinando alta eficiência, biodegradabilidade e o uso de uma metodologia de otimização estatística que permite maximizar a descoloração com mínimo de experimentos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UTFPR e ao Laboratório Multiusuário do campus Londrina pelo suporte estrutural e técnico.

Referências Bibliográficas

ADANE, T. Textile Industry Effluent Treatment Techniques. Journal of Chemistry, v. 2021, 2021.

DA SILVA, Raul Pirolli *et al.* Electrospun Membrane for Media Filters: A Review. Macromolecular Symposia, v. 413, n. 6, p. 2400078, dez. 2024.

EL-BENDARY, Magda A. *et al.* Efficient malachite green biodegradation by Pseudomonas plecoglossicide MG2: process optimization, application in bioreactors, and degradation pathway. Microbial Cell Factories, v. 22, n. 1, p. 192, 2023.

MAHESH, P. P. *et al*. McFarland Standards-Based Spectrophotometry Method for Calculating Approximate Multiplicity of Infection for an Obligate Intracellular Bacterium Anaplasma phagocytophilum. Microorganisms, v. 13, n. 3, p. 662, 2025.

OZACAR, Sevgi; KESKIN, Nalan Oya San. Development of reusable and long-term storable bacteria attached nanofiber mats for highly efficient removal of Cr(VI) and reactive dye from wastewater. Environmental Engineering Research, v. 29, n. 1, p. 230036, 2023a.

RAVAL, N. P. *et al.* Malachite green "a cationic dye" and its removal from aqueous solution by adsorption. Applied Water Science, v. 6, n. 3, p. 275–288, 2016.

SAN, N. O. *et al*. Reusable bacteria immobilized electrospun nanofibrous webs for decolorization of methylene blue dye in wastewater treatment. RSC Advances, v. 4, p. 32249–32255, 2014.

SARAVANAN, R. *et al.* Classification and impact of synthetic textile dyes on aquatic flora: a review. ScienceDirect, 2016.

SARIOGLU, Omer Faruk *et al*. Bacteria encapsulated electrospun nanofibrous webs for remediation of methylene blue dye in water. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, v. 152, p. 245–251, 2017a.

SHINAGAWA, K. Analytical methods for Bacillus cereus and other Bacillus species. International Journal of Food Microbiology, v. 10, n. 2, p. 125–141, 1990.

WEI, Bolei *et al*. Morphology and Properties of a New Biodegradable Material Prepared from Zein and Poly(butylene adipate-terephthalate) by Reactive Blending. ACS Omega, v. 4, n. 3, p. 5609–5616, 2019.

OTIMIZAÇÃO DA INICIALIZAÇÃO DO PROCESSO DE DESAMONIFICAÇÃO UTILIZANDO LODO NITRIFICANTE E RETENÇÃO DE BIOMASSA COM MEIO SUPORTE

[1]Jaqueline Klem Bohrer, [2]Carolina Rucks, [3]Telmo Josiel Teles, [4]Fabiane Goldschmidt Antes, [5]Airton Kunz
[1] Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e-mail: jaquelinekbohrer@gmail.com; [2] Instituto Federal Catarinense, e-mail: carolrucks.cr@gmail.com; [3] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: telmotelles@gmail.com; [4,5] Embrapa Suínos e Aves, e-mail: fabiane.antes@embrapa.br; e-mail: airton.kunz@embrapa.br

Palavras-chave: Anammox; Nitritação parcial; Digestato suinícola.

Introdução

A expansão da suinocultura tem resultado no aumento expressivo da geração de resíduos orgânicos, especialmente em áreas com elevada concentração de produção animal. Nesse contexto, a digestão anaeróbia destaca-se como uma alternativa eficiente para o tratamento desses resíduos, possibilitando seu aproveitamento energético a partir do biogás (CIBIOGÁS, 2022). Entretanto, o digestato gerado apresenta elevadas concentrações de nitrogênio amoniacal e reduzido teor de carbono orgânico, o que limita sua eficiência de tratamento por processos biológicos convencionais. Sua aplicação direta no solo, frequentemente adotada em áreas rurais, pode resultar em impactos ambientais relevantes, sobretudo em regiões com acúmulo excessivo de nutrientes (Sun et al., 2024).

Diante desse contexto, torna-se indispensável a adoção de tecnologias eficientes voltadas à remoção de nitrogênio. Convencionalmente, esse processo é realizado por rotas biológicas, especialmente pela combinação de nitrificação e desnitrificação (Arumugham et al., 2024). Entretanto, tais abordagens apresentam limitações relevantes, como a necessidade de adição de fonte externa de carbono orgânico (atuando como doador de elétrons na etapa de desnitrificação), elevado gasto energético com aeração e significativa produção de lodo. Essas restrições tornam os processos convencionais pouco eficientes e, muitas vezes, economicamente desfavoráveis quando aplicados a efluentes com baixa disponibilidade de matéria orgânica, como o digestato suinícola (Qian et al., 2022).

Nesse cenário, o processo de desamonificação surge como uma alternativa promissora, ao integrar a oxidação parcial do amônio a nitrito (NO_2^-), mediada por bactérias oxidantes de amônia (BOA), com a posterior conversão diretamente em gás (N_2) e pequena fração de nitrato (NO_3^-) por meio da oxidação anaeróbia do amônio (anammox). Por se tratar de uma via autotrófica, esse processo apresenta vantagens expressivas em relação aos métodos convencionais, incluindo a dispensa de fonte externa de carbono, a redução significativa da produção de lodo (podendo atingir até 90%) e a diminuição do consumo energético com aeração em até 60% (Bonassa et al., 2021).

Embora apresente elevado potencial, a aplicação do processo anammox em escala real ainda é limitada por desafios operacionais, especialmente na partida dos reatores. A biomassa anammox é composta por microrganismos autotróficos de crescimento extremamente lento, com tempo de duplicação na faixa de 8 a 11 dias, além de apresentar elevada sensibilidade a variáveis ambientais como temperatura, pH e à presença de compostos inibidores, como amônia livre e ácido nitroso (Fu et al., 2023; Parde et al., 2024). Além disso, a disponibilidade de biomassa específica para inoculação ainda é restrita, dificultando a aplicação em larga escala.

Nesse contexto, a utilização de fontes alternativas de inóculo, como o lodo nitrificante, tem sido investigada como estratégia promissora para viabilizar o processo (Miao et al., 2020; Tang et al., 2025). Paralelamente, a incorporação de meio suporte em reatores biológicos tem se destacado como uma alternativa capaz de aumentar a retenção de biomassa, favorecer a formação de biofilmes e criar microambientes que beneficiam a coexistência de diferentes grupos microbianos, incluindo bactérias anammox (Han et al., 2024; Popova et al., 2025). Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar a inicialização e a operação de um reator de desamonificação inoculado exclusivamente com lodo nitrificante e operado com meio suporte, visando à remoção de nitrogênio do digestato de dejetos suínos.

Material e Métodos

Sistema experimental

Um reator do tipo EGSB confeccionado em vidro foi operado em escala laboratorial, com volume útil de 1 L, mantido à temperatura de 35 °C. O sistema operou sob regime contínuo de aeração, alimentação e recirculação ($2\times Q_{in}$). O fornecimento de ar foi realizado por meio de uma bomba de ar (A230, Big Air) acoplada a um difusor, sendo a vazão de ar controlada por rotâmetro (Gilmont, GF-9260).

O reator foi inoculado exclusivamente com lodo nitrificante proveniente de uma lagoa de nitrificação integrante do Sistema de Tratamento de Dejetos Suínos (SISTRATES®, (Cândido et al., 2022), utilizando-se uma fração correspondente a 15% (v/v) do volume útil do reator. O lodo de inóculo apresentou concentração de sólidos suspensos totais (SST) de 17,63 ± 0,18 g L^{-1} e sólidos suspensos voláteis (SSV) de 12,33 ± 0,04 g L^{-1}. Adicionalmente, o reator foi preenchido com 20% (v/v) de meio suporte constituído por resíduo de polipropileno, visando favorecer a retenção da biomassa.

Caracterização do efluente

O digestato utilizado foi coletado em um reator UASB localizado na Estação de Tratamento de Dejetos Suínos (ETDS) da Embrapa Suínos e Aves, Concórdia, Santa Catarina, Brasil (27°18′S, 51°59′W). As principais características físico-químicas foram: sólidos totais (ST) de 10,08 ± 0,10 g L^{-1}; sólidos voláteis (SV) de 5,77 ± 0,60 g L^{-1}; carbono orgânico total (COT) de 3,96 ± 0,15 g L^{-1}; nitrogênio amoniacal ($N–NH_3$) de 1,20 ± 0,50 g L^{-1}; alcalinidade de 4,40 ± 0,20 g $CaCO_3$ L^{-1}; e pH de 8,30 ± 0,01. Para alimentação do reator, o digestato foi diluído a uma concentração de aproximadamente 0,20 g $N–NH_3$ L^{-1}.

Coeficientes estequiométricos

Os coeficientes estequiométricos do processo de desamonificação foram determinados por meio de balanço de massa, considerando as concentrações das espécies nitrogenadas ($N–NH_3$, $N–NO_2^-$ e $N–NO_3^-$), a alcalinidade e o volume de ar fornecido ao sistema, conforme a metodologia proposta por Strous et al. (1998). Os valores obtidos foram comparados com a estequiometria teórica descrita por Shi et al. (2017), conforme apresentado na Equação 01.

$$NH_4^+ + 0{,}85\ O_2 \rightarrow 0{,}44\ N_2 + 0{,}11\ NO_3^- + 1{,}43\ H_2O + 1{,}14\ H^+ \quad (01)$$

Métodos analíticos

As análises foram realizadas conforme os procedimentos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2023), com adaptações previamente validadas para as condições laboratoriais. As concentrações de $N-NH_3$, $N-NO_2^-$ e $N-NO_3^-$ foram determinadas por método colorimétrico utilizando um sistema de análise por injeção em fluxo (modelo 2500, Fialab Instrument, Seattle, EUA). A alcalinidade foi determinada em um titulador automático (modelo 848 Titrino Plus, Metrohm, Herisau, Suíça), enquanto o carbono orgânico total foi quantificado em analisador específico (TOC-LCPH/CPN, Shimadzu, Kyoto, Japão). Os parâmetros pH e oxigênio dissolvido (OD) foram monitorados diretamente no reator por meio de equipamentos portáteis (HI 8424, Hanna, para pH, e 200A, EcoSense, para OD).

Resultados e Discussão

A evolução temporal das espécies nitrogenadas e da eficiência de remoção de nitrogênio (ERN), apresentada na Figura 01, evidencia mudanças significativas no desempenho do reator ao longo dos 150 dias de operação, refletindo a adaptação da biomassa e a consolidação do processo de desamonificação. Durante os primeiros 41 dias de operação, o reator foi mantido com tempo de retenção hidráulica (TRH) de 8,33 h e com uma carga de nitrogênio aplicada (CNA) de 0,63 ± 0,07 g N L^{-1} d^{-1}, correspondente à fase inicial de adaptação e estabelecimento da biomassa. A partir do dia 42, a CNA foi elevada para 0,83 ± 0,13 g N L^{-1} d^{-1}, enquanto o TRH foi reduzido para 5,95 h, com o objetivo de intensificar a operação do sistema e avaliar seu desempenho sob maiores cargas de nitrogênio.

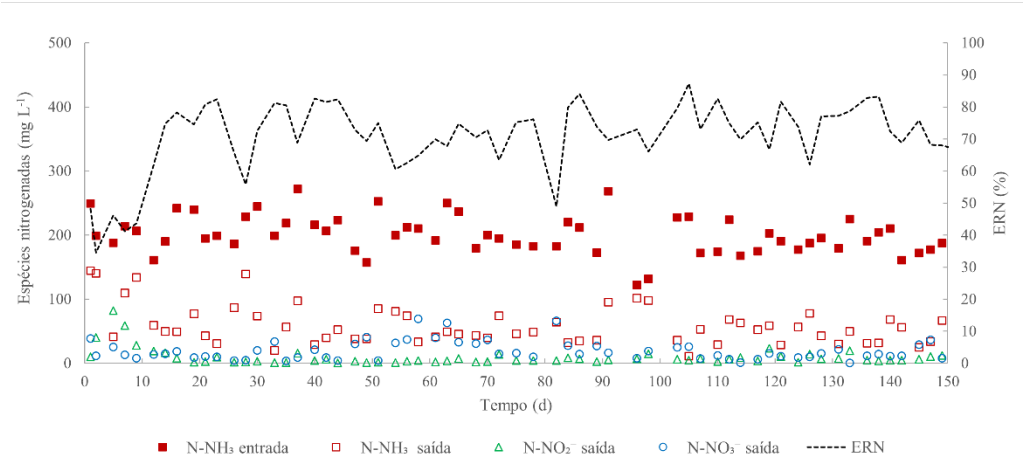


Figura 01: Perfis das espécies nitrogenadas e da eficiência de remoção de nitrogênio (ERN) ao longo de 150 dias de operação.

A partir do dia 2 de operação, observou-se a formação de nitrito (NO_2^-) a partir do amônio (Figura 01), evidenciando o estabelecimento da atividade das bactérias oxidadoras de amônia (BOA) presentes no lodo nitrificante de inóculo. Após cerca de 15 dias a concentração de NO_2^- no efluente permaneceram baixas, indicando consumo rápido desse intermediário. Por outro lado, as concentrações de nitrato (NO_3^-) também se mantiveram relativamente reduzidas, sugerindo que a oxidação completa do nitrito foi limitada. Esse padrão é consistente com a ocorrência de nitritação parcial acoplada ao processo anammox, no qual o nitrito gerado é prontamente consumido pelas bactérias anammox, evitando seu acúmulo no sistema (Van Tendeloo et al., 2021). Nos primeiros dias de operação (0–15 dias), observou-se uma ERN de aproximadamente 50,06 ± 12,71% (Figura 01). Esse comportamento é característico da fase de adaptação microbiológica, na qual a biomassa ainda está se aclimatando às novas condições operacionais impostas (Naufal; Wu, 2024). Durante esse período, a remoção de nitrogênio foi limitada e predominantemente atribuída à atividade nitrificante. A partir de aproximadamente 15 dias de operação, verifica-se um aumento expressivo da ERN, atingindo valores superiores a 70%. A partir do dia 42, com o aumento da CNA e consequente redução do

TRH para 5,95 h, o sistema apresentou elevada eficiência de remoção de nitrogênio, com ERN média de 73,04 ± 7,39%. Esse desempenho indica que a biomassa já se encontrava adaptada, com adequada retenção no reator e atividade metabólica consolidada. Dessa forma, mesmo sob condições operacionais mais intensas, o sistema demonstrou robustez e estabilidade, indicando o estabelecimento efetivo do processo de desamonificação.

A evolução dos coeficientes estequiométricos ao longo do tempo, apresentada na Figura 02, permite uma análise detalhada da transição metabólica do sistema e da consolidação do processo de desamonificação. De modo geral, observa-se que, nos estágios iniciais de operação, os coeficientes calculados apresentaram elevada dispersão em relação aos valores teóricos, indicando que o reator ainda se encontrava em fase de aclimatação.

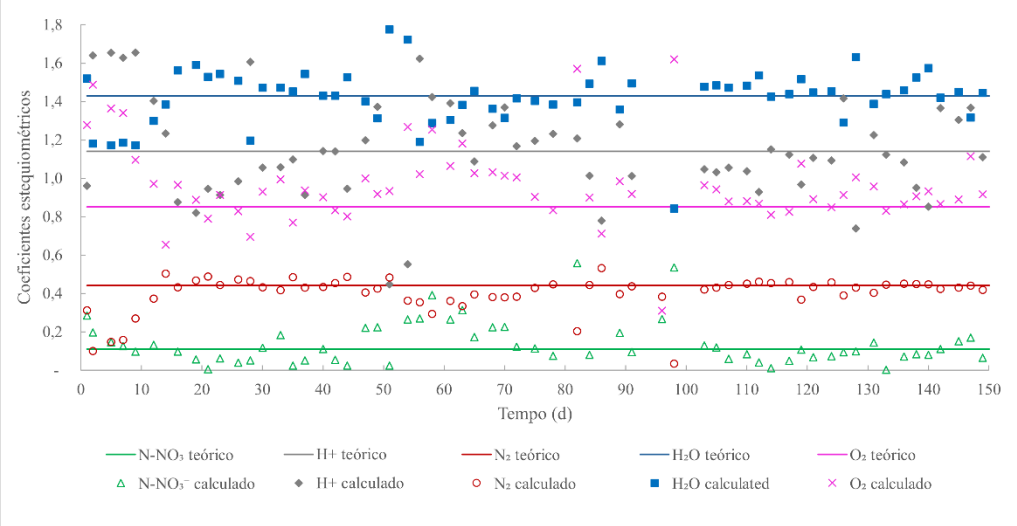


Figura 02: Coeficientes estequiométricos teóricos comparados aos coeficientes calculados ao longo de 150 dias de operação.

Durante os primeiros dias (Figura 02), os coeficientes associados à produção de N_2 e ao consumo de O_2 apresentaram desvios significativos, sugerindo baixa contribuição do metabolismo anammox e maior influência do processo de nitrificação. Entretanto, a aproximação entre os coeficientes calculados e os valores teóricos ocorreu de forma relativamente rápida, com aproximadamente 15 dias de operação. A partir desse período, observa-se uma tendência de estabilização dos coeficientes, onde os valores calculados passaram a oscilar em torno das linhas teóricas. Esse comportamento indica o estabelecimento do metabolismo anammox como via predominante de remoção de nitrogênio no sistema.

De forma geral, o desempenho observado ao longo da operação pode ser atribuído, em grande parte, à presença do meio suporte no reator, que exerceu papel central na retenção de biomassa e na estabilidade do processo. Essa retenção física contribui para o aumento do tempo de retenção celular, aspecto crítico para o estabelecimento e manutenção de microrganismos de crescimento lento, como o anammox (Popova et al., 2025). Além disso, o emprego de meios suportes favorece a formação de biofilmes, criando microambientes com gradientes de oxigênio, nos quais a camada externa favorece a atividade de bactérias oxidadoras de amônia (BOA), enquanto regiões internas, com baixa disponibilidade de oxigênio, permitem o estabelecimento da atividade anammox (Xu et al., 2022).

Considerações Finais

Os resultados demonstram que a combinação de lodo nitrificante como inóculo e a utilização resíduo de polipropileno como meio suporte foi eficaz para promover o rápido estabelecimento do processo de desamonificação, com a transição de um sistema inicialmente dominado pelo processo de nitrificação para o processo de desamonificação. A rápida aproximação dos coeficientes estequiométricos aos valores teóricos, em aproximadamente 15 dias, evidencia a aceleração da inicialização do sistema, atribuída à retenção de biomassa e à formação de biofilme proporcionadas pelo meio suporte. Essa estratégia favoreceu o aumento do tempo de retenção celular, a criação de microambientes adequados e maior estabilidade operacional, resultando em elevada eficiência de remoção de nitrogênio ao longo da operação.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro, assim como à Kemia Tratamento de Efluentes pela parceria no desenvolvimento do projeto.

Referências Bibliográficas

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 24. ed. Washington, DC, United States of America: American Water Works Association, 2023.

ARUMUGHAM, Thilagavathi *et al.* Research trends and future directions on nitrification and denitrification processes in

biological nitrogen removal. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 2, p. 111897, 1 abr. 2024.

BONASSA, Gabriela *et al.* Organic carbon bioavailability: Is it a good driver to choose the best biological nitrogen removal process? **Science of The Total Environment**, v. 786, p. 147390, set. 2021.

CÂNDIDO, Daniela *et al.* Integration of swine manure anaerobic digestion and digestate nutrients removal/recovery under a circular economy concept. **Journal of Environmental Management**, v. 301, p. 113825, 1 jan. 2022.

CIBIOGÁS. **MANUAL PARA CRIADORES DE SUÍNOS Suinocultura e Biogás: Benefícios e Desafios**. **CIBiogás: Energias Renováveis**, 24 out. 2022. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog/manualpara-criadores-de-suinos-suinocultura-e-biogas-beneficios-e-desafios/>. Acesso em: 7 abr. 2026

FU, Yuting *et al.* Advances in the Efficient Enrichment of Anammox Bacteria. **Water**, v. 15, n. 14, p. 2556, jan. 2023.

HAN, Na-Na *et al.* Mechanistic insight into microbial interaction and metabolic pattern of anammox consortia on surface-modified biofilm carrier with extracellular polymeric substances. **Bioresource Technology**, v. 407, p. 131092, 1 set. 2024.

MIAO, Yuanyuan *et al.* An improved start-up strategy for mainstream anammox process through inoculating ordinary nitrification sludge and a small amount of anammox sludge. **Journal of Hazardous Materials**, v. 384, p. 121325, fev. 2020.

NAUFAL, Muhammad; WU, Jer-Horng. Chemomixoautotrophy and stress adaptation of anammox bacteria: A review. **Water Research**, v. 257, p. 121663, 15 jun. 2024.

PARDE, Divyesh *et al.* A review on anammox processes: Strategies for enhancing bacterial growth and performance in wastewater treatment. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 191, p. 105812, jun. 2024.

POPOVA, Polina *et al.* Enrichment of anammox bacteria in up-flow bioreactors enhanced with plastic and rock media: Long-term performance monitoring with fluorescence and specific conductivity. **Bioresource Technology Reports**, v. 29, p. 102081, fev. 2025.

QIAN, Yunzhi *et al.* Control strategy and performance of simultaneous removal of nitrogen and organic matter in treating swine manure digestate using one reactor with airlift and micro-granule. **Bioresource Technology**, v. 355, p. 127199, 1 jul. 2022.

SHI, Zhi-Jian *et al.* Mass transfer characteristics, rheological behavior and fractal dimension of anammox granules: The roles of upflow velocity and temperature. **Bioresource Technology**, v. 244, p. 117–124, 1 nov. 2017.

STROUS, M. *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 50, n. 5, p. 589–596, 27 nov. 1998.

SUN, Yabo *et al.* Synergistic treatment of digested wastewater with high ammonia nitrogen concentration using straw and microalgae. **Bioresource Technology**, v. 412, p. 131406, 1 nov. 2024.

TANG, Bin *et al.* Strategies for efficient enrichment of anaerobic ammonia oxidizing bacteria in activated sludge. **Journal of Environmental Sciences**, v. 151, p. 703–713, maio 2025.

VAN TENDELOO, Michiel *et al.* Oxygen control and stressor treatments for complete and long-term suppression of nitrite-oxidizing bacteria in biofilm-based partial nitritation/anammox. **Bioresource Technology**, v. 342, p. 125996, 1 dez. 2021.

XU, Jinliang *et al.* Partition of Anammox and Nitrifiers Through Bio-Carriers for Full-Scale Sidestream Partial Nitrification–Anammox Plant. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 10, p. 819937, 24 mar. 2022.

TECNOLOGIAS À BASE DE CARVÃO ATIVADO E BIOCHAR PARA REMOÇÃO DE FÓSFORO DE ESGOTO DOMÉSTICO: UMA AVALIAÇÃO DOS DESAFIOS DE AMPLIAÇÃO DE ESCALA

[1]Samara Soares de Sousa, [1]Luís Vinícius Lima Soares, [2]Jacineumo Falcão de Oliveira, [1]Jeferson Ayrton do Carmo Silva, [2]Wilza da Silva Lopes, [3]Thainara de Sousa Antônio

[1]Universidade Federal Rural do Semi-Árido, samara.sousa94347@alunos.ufersa.edu.br, jeferson.silva22222@alunos.ufersa.edu.br, luis.soares@alunos.ufersa.edu.br; [2]Universidade Federal Rural do Semi-Árido, e-mail: jacineumo@ufersa.edu.br, wilza@ufersa.edu.br; [3]Universidade Federal de Viçosa, e-mail: thainara.antonio@ufv.br

Palavras-chave: Adsorção de fosfato; Escalonamento; Revisão sistemática.

Introdução

O fósforo removido de esgotos sanitários sem tratamento adequado não desaparece: acumula-se em corpos hídricos, desencadeia florações de cianobactérias e compromete usos múltiplos da água em concentrações tão baixas quanto 0,1 mg P L^{-1} em ambientes lênticos (Sasabuchi *et al.,* 2023). O mesmo elemento que degrada a qualidade da água é extraído de reservas finitas de rocha fosfática para sustentar a produção agrícola global, reservas com sinais documentados de esgotamento progressivo (Sasabuchi *et al*., 2023). Esse duplo vínculo entre escassez e excesso define o problema do fósforo em esgotos como simultaneamente ambiental e estratégico.

Os métodos convencionais de remoção operam sob condições que raramente são estáveis em escala real. A remoção biológica depende de razões C:P adequadas e de controle preciso das fases anóxica e aeróbia; abaixo de certas concentrações de fosfato, o processo perde rendimento. A precipitação química com coagulantes metálicos é eficiente, mas gera lodo com fósforo imobilizado em formas não recuperáveis e consome reagentes em volumes proporcionais à carga afluente. A adsorção por materiais sólidos contorna essas restrições operacionais: opera sob baixas concentrações de fosfato, permite recuperação do nutriente na dessorção e pode ser integrada a sistemas de tratamento existentes sem alterações estruturais profundas (Taslakyan *et al*., 2023; Mahardika *et al*., 2018).

Entre os materiais investigados para essa função, o carvão ativado granular e o biochar produzido por pirólise de resíduos lignocelulósicos concentram atenção crescente. Ambos combinam área superficial desenvolvida, grupos funcionais superficiais reativos e custos de produção inferiores aos de adsorventes sintéticos de alta pureza (Dai e Hu, 2017; Mahardika et al., 2018). A afinidade natural desses materiais pelo fosfato é limitada pela carga superficial negativa em pH neutro, condição típica de efluentes domésticos secundários. A modificação com óxidos e hidróxidos metálicos, ferro, lantânio, alumínio e compostos do tipo LDH, altera essa condição ao introduzir sítios carregados positivamente capazes de reter o ânion fosfato por complexação superficial ou troca de ligantes (Makita *et al*., 2019; Yin *et al*., 2022; Tao *et al.*, 2025). Essa linha de desenvolvimento não ficou restrita à adsorção clássica: carvão ativado e biochar passaram a ser investigados como substratos em configurações de crescente complexidade operacional, desde colunas de leito fixo e wetlands construídos até sistemas que combinam adsorção com micro-eletrólise ou processos eletroquímicos, o que amplia o espectro de resultados reportados e dificulta comparações diretas entre estudos.

Essa diversificação tecnológica tem um custo metodológico pouco discutido. Quanto mais complexa a configuração experimental, mais variáveis interferem no desempenho reportado e menos transferível é o resultado para condições reais de operação. A literatura sobre carvão ativado e biochar para remoção de fósforo de esgotos é volumosa (Makita *et al*., 2019; Alphonce *et al.,* 2025), mas concentrada em ensaios de batelada com soluções sintéticas de fosfato, pH controlado e ausência dos interferentes que caracterizam um esgoto doméstico real: matéria orgânica dissolvida, sólidos em suspensão, sulfato, carbonato e nitrogênio em frações variáveis. Os parâmetros obtidos nessas condições, capacidade máxima de adsorção, constantes cinéticas, eficiência de remoção, descrevem o comportamento do material em situação ideal, não seu desempenho operacional. Essa distância raramente é quantificada ou discutida de forma sistemática na literatura disponível.

Este estudo buscou avaliar as tecnologias baseadas em carvão ativado e biochar aplicadas à remoção de fósforo de esgotos domésticos, com foco nos desafios metodológicos e operacionais que dificultam a transposição dos resultados experimentais para sistemas de tratamento em escala real.

Material e Métodos

A revisão sistemática da literatura abrangeu o período de 2015 a 2026 e foi conduzida na base Scopus, acessada por meio do Portal de Periódicos CAPES. A estratégia de busca utilizou o critério TITLE-ABS-KEY com a seguinte combinação de termos: ("phosphate adsorption" OR "phosphorus adsorption" OR "phosphate removal" OR "phosphorus removal") AND ("activated carbon" OR "granular activated carbon" OR "powdered activated carbon" OR "GAC" OR "PAC") AND ("wastewater" OR "sewage" OR "domestic wastewater" OR "municipal wastewater" OR "effluent") AND ("column" OR "fixed bed" OR "continuous system" OR "reactor" OR "treatment system" OR "constructed wetland" OR "adsorption column" OR "pilot scale" OR "full scale"), resultando em 25 artigos identificados.

Os estudos foram submetidos a dois critérios de exclusão sequenciais: a eliminação de artigos cujo contexto de aplicação era externo ao esgoto doméstico ou municipal, como efluentes de aquicultura, drenagem pluvial e digestato anaeróbio; e a

exclusão de estudos em que o carvão ativado ou o biochar operavam exclusivamente como eletrodo eletroquímico, par galvânico em sistemas de microeletrólise ou suporte biológico, sem função adsortiva direta na remoção de fósforo. Após a triagem, o corpus final foi composto por 18 artigos.

A extração de dados concentrou-se em oito variáveis operacionais: tipo de solução experimental, escala operacional, classe do material adsorvente, avaliação de íons competidores, matéria orgânica, sólidos suspensos, regeneração com ciclos definidos e lixiviação de metais, além da eficiência de remoção reportada. Cada estudo foi classificado individualmente com base nessas variáveis, permitindo a construção das análises comparativas apresentadas nas Figuras 1, 2 e 3.

Resultados e Discussão

Entre os 18 estudos revisados, apenas um operou em escala real plena com efluente doméstico real (Figura 1). Observa-se, ainda, que os estudos conduzidos em batelada utilizam exclusivamente solução aquosa de fosfato, com nenhum estudo nessa configuração empregando efluente real ou efluente sintético formulado. A dominância desse tipo de solução na configuração mais frequente do corpus estabelece o ponto de partida do problema: os parâmetros cinéticos e de equilíbrio que fundamentam a maioria das comparações entre materiais são obtidos sob condições que eliminam por definição os principais interferentes do esgoto doméstico (Alphonce *et al*., 2025; Zhao *et al*., 2020). Esse padrão não é exclusivo da batelada, mas é nela mais pronunciado.

A configuração de reator contínuo concentra exclusivamente estudos com efluente sintético, sem nenhum registro de efluente real nessa escala. Esse dado é relevante porque os reatores contínuos representam, em termos de complexidade operacional, um passo intermediário entre a batelada e a escala piloto. O fato de que todos os estudos nessa faixa recorreram a matrizes formuladas indica que a complexidade operacional crescente não foi acompanhada de maior representatividade da matriz experimental.

A escala piloto é a única configuração que reúne os três tipos de solução simultaneamente, com efluente real presente em três dos seis estudos nessa faixa. A progressão observada ao longo do eixo horizontal, do predomínio da solução aquosa de fosfato nas escalas menores à presença crescente de efluente real nas maiores, sugere que a adoção de matrizes representativas tende a ocorrer apenas quando a complexidade operacional já impõe essa exigência de forma inevitável. A escala real plena, representada por apenas um estudo com efluente genuíno, confirma que essa progressão não avançou o suficiente para consolidar a transição tecnológica que o campo requer.

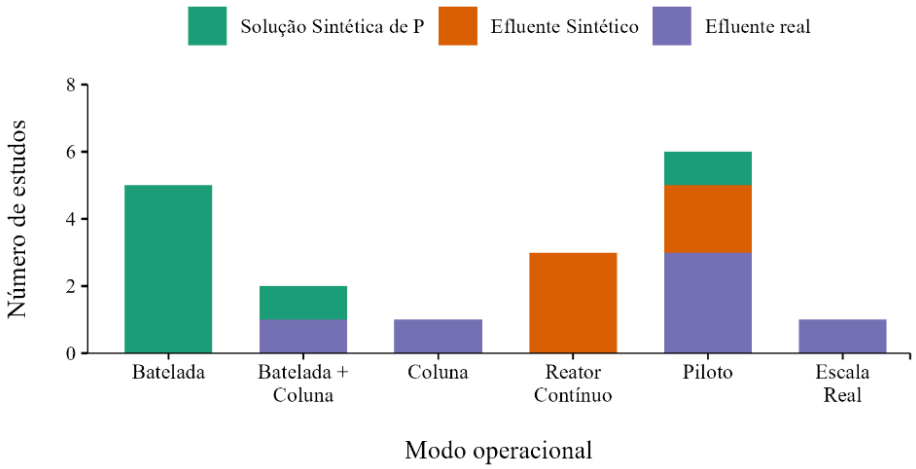


Figura 1. Distribuição dos estudos por tipo de solução e modo operacional (n = 18})

A Figura 2 expõe uma inversão de prioridades metodológicas na literatura revisada. As variáveis com maior cobertura, íons competidores (72%) e matéria orgânica (67%), são exatamente as que podem ser reproduzidas em bancada com adição de sais e substratos sintéticos à solução de ensaio. Em contraste, as variáveis que condicionam diretamente a viabilidade de operação contínua em escala real aparecem sistematicamente negligenciadas: sólidos suspensos (11%), regeneração com ciclos definidos (17%) e lixiviação de metais (33%).

A regeneração foi avaliada em três estudos, com perda de desempenho documentada ao longo dos ciclos em ao menos dois deles (Cuong et al., 2024; Mahardika et al., 2018). Sem dados de regeneração em número de ciclos compatível com operação contínua, qualquer projeção de vida útil do adsorvente e de custo de reposição requer maior avanço nas pesquisas. De forma complementar, a lixiviação de óxidos metálicos de ferro, lantânio e alumínio, investigada em apenas 33% dos casos, representa risco adicional à conformidade do efluente tratado com padrões de descarte ou reúso, aspecto raramente discutido nos estudos revisados.

O gradiente de 72% a 11% observado entre as variáveis avaliadas não reflete sua importância relativa para a operação real, mas a facilidade com que cada uma pode ser incorporada a um protocolo experimental de bancada. Variáveis experimentalmente acessíveis recebem mais atenção do que as operacionalmente decisivas, e esse desequilíbrio se traduz diretamente no hiato entre os resultados reportados em laboratório e o desempenho esperado em sistemas de tratamento plenos.

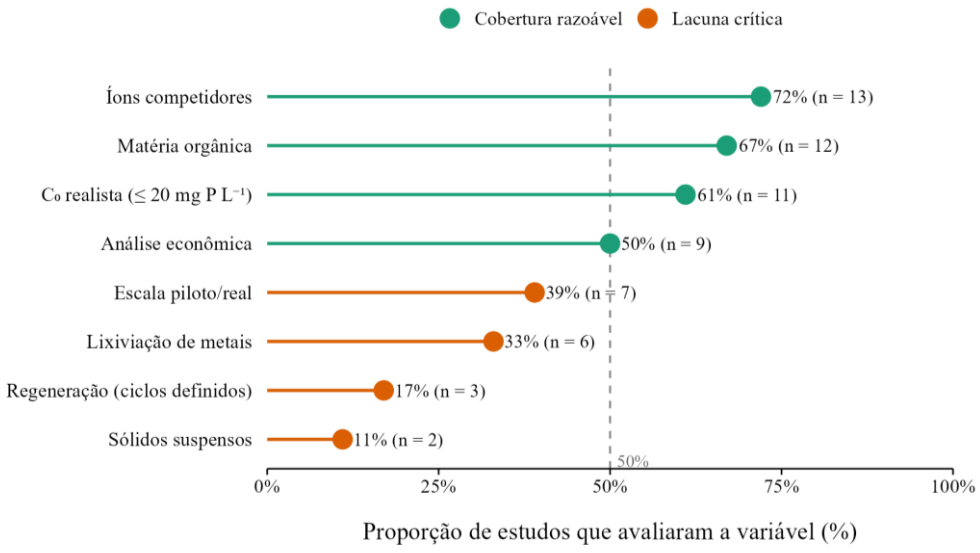


Figura 2. Cobertura de variáveis operacionais críticas nos estudos com adsorção e efluentes

A Figura 3 revela uma contradição no campo: os materiais com modificação metálica, nos quais são reportados os maiores valores de capacidade adsortiva máxima, permanecem concentrados nas escalas de menor complexidade operacional, predominantemente batelada e reator contínuo, com soluções aquosas de fosfato ou efluentes sintéticos formulados. Os materiais sem modificação são os que efetivamente chegaram à zona de aplicação real com efluente real, como evidenciado por Silva e Campos (2022), Mittal *et al.* (2026) e Sugito, Ratnawatie e Afiafani, (2021), todos operando em piloto ou escala plena com esgoto doméstico coletado em campo. Esse padrão indica que sofisticação do material e avanço em escala operacional com matriz representativa caminham em direções opostas na literatura revisada.

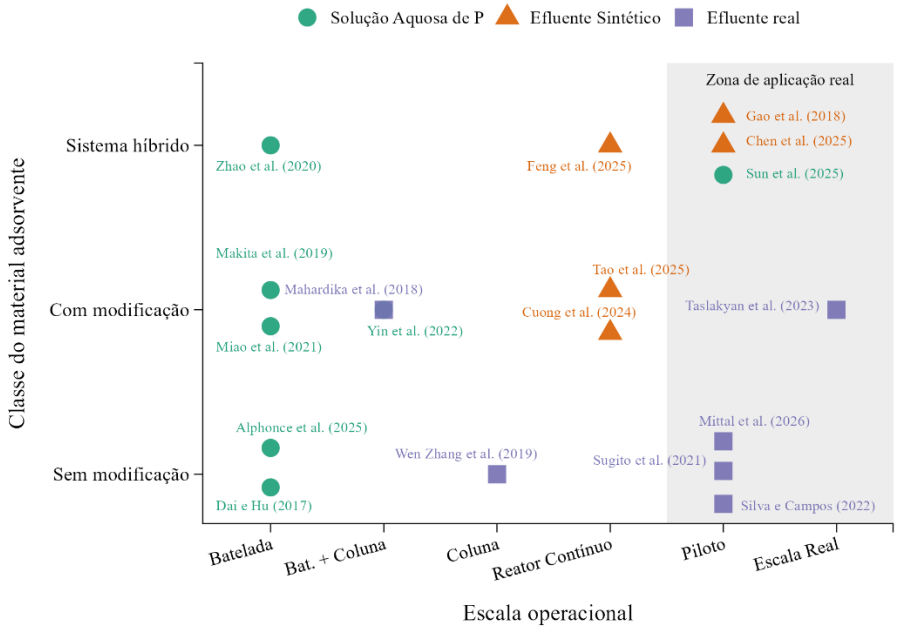


Figura 3. Distribuição dos estudos por classe do material e escala operacional

Os sistemas híbridos atingiram a escala piloto, representados por Gao *et al.* (2018) e Chen *et al.* (2025), mas exclusivamente com efluentes sintéticos formulados. A remoção de fósforo nesses sistemas ocorre predominantemente por precipitação química induzida por ferro liberado eletroquimicamente, não por adsorção clássica (Chen *et al.*, 2025; Gao *et al.,* 2018). A presença desses estudos na zona de aplicação real com efluente sintético reforça um aspecto crítico: atingir escala piloto não equivale a validar o desempenho do adsorvente com efluente real, e o mecanismo predominante de remoção precisa ser considerado na interpretação dos resultados.

A exceção ao padrão é Taslakyan *et al.* (2023), único estudo a combinar material com modificação metálica, efluente municipal genuíno e operação em escala plena a 1.130 m³/dia. Sua posição isolada no quadrante superior direito da figura confirma que essa combinação é tecnicamente viável, mas demonstra que a literatura ainda não avançou sistematicamente nessa

direção. A distância entre os estudos agrupados à esquerda com solução aquosa de fosfato e esse ponto isolado à direita com efluente real sintetiza visualmente o hiato que o conjunto das figuras documenta.

Os estudos com efluente real apresentam variabilidade de desempenho expressivamente maior do que os com solução sintética. As eficiências de remoção variam de 12% em coluna com GAC e efluente de fossa séptica (Zhang *et al*., 2019) a mais de 99% em filtração rápida com efluente de reator UASB (Silva e Campos, 2022), com valores intermediários de 30,87% para carvão ativado isolado (Sugito et al., 2021) e faixa de 21% a 84% em sistema piloto com esgoto doméstico real (Mittal et al., 2026). Os estudos em batelada com solução sintética pura e concentrações elevadas reportam eficiências acima de 80% (Alphonce *et al*., 2025; Yin et al., 2022), mas essa consistência resulta diretamente das condições idealizadas do ensaio. O desempenho cai e se torna menos previsível quando as condições se aproximam do real, como evidenciado por Zhang et al. (2019), cujos autores concluíram que o GAC em coluna com efluente genuíno necessita ser complementado por um filtro de fósforo específico para atingir remoção satisfatória. Essa variabilidade reflete a influência de variáveis que os estudos de bancada suprimem, que a composição iônica instável do efluente, matéria orgânica dissolvida competindo pelos sítios ativos e variação de pH ao longo do tempo de operação.

O que os dados indicam é que a lacuna entre desempenho laboratorial e operacionalização em escala real não será reduzida pelo desenvolvimento de materiais com maior q_{max} em condições idealizadas. O que falta, de forma sistemática, são protocolos que reproduzam as interferências do esgoto real, que avaliem regeneração em número de ciclos compatível com operação contínua e que avancem para escalas progressivamente maiores com efluente coletado em campo.

Conclusão

A revisão demonstra que as tecnologias baseadas em carvão ativado e biochar apresentam potencial técnico documentado para a remoção de fósforo de esgotos domésticos, mas sua aplicação em escala real permanece restrita. Os principais desafios não são de natureza tecnológica, mas metodológica: a literatura concentra os experimentos em condições que favorecem o controle das variáveis, como soluções sintéticas de fosfato, pH ajustado e ausência de interferentes reais, produzindo parâmetros de desempenho que não se sustentam quando as condições se aproximam do esgoto genuíno.

As lacunas identificadas, particularmente a negligência com sólidos suspensos, regeneração em múltiplos ciclos e lixiviação de metais, comprometem a transferibilidade dos resultados para sistemas de tratamento plenos. O avanço para escalas maiores exige protocolos que reproduzam a complexidade do efluente real e que avaliem a continuidade operacional do adsorvente em condições representativas, requisitos que a maioria dos estudos revisados ainda não atende.

Referências

ALPHONCE, F. N. *et al*. Nutrient Recovery Using Short-Circuited Closed Cycle (SCC) Flow Electrode Capacitive Deionization. Environmental Processes, v. 12, n. 33, 2025.

CHEN, C. *et al*. Study on the effect and influencing factors of nitrogen and phosphorus removal from rural wastewater by electrochemically enhanced constructed wetland. Environmental Engineering Research, v. 30, n. 4, 240219, 2025.

CUONG, D. V. *et al.* Unlocking phosphorus recovery potential with layered double hydroxide-decorated activated carbon electrodes in membrane capacitive deionization. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 12, 113676, 2024.

GAO, Y. *et al.* Highly efficient removal of nitrogen and phosphorus in an electrolysis-integrated horizontal subsurface-flow constructed wetland amended with biochar. Water Research, v. 139, p. 301–310, 2018.

LI, X. *et al*. Deep removal of phosphorus from effluent of wastewater treatment plants by nanocomposite adsorbents: a new sight on the influence of dissolved nitrogen and the mechanisms. Sep. and Purification Technology, v. 382, p. 136047, 2026.

MAHARDIKA, D.; PARK, H. S.; CHOO, K. H. Ferrihydrite-impregnated granular activated carbon (FH@GAC) for efficient phosphorus removal from wastewater secondary effluent. Chemosphere, v. 207, p. 527–533, 2018.

MAKITA, Yoji et al. Preparation and phosphate adsorptive properties of metal oxide-loaded granular activated carbon and pumice stone. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 582, p. 123881, 2019.

MITTAL, Y. *et al.* Enhancing treatment performance in electroactive wetlands via innovative conductive channeling: A multi-phase, pilot-scale study. Chemical Engineering Journal, v. 531, 173828, 2026.

SASABUCHI, I. T. M. *et al.* Sustentabilidade no uso de fósforo: uma revisão bibliográfica com foco na situação atual do estado de São Paulo, Brasil. Química Nova, v. 46, n. 2, p. 185-198, 2023.

SILVA, C. P.; CAMPOS, S. X. The effects of anaerobic reactor post-treatments by rapid filtration systems and conventional techniques. Environmental Science and Pollution Research, v. 29, p. 61870-61880, 2022.

SUGITO; RATNAWATI; AFIAFANI. Hybrid Anaerobic Baffled Reactor for Removal of BOD and Phosphate Levels in Domestic Wastewater. Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology, v. 5, n. 1, p. 14-27, 2021.

TAO, M. *et al*. Nitrogen and phosphorus removal in microbial fuel cell-constructed wetland integrated with layered double hydroxides coated filter for treating low carbon wastewater. Journal of Water Process Engineering, v. 70, p. 106907, 2025.

TASLAKYAN, L. *et al*. Biochar-integrated reactive filtration of wastewater for P removal and recovery, micropollutant catalytic oxidation, and negative CO_2e: Life cycle assessment and techno-economic analysis. Water. Env. Res., v. 95, 2023.

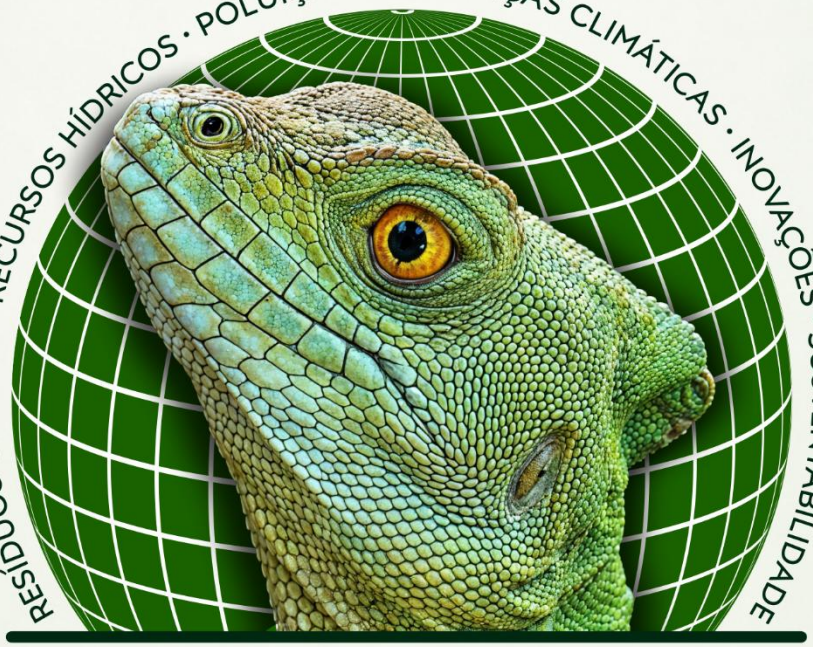
YIN, H. et al. Efficient removal of phosphorus from constructed wetlands using solidified lanthanum/aluminum amended attapulgite/biochar composite as a novel phosphorus filter. Science of the Total Environment, v. 833, p. 155233, 2022.

ZHANG, Wen et al. Evaluation of five filter media in column experiment on the removal of selected organic micropollutants and phosphorus from household wastewater. Journal of environmental management, v. 246, p. 920-928, 2019.

ZHAO, J.; GAO, J.; LIU, J. Preparation of a New Iron-Carbon-Loaded Constructed Wetland Substrate and Enhanced Phosphorus Removal Performance. Materials, v. 13, n. 21, 4739, 2020.

ÁREA TEMÁTICA 33

SANEAMENTO: PLANEJAMENTO, POLÍTICAS PÚBLICAS E LEGISLAÇÃO



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

ABORDAGEM GEOESPACIAL E TEMPORAL DA ADOÇÃO DO PROGRAMA ABC/ABC+ NO ESTADO DE SÃO PAULO (2013-2025)

1 João Vitor da Silva Brito, 2 Angela Terumi Fushita, 3 Victor Fernandez Nascimento
1 Universidade Federal do ABC, e-mail: viittor47@gmail.com; 2 Universidade Federal do ABC, e-mail: angela.fushita@ufabc.edu.br; 3 Universidade Federal do ABC, e-mail: victor.fernandez@ufabc.edu.br

Palavras-chave: Sustentabilidade rural; Política ambiental; Crédito ambiental.

Introdução

O fortalecimento do Plano ABC+ (Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas (2020-2030) está entre as primordiais políticas públicas brasileiras voltadas para a agricultura sustentável, essa política representa uma reformulação do antigo Plano ABC (2010–2020). A nova etapa do planejamento estratégico (2020-2030) expande suas metas, incorporando indicadores ligados às metas nacionais de minimização das alterações climáticas, de acordo com o previsto na Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei nº 12.187/2009). O Plano ABC+ agrega explicitamente a agenda climática do Brasil e alinha-se aos compromissos assumidos no Acordo de Paris, promovendo ações de baixa emissão de carbono no setor agropecuário (Fernandes et al., 2025).

A atividade agropecuária no Brasil é a segunda maior emissora de gases do efeito estufa (GEE). Em 2021, essa atividade minimizou cerca de 631 milhões de toneladas (t) de CO_2eq, o que corresponde a um aumento de 2,2% quando comparada ao ano anterior, para reduzir tais emissões o Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária (Plano ABC) determina a meta de mitigar 1.11 gigatonelada (Gt) de CO_2eq. até 2030, fortalecendo a adoção de sistemas, práticas, produtos e processos de produção sustentável (Silva et al., 2025).

O Plano ABC faz uso de várias ferramentas de política pública para beneficiar os produtores rurais na adoção de técnicas/tecnologias ABC. Uma delas foi a elaboração de uma linha de crédito denominada Programa para Redução da Emissão de GEE na Agricultura (Programa ABC), em 2010. Essa linha de crédito foi fixada no Plano Agrícola e Pecuário (PAP) 2010/2011 pelo Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e admitida pela Resolução do Conselho Monetário (CMN) n° 3.896, de 17 de agosto de 2010, intrinsecamente nos programas com recursos do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), o Programa executou um papel significativo no desenvolvimento nacional, passando a se comprometer de forma expressiva com a mudança de uma agropecuária conservadora para uma mais produtiva e sustentável (Cunha., 2024).

Em conformidade com as metas assumidas na COP 29, que visam mitigação das emissões de GEE e a neutralidade climática até 2050, se faz necessário aperfeiçoar a alocação de recursos financeiros oriundos do Programa ABC/ABC+ para alavancar os impactos positivos dessa política. Para tanto, o presente trabalho teve como objetivo realizar uma abordagem geoespacial e temporal da adoção de financiamentos do Programa ABC/ABC+ no Estado de São Paulo no período de 2013 a 2025.

Material e Métodos

A pesquisa considerou a adoção de financiamentos do Programa ABC/ABC+ no Estado de São Paulo entre os anos 2013 e 2025. A principal fonte de dados foi o banco de dados do Banco Central do Brasil (BCB), para subsidiar a interpretação da concessão e adoção de financiamentos do Programa. Cabe destacar que os dados do BCB foram coletados por meio do próprio site institucional do banco.

Considerando a análise geral do Programa ABC/ABC+ em São Paulo, foram elaboradas duas composições de mapas dos financiamentos por municípios das Regiões Geográficas Intermediárias que se destacaram na adoção do Programa no período 2013-2025, sendo Ribeirão Preto (RGIRP) e São José do Rio Preto (RGISJRP).

Os dados coletados em relação aos financiamentos foram organizados em planilha eletrônica e processado no R Studio para mapear a região do Estado de São Paulo, visando analisar os padrões e tendências numéricas e espaciais. Foi estruturado um banco de dados geográficos no R Studio com posterior organização de um painel de monitoramento (dashboard) em linguagem Python, com a utilização do Sistema de Coordenadas Geográficas Datum SIRGAS 2000, usando vetor do Estado de São Paulo, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024).

Foi elaborada uma composição para a criação dos mapas, através do recurso Lisa Map, com utilização de closters Lisa (High-High, Low-Low, Low-High, High-Low, Não significativo e Missing) e as cores (vermelho, cinza e branco), estabelecendo classes de números inteiros. Apresentando variação anual (2013-2025) dos registros de financiamentos captados pelos produtores.

Resultados e Discussão

Compreendendo o mapeamento da adoção de financiamentos do Programa ABC/ABC+ no Estado de São Paulo entre os anos de 2013 e 2024 (Figura 01), é notório o destaque de duas regiões geográficas intermediárias, as quais ficaram em primeiro e segundo lugar (Ribeirão Preto e São José do Rio Preto, respectivamente), destacaram-se em quase todos os anos, apresentando média anual de ocorrência de adoção de 51 e 14 financiamentos, respectivamente.

Cabe destacar que não foi possível mapear o ano de 2025, devido a não ocorrência de registros de financiamentos para o respectivo ano.

Essas regiões (Ribeirão Preto e São José do Rio Preto), estão inseridas no bioma Cerrado (esse bioma predomina, mas há também remanescentes de Mata Atlântica na primeira região e áreas de transição com a Mata Atlântica na segunda, respectivamente).

Sobressaem-se, em terceiro, quarto, quinto, sexto, sétimo e oitavo lugares, as regiões geográficas intermediárias de Marília (inserida no bioma Mata Atlântica), Bauru (bioma Cerrado), Sorocaba (bioma Mata Atlântica), Presidente Prudente (bioma Mata Atlântica), Campinas (bioma Mata Atlântica) e Araraquara (bioma Cerrado), que apresentaram média anual de adoção de 10, 8, 4, 4, 2 e 1 financiamentos, respectivamente. Em nono e décimo lugares situam-se as regiões de São José dos Campos (bioma Mata Atlântica, com áreas de transição para o Cerrado) e Araçatuba (bioma Cerrado), com um total de apenas 12 e 8 financiamentos, respectivamente, no período de 2013 a 2024.

Já a região de São Paulo (bioma Mata Atlântica), foi a única que não apresentou nenhuma ocorrência de adoção de financiamento voltado para o Programa ABC/ABC+ nos respectivos anos (2013-2024).

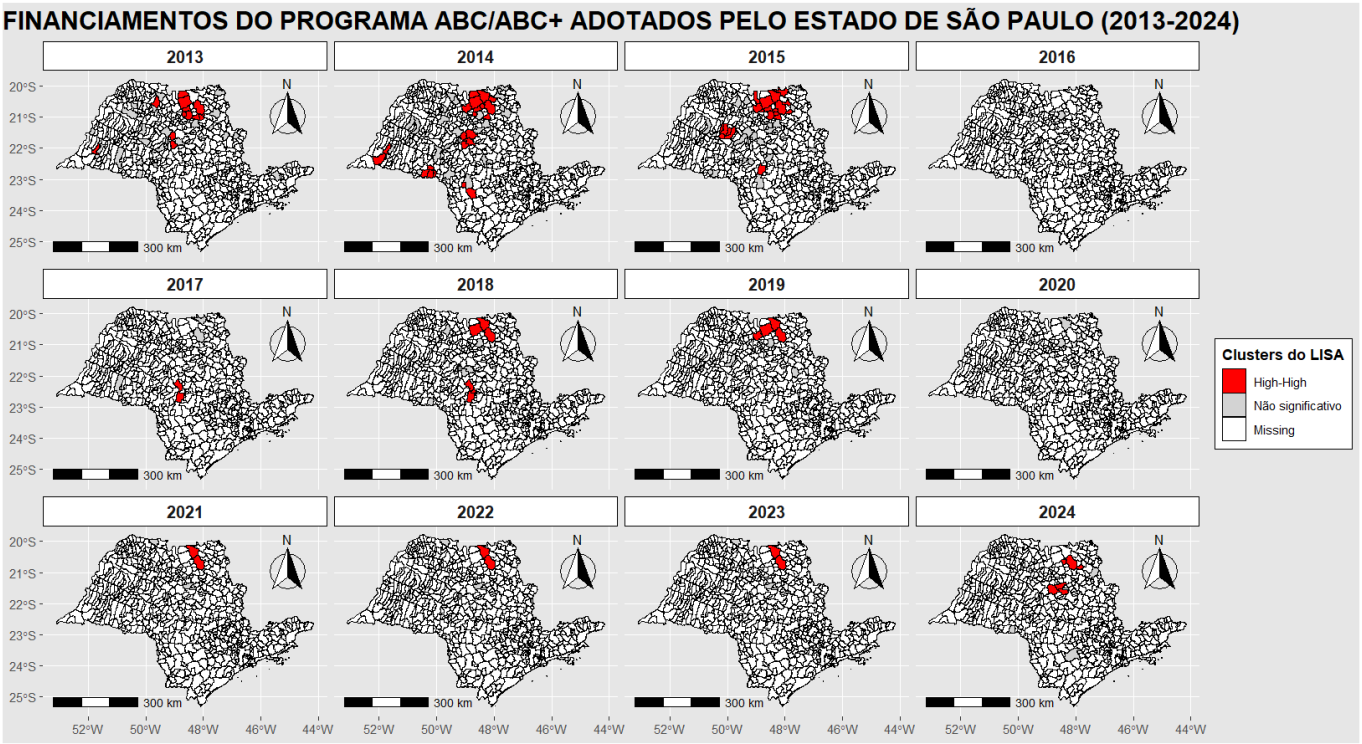


Figura 01. Composição espaço-temporal com relação à quantidade de financiamentos do Programa ABC/ABC+ adotados pelas Regiões Geográficas Intermediárias do Estado de São Paulo (2013-2024).
Fonte: Elaborada pelo autor (2025) com dados do Banco Central do Brasil (2013-2025).

Verificou-se (Figura 01) que, as regiões intermediárias que mais se destacaram foram Ribeirão Preto e São José do Rio Preto, entre 2023 e 2024. Considerando a adoção de financiamentos do Programa ABC/ABC+, o mapeamento das duas regiões geográficas intermediárias, baseados na adoção de financiamentos do Programa ABC/ABC+ entre os anos de 2013 e 2025 são apresentados na Figura 02 e Figura 03.

Analisando o mapa a seguir (Figura 02), destacaram-se os municípios de Morro Agudo, Barretos e Bebedouro, apresentando uma média anual de adoção de 12, 5, e 5 financiamentos entre os anos de 2013 e 2025. Cabe frisar que, o município Morro Agudo realizou adoção em quase todos anos (exceto nos anos 2016, 2020, e 2023). Seguido do município de Guaíra, que apresentou média anual de adoção de 3 financiamentos entre os respectivos anos (2013-2024). Os demais municípios (Jaboticabal, Colina, Nuporanga, Olímpia, Pitangueiras, Batatais, Colômbia, Sales Oliveira, Itápolis, Colômbia, Monte Azul Paulista, Pontal, Igarapava, Ipuã, Ituverava, Jaborandi, Jaboticabal, Pradópolis, Aramina, Miguelópolis, Monte alto, São Joaquim da Barra, Severínia, Cravinhos e Viradouro), apresentaram média anual abaixo de três (3) financiamentos.

Foi nítido o destaque da RGIRP quando comparada às demais regiões, apesar de outras regiões apresentarem potencial agropecuário, como é o caso da RGISJRP (Figura 03).

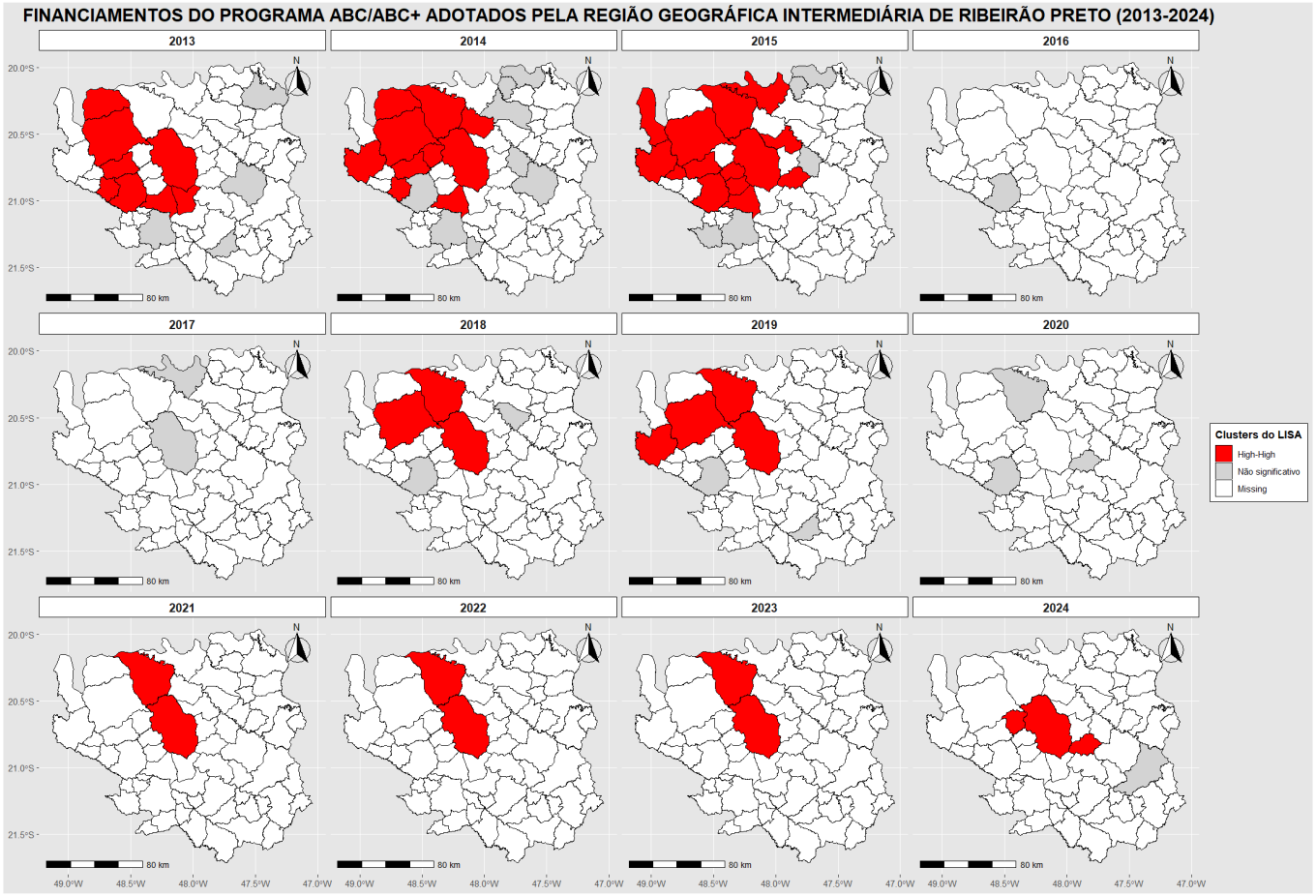


Figura 02. Composição espaço-temporal com relação à quantidade de financiamentos do Programa ABC/ABC+, adotados pelos Municípios da RGIRP (2013-2024).
Fonte: Elaborada pelo autor (2025) com dados do Banco Central do Brasil (2013-2025).

A RGISJRP (Figura 03), é uma região que demonstrou destaque (ficando em segundo lugar) na adoção de financiamentos voltados para o Programa. Essa região é composta por cem (100) municípios, como pode-se observar na Figura 03.

Os municípios com maiores registros de adoção de financiamentos do Programa entre os anos de 2013 e 2015 foram: Nova Granada, Tanabi, Palmeira d'Oeste, Monte Aprazível e Palestina, os quais apresentaram média anual de 5, 5, 4, 4, e 4 financiamentos adotados, respectivamente. Seguido dos municípios de Álvarez Florence, Novo Horizonte, Tabapuã, Catiguá e Santa Fé do Sul, apresentando média anual de 3, 3, 2, 1 e 1 financiamentos adotados, respectivamente, como pode-se observar a seguir (Figura 03).

No ano de 2018, o município de Tanabi foi o único que apresentou adoção de financiamentos, com registro de 5 financiamentos. Já em 2023, os municípios de Cosmorama, Jaci, Álvarez Florence, Riolândia e Guapiaçu demonstraram registros de 10, 10, 8, 6 e 4 financiamentos adotados, respectivamente.

Foi perceptível que não houve ocorrência de adoção de financiamento nos anos de 2016, 2017, 2019, 2020, 2021, 2022, e 2024. Tais taxas podem afetar drasticamente a adesão dos produtores, taxas de juros menores tendem a motivar os produtores a procurar financiamentos para implementar tecnologias sustentáveis, enquanto grandes taxas podem desanimar a adoção devido a extensão dos custos de financiamento.

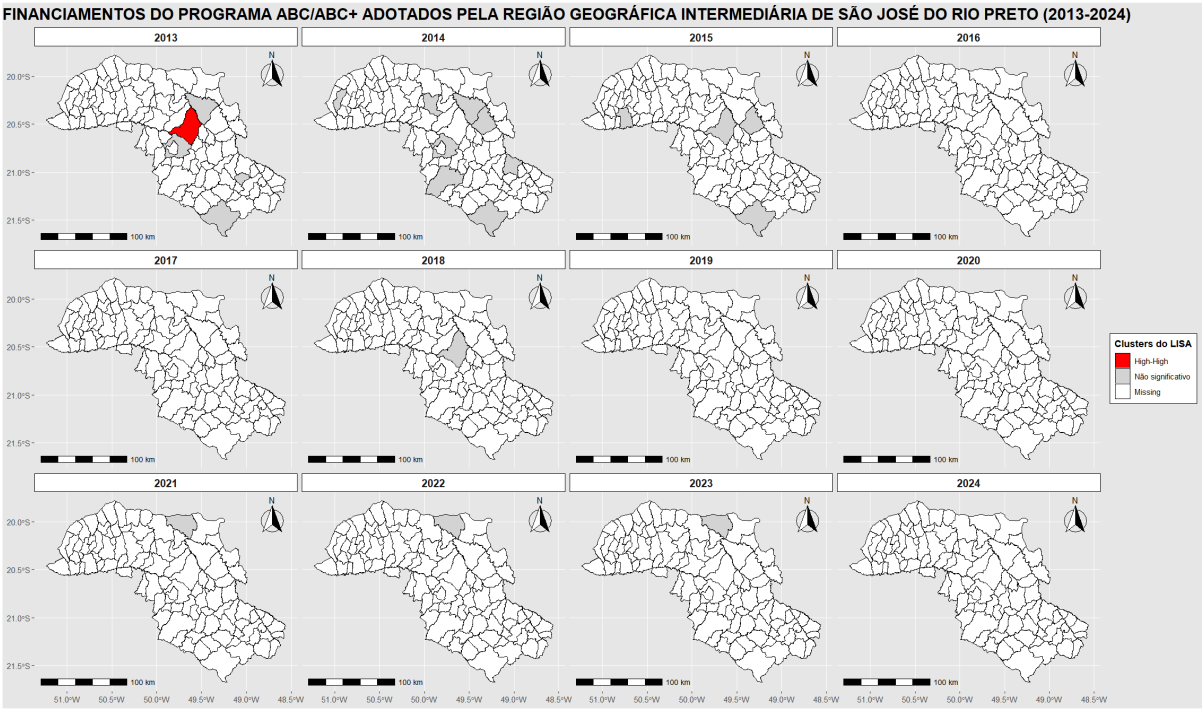


Figura 03. Composição espaço-temporal com relação à quantidade de financiamentos do Programa ABC/ABC+, adotados pelos Municípios da RGISJRP (2013-2024).
Fonte: Elaborada pelo autor (2025) com dados do Banco Central do Brasil (2013-2025).

Considerações Finais

No que se refere à adoção do Programa ABC/ABC+ no Estado de São Paulo, foi perceptível que o Estado já se encontra adotando financiamentos para voltados para a ABC. Em se tratando números de financiamentos e valores de financiamentos oriundos do Programa ABC/ABC+ adotados pelo Estado, foi constatado que a RGIRP e a RGISJRP se destacaram, quando comparada às outras regiões geográficas intermediárias. a RGIRP apresentou valores expressivos e superiores quando comparado a RGISJRP. O Estado de São Paulo encontra-se realizando adoção do Programa, mas, a maior parte da concentração da adoção dos financiamentos encontra-se na RGIRP.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado. Agradecem também à Universidade Federal do ABC (UFABC) pelo suporte institucional e infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

CUNHA, Ana Paula. **Políticas Públicas e Ações de Financiamento Sustentável no Agronegócio Brasileiro**. 2024. 171 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócios) - Universidade de Brasília, Brasília, 2024. Disponível: https://repositorio.unb.br/handle/10482/51783.

FERNANDES, Claudio Roberto.; SANTOS, Erlei. Clementino dos; OLIVEIRA, Hayilton Sebastião de; OLIVEIRA, Tayla. Évellin de. Economia e Educação nas Políticas Públicas para uma Agricultura Sustentável no Brasil. **Revista de Gestão e Secretariado**, *[S. l.]*, v. 16, n. 5, p. e4983, 2025. Doi: 10.7769/gesec.v16i5.4983. Disponível em: https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/4983.

SILVA, Leonardo França da; ROCHA, Genelício Crusoé; CRUSOÉ, Jéssica Mansur Siqueira; SOUZA, Cristiano Marcio Alves de; FRANCO, José Rafael; LIMA, Cássio Furtado; BICALHO, Silvana Ferreira; MINETTE, Luciano José. Balanço de carbono: uma análise comparativa entre cultivos de eucalipto e cana-de-açúcar. **Revista Biotecnologia e Ciência**. 2025. Disponível: https://www.revista.ueg.br/index.php/biociencia/article/view/16335.

BCB - BANCO CENTRAL DO BRASIL. Quantidade e Valor dos Contratos de Custeio Agrícola por Produto, Segmento e IF, 2023. Disponível: https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/reportmicrrural?path=conteudo%2FMDCR%2FReports%2FqvcCusteioAgricolaProdutoSegmentoIf.rdl.

CLASSIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE RESÍDUOS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETAS) EM ITAJAÍ (SC): SUBSÍDIOS PARA O PLANO DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS

Hellen Yasmim Freitas Fernandes[1] José Adriano Kielling[2] Beatriz Lima Santos Klienchen Dalari [3]
[1,3] UNIVALI – Universidade do Vale do Itajaí, [2]SEMASA – Serviço Municipal de Água, Saneamento Básico e Infraestrutura de Itajaí, Santa Catarina, e-mail: [1]hellenfernandes@edu.univali.br

Introdução

As Estações de Tratamento de Água (ETAs) são essenciais para garantir o fornecimento de água de qualidade à população. As ETAs contribuem para o desenvolvimento das cidades, permitindo o uso seguro da água em residências, comércios, indústrias e serviços. Por isso, representam uma parte fundamental da infraestrutura urbana e da preservação dos recursos hídricos (SECKLER, 2017).

Entretanto, o funcionamento dessas unidades implica na geração de resíduos de estações de tratamento de água (RETAs), cuja gestão inadequada configura um problema ambiental de escala global. No contexto brasileiro, embora a legislação vigente estabeleça a obrigatoriedade de tratamento prévio desses resíduos antes de sua disposição em corpos hídricos ou no solo, ainda são observadas lacunas significativas quanto à adoção de práticas adequadas de manejo, refletindo limitações institucionais, operacionais e de conscientização por parte dos sistemas de abastecimento (BERNARDO et al., 2017; DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo realizar a classificação e a quantificação parcial dos resíduos gerados nas ETAs do município de Itajaí (SC), constituindo uma etapa preliminar essencial para o diagnóstico ambiental dessas unidades.

Material e Métodos

Área de estudo

As ETAs estudadas estão localizadas no município de Itajaí (SC), dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí-Açú, conforme demonstrado no mapa da Figura 01.

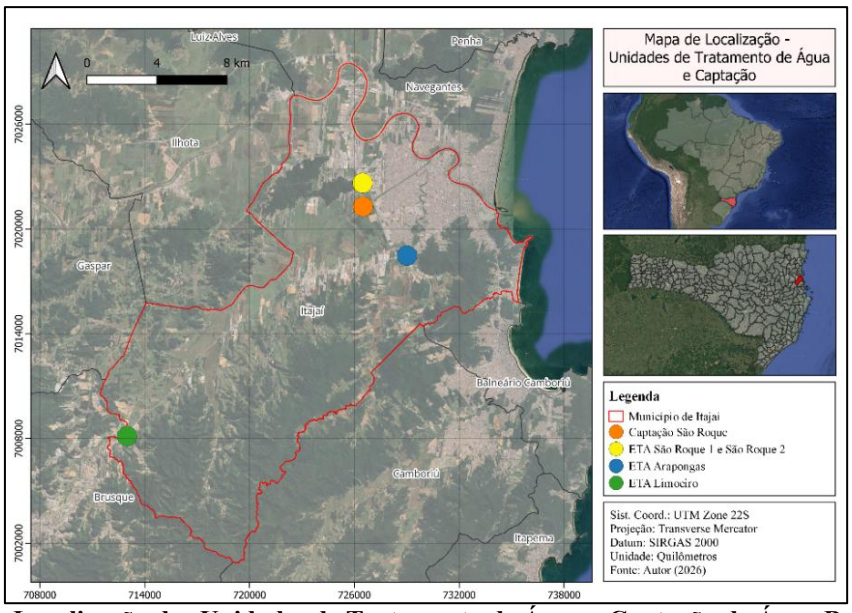


Figura 01 – Mapa de Localização das Unidades de Tratamento de Água e Captação de Água Bruta do Município de Itajaí (SC). Fonte: Autor (2026)

As ETAs São Roque 1 e 2, localizadas no bairro São Roque, são responsáveis pelo atendimento da maior porção da população de Itajaí, além de contribuírem para o abastecimento de parcela do município de Navegantes (SC). Estas ETAs operam com vazão média total de aproximadamente 1.050 L/s de água tratada, sujeita a variações sazonais, tendo sua captação no Rio Itajaí-mirim. A ETA Arapongas, localizada no bairro Canhanduba, atende parte significativa da região sul do município, com vazão média de 150 L/s, sendo abastecida pelo sistema de captação das ETAs São Roque 1 e 2 e transportada por meio de adutora. Já a ETA compacta Limoeiro, no bairro Limoeiro, destina-se ao abastecimento da zona rural do município, operando com vazão média de 10 L/s, utilizando como manancial uma represa artificial localizada na área de implantação da unidade.

As ETAs São Roque 1 e 2, Arapongas e Limoeiro, embora apresentem diferenças quanto à capacidade operacional, localização e origem do manancial, operam com processos de tratamento essencialmente análogos, baseados no sistema convencional de tratamento de água.

Caracterização dos resíduos gerados

Para a identificação e caracterização dos resíduos, foi utilizada a Instrução Normativa nº 13/2012 do IBAMA, que estabelece a Lista Brasileira de Resíduos Sólidos e seus respectivos códigos, permitindo a padronização dos resíduos gerados. A caracterização dos resíduos gerados nas Estações de Tratamento de Água e nas unidades de captação de água bruta do município de Itajaí foi realizada com base nos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 10004:2024 e pela RDC Nº 222/2018 da ANVISA.

Quantificação dos resíduos gerados em laboratórios

Os resíduos sólidos, como embalagens de reagentes, luvas, papéis contaminados e materiais perfurocortantes, foram segregados na fonte e quantificados por meio de pesagens periódicas, utilizando balança devidamente calibrada. Já os resíduos líquidos foram mensurados em volume (litros), com base nos recipientes de armazenamento e no controle de descarte adotado pelas unidades.

Resultados e Discussões

A Tabela 01 evidencia que a gestão de resíduos nas ETAs e unidades de captação é marcada pela predominância de resíduos Classe 1 – Perigosos, conforme a ABNT NBR 10004:2024, principalmente associados às atividades laboratoriais e de manutenção que implica maior rigor no manejo e eleva custos operacionais. A Classificação pela RDC nº 222/2018 indica existência de resíduos químicos (Grupo B), reforçando a necessidade de controle e segregação rigorosa, enquanto os resíduos Classe 2 apresentam potencial de reciclagem, alinhando-se à Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). De tal forma, o diagnóstico realizado e os resultados apresentados na Tabela 01 são fundamentais para identificar pontos críticos de geração de resíduos, de acordo com sua classificação, para possibilitar ações adequadas de manejo, armazenamento e destinação, tornando o gerenciamento de resíduos mais eficiente e tecnicamente embasada.

Tabela 01: Caracterização dos resíduos gerados nas estações de tratamento de água e captação de água bruta, localizadas município de Itajaí (SC). Fonte: Autor (2026)

Composição	Descrição e Código IBAMA IN 13/2012	Classificação (NBR 10004:2024)	RDC Nº 222/2018 - ANVISA
Eletroeletrônicos	Equipamento fora de uso não abrangido em 16 02 09 a 16 02 13 – 16 02 14	Classe 1 – Perigoso	Não aplicável.
Embalagens de reagentes	Embalagens contendo resíduos de substâncias perigosas – 15 01 10 (*)	Classe 1 – Perigoso	Grupo B
Esponja de lavar louças	Resíduos urbanos e equiparados, incluindo misturas de resíduos – 20 03 01	Classe 2 – Não Perigoso	Não aplicável.
Estopas e panos contaminados	Absorventes, materiais filtrantes, panos e vestuário contaminados – 15 02 02	Classe 1 – Perigoso	Não aplicável.
Lâmpadas	Lâmpadas fluorescentes, vapor de sódio e mercúrio – 20 01 21	Classe 1 – Perigoso	Não aplicável.
Lodo	Lodos de clarificação da água – 19 02 02	Classe 1 - Perigoso	Não aplicável.
Luvas e papéis contaminados	Absorventes, materiais filtrantes contaminados – 15 02 02	Classe 1 – Perigoso	Grupo E
Metais	Metais – 20 01 40	Classe 2 – Não Perigoso	Não aplicável.
Óleo de compressor	Óleos de motores, transmissões e lubrificação usados – 13 02 01 (*)	Classe 1 – Perigoso	Não aplicável.
Papel higiênico	Resíduos urbanos mistos – 20 03 01	Classe 2 – Não Perigoso	Não aplicável.
Papel molhado	Papel e cartão – 20 01 01	Classe 2 – Não Perigoso	Não aplicável.
Pilhas alcalinas	Pilhas alcalinas – 16 06 04	Classe 1 – Perigoso	Não aplicável.
Pilhas e baterias	Outras pilhas e acumuladores – 16 06 05	Classe 1 – Perigoso	Não aplicável.
Plástico	Plástico – 20 01 39	Classe 2 – Não Perigoso	Não aplicável.
Plástico (PVC, PEAD)	Plástico – 20 01 39	Classe 2 – Não Perigoso	Não aplicável.
Poeira, areia, folhas, grama	Resíduos de limpeza urbana e varrição – 20 03 0	Classe 2 – Não Perigoso	Não aplicável.
Reagentes Líquidos	Resíduos de produtos químicos analíticos, misturas de solventes ou soluções aquosas contaminadas – 16 05 06 (*)	Classe 1 – Perigoso	Grupo B

Dentre a totalidade dos resíduos identificados, os resíduos provenientes dos laboratórios das ETAs e da unidade de captação de água bruta, ao longo do ano de 2025, totalizaram 180,16 kg de embalagens de reagentes, luvas e papéis contaminados, 17,48 kg de resíduos perfurocortantes e 2.275 L de resíduos líquidos. Observa-se que os resíduos de embalagens de reagentes, luvas e papéis contaminados representam a maior fração em massa dentre os resíduos perigosos, com variações mensais associadas à intensidade das atividades laboratoriais. Por outro lado, a geração de resíduos perfurocortantes apresentou ocorrência pontual, concentrada em meses específicos. A Tabela 02 apresenta estes resultados definidos por cada mês do ano de 2025.

Tabela 02 - Quantitativo dos resíduos gerados nos laboratórios das estações de tratamento de água e laboratório da unidade de captação de água bruta, no ano de 2025. Fonte: Autor (2026)

Mês	Embalagens de reagentes, luvas e papel contaminado (Kg)	Resíduos perfurocortantes (Kg)	Resíduos líquidos (L)
Janeiro	13,54	0	200
Fevereiro	25,6	0	220
Março	9,73	3,5	120
Abril	16,53	0	150
Maio	24,46	4,2	300
Junho	7,4	0	70
Julho	8,85	2,6	165
Agosto	13,72	0	235
Setembro	7,54	2,8	85
Outubro	15,60	0	285
Novembro	24,37	4,38	250
Dezembro	12,82	0	195
TOTAL	**180,16**	**17,48**	**2275**

Considerações finais

Este estudo traz, de forma pioneira na região, a identificação dos resíduos gerados nas ETAs do município de Itajaí, trazendo em foco a geração detalhada dos resíduos gerados nas atividades dos laboratórios das ETAs. Estes resíduos, por constituírem a maior parcela dentre os resíduos perigosos gerados nas ETAs, requerem maior atenção quanto ao manuseio, armazenamento, transporte e destinação final, por conta de seu potencial poluidor.

Durante as análises, foram identificados e classificados 20 resíduos, sendo destes, 10 perigosos. Os resultados apontam que, dentre os resíduos gerados nos laboratórios, as embalagens de reagentes, luvas e papéis contaminados apresentaram variações mensais associadas à intensidade das atividades laboratoriais, totalizando 180,16 Kg, no ano de 2025. Os resultados dos resíduos perfurocortantes indicam ocorrências pontuais, concentradas em meses específicos, totalizando 17,48 kg. Este resultado pontual está associado ao tempo de preenchimento do dispositivo de armazenamento, para posterior destinação. Os resíduos líquidos apresentaram maior uniformidade nos seus resultados, gerando um total de 2.275 L, no ano referenciado.

Os resultados mostram uma considerável variabilidade nos tipos de resíduos gerados nas ETAs de Itajaí, atentando-se a geração significativa de resíduos perigosos gerados em seus laboratórios, o que demanda um diagnóstico preciso para definir o gerenciamento adequado dos resíduos gerados nas ETAs.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos — Classificação. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. *Métodos e técnicas de tratamento de água*. 2. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2005.

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: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. *Métodos e técnicas de tratamento de água*. 2. ed. São Carlos: Rima, 2005.

SECKLER, M. M. *Tratamento de água: concepção, projeto e operação de estações de tratamento*. São Paulo: Blucher, 2017.

MEDIAÇÃO E ARBITRAGEM NA GOVERNANÇA DE RECURSOS HÍDRICOS NA ROTA BIOCEÂNICA COMO INSTRUMENTOS JURÍDICO-INSTITUCIONAIS DE EFETIVAÇÃO DOS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL 6, 10 E 16 DA AGENDA 2030

1 Diego Paiva Colman, 2 Cássio Francisco Machado Neto, 3 Maria Mariana Rodrigues Costa Machado, 4 Lúcio Flávio Joichi Sunakozawa, 5 Alecio Queiroz Ferreira, 6 Bruno Ricarte Granja Montello, 7 Karine Barauna Sampaio dos Anjos, 8 Leide Thaiana Dias da Silva

1 Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, e-mail: diegopaivacolman1@gmail.com; 2 Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, e-mail: cassio_fmachado@hotmail.com; 3 Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, e-mail: maria.maria@ufms.br; 4 Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, e-mail: professor.lucioflavio@gmail.com; 5 Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, e-mail:alecio.ambiental@gmail.com; 6 Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, e-mail: brgm98@gmail.com; 7 Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, e-mail: karine.barauna@hotmail.com; 8 Universidade Católica Dom Bosco, e-mail: leidetdias@gmailcom

Palavras-chave: Mediação; Arbitragem

Introdução

A crescente complexidade dos conflitos envolvendo a gestão de recursos hídricos em contextos de integração regional evidencia a necessidade de instrumentos institucionais capazes de promover soluções cooperativas, sustentáveis e juridicamente eficazes. Nesse cenário, a Rota Bioceânica desponta como importante eixo de articulação territorial, econômica e estratégica entre países sul-americanos, implicando desafios relacionados à governança compartilhada da água e à compatibilização de interesses múltiplos no uso dos recursos naturais, especialmente em bacias hidrográficas transfronteiriças (CAPONERA; NANNI, 2007; SADOFF; GREY, 2005).

A gestão transfronteiriça das águas exige mecanismos que favoreçam a coordenação entre entes estatais, instituições reguladoras e atores sociais, especialmente diante de pressões decorrentes da expansão logística, produtiva e urbana associada aos corredores de integração (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2011).

Nesse contexto, os mecanismos consensuais de resolução de conflitos, especialmente a mediação e a arbitragem, apresentam-se como instrumentos jurídico-institucionais aptos a fortalecer arranjos cooperativos de governança hídrica, contribuindo para a implementação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, 10 e 16 da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas. O presente trabalho tem por objetivo analisar o potencial desses mecanismos consensuais na gestão de recursos hídricos no âmbito da Rota Bioceânica, considerando sua contribuição para o fortalecimento institucional, a redução de assimetrias regionais e a promoção de soluções pacíficas em contextos de disputas sobre o uso da água.

Materiais e Métodos

A pesquisa foi desenvolvida a partir de abordagem qualitativa, com utilização do método dedutivo e da técnica de revisão bibliográfica e documental, centrada na análise de marcos normativos nacionais e internacionais relacionados à governança de recursos hídricos, aos mecanismos consensuais de resolução de conflitos e à Agenda 2030 das Nações Unidas (ONU, 2015).

Foram examinados instrumentos jurídicos vinculados à cooperação internacional em matéria ambiental e hídrica, bem como A legislação brasileira aplicável à gestão das águas, com destaque para a Lei n° 9.433/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (Brasil, 1997), além de estudos técnicos e acadêmicos sobre gestão integrada dos recursos hídricos em contextos transfronteiriços (CAPONERA; NANNI, 2007; TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2011).

Adicionalmente, procedeu-se à análise interpretativa das diretrizes estabelecidas pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 6, 10 e 16, especialmente no que se refere à promoção da gestão sustentável da água, à redução das desigualdades regionais e ao fortalecimento de instituições eficazes e inclusivas (ONU, 2015). O recorte territorial da pesquisa concentrou-se na área de influência da Rota Bioceânica, considerando seu papel estratégico na integração sul-americana e seus impactos potenciais sobre a governança dos recursos hídricos compartilhados.

Resultados e Discussão

A mediação ambiental destaca-se por sua capacidade de fomentar o diálogo e prevenir a escalada de litígios. Já a arbitragem regulatória oferece ambiente decisório especializado relevante em controvérsias envolvendo concessões, saneamento, infraestrutura hídrica e investimentos transnacionais.

Esse paradigma cooperativo de resolução de conflitos foca no consenso com a participação e a racionalidade técnica como papel central. Essa mudança dialoga diretamente com o ODS 16, ao fortalecer instituições eficazes e promover acesso qualificado à justiça.

A análise evidenciou que a ampliação das infraestruturas logísticas associadas à Rota Bioceânica tende a intensificar demandas sobre os recursos hídricos, ampliando a necessidade de mecanismos institucionais capazes de prevenir e solucionar conflitos decorrentes da multiplicidade de usos da água. Nesse contexto, a mediação e a arbitragem configuram instrumentos relevantes para a construção de soluções cooperativas, especialmente em cenários caracterizados por competências compartilhadas e por sobreposição de interesses econômicos, ambientais e sociais.

Observou-se que a mediação favorece a construção de consensos entre atores institucionais e sociais envolvidos na gestão hídrica, promovendo processos decisórios participativos e fortalecendo a legitimidade das políticas públicas relacionadas ao uso da água. Por sua vez, a arbitragem apresenta potencial significativo para a resolução célere e técnica de controvérsias envolvendo entes públicos e privados, especialmente em contextos de cooperação interestatal e de regulação ambiental complexa.

Sob a perspectiva da Agenda 2030, verificou-se que a adoção de mecanismos consensuais contribui diretamente para a efetivação do ODS 6, ao promover formas cooperativas de gestão sustentável dos recursos hídricos; do ODS 10, ao favorecer a redução de assimetrias institucionais e territoriais entre regiões integradas por corredores logísticos internacionais; e do ODS 16, ao fortalecer instituições voltadas à resolução pacífica de conflitos e à promoção da governança participativa. Dessa forma, a incorporação de instrumentos consensuais na gestão hídrica regional revela-se compatível com estratégias contemporâneas de governança multinível orientadas pela sustentabilidade e pela cooperação internacional.

Considerações Finais

A pesquisa demonstrou que a mediação e a arbitragem constituem instrumentos jurídico-institucionais relevantes para o aprimoramento da governança de recursos hídricos no contexto da Rota Bioceânica, especialmente diante da necessidade de compatibilização entre desenvolvimento regional, sustentabilidade ambiental e cooperação interestatal. A adoção de mecanismos consensuais contribui para a prevenção de conflitos relacionados ao uso da água, fortalece a capacidade institucional dos atores envolvidos e amplia as possibilidades de implementação de políticas públicas integradas no âmbito da gestão hídrica transfronteiriça.

Além disso, verificou-se que tais instrumentos apresentam significativa aderência às diretrizes estabelecidas pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 6, 10 e 16, reforçando a importância de soluções cooperativas na consolidação de modelos de governança ambiental orientados pela paz, pela equidade territorial e pela sustentabilidade. Nesse sentido, a incorporação de práticas consensuais na gestão de recursos hídricos configura estratégia relevante para o fortalecimento de processos de integração regional sustentáveis na América do Sul.

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

AGENDA 2030 PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. Organização das Nações Unidas, 2015.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil. Brasília: ANA, edições recentes.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos.

CAPONERA, Dante Augusto; NANNI, Marcella. Principles of Water Law and Administration: National and International. Rotterdam: Balkema, 2007.

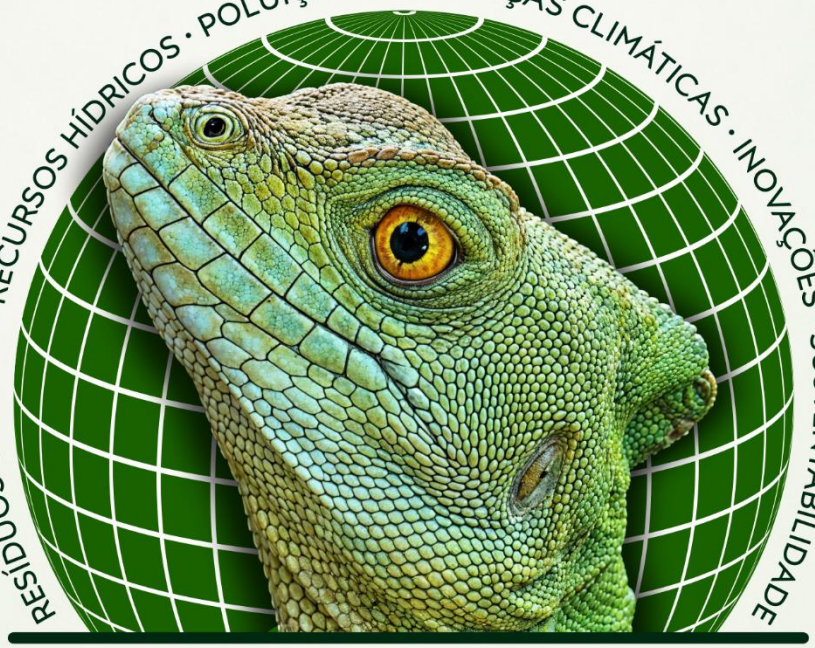
ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: https://brasil.un.org. Acesso em: 1 maio 2026.

SADOFF, Claudia; GREY, David. Cooperation on international rivers: a continuum for securing and sharing benefits. Water International, v. 30, n. 4, 2005.

TUNDISI, José Galizia; MATSUMURA-TUNDISI, Takako. Recursos hídricos no século XXI. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

ÁREA TEMÁTICA 34

SAÚDE PÚBLICA, CONTROLE DE VETORES E SALUBRIDADE AMBIENTAL



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

SANEAMENTO BÁSICO E DENGUE EM MANAUS (AM): ANÁLISE DA VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL EM ÁREAS URBANAS

1 Clíssia Carla Teixeira dos Santos, 2 Cínthia Maria Teixeira Sampaio
1 Centro Universitário Internacional (UNINTER), clissiasantos2020@gmail.com; 2 Universidade Federal do Amazonas (UFAM), cinsampaio404@gmail.com

Palavras-chave: Saneamento básico; Dengue; Vulnerabilidade socioambiental.

Introdução

O saneamento básico constitui um dos principais determinantes da saúde pública, especialmente em contextos urbanos marcados por desigualdades socioespaciais, como o município de Manaus (AM). A deficiência na coleta e destinação de resíduos sólidos, aliada à presença de água parada e à precariedade dos serviços de drenagem urbana, contribui para a formação de ambientes propícios à proliferação do mosquito *Aedes aegypti*, vetor da dengue, configurando um relevante problema no âmbito do controle de vetores e da salubridade ambiental.

Nesse contexto, a dengue destaca-se como uma das principais arboviroses que afetam a população urbana, sendo diretamente influenciada pelas condições ambientais e pela infraestrutura sanitária. Em Manaus, o crescimento urbano desordenado e as limitações na cobertura de serviços de saneamento intensificam a vulnerabilidade socioambiental, favorecendo a ocorrência e a persistência da doença em diferentes áreas da cidade.

Diante desse problema, o presente estudo tem como objetivo analisar a relação entre as condições de saneamento básico e a ocorrência de casos de dengue, com enfoque na identificação de áreas de maior vulnerabilidade socioambiental. A metodologia adotada é de natureza quali-quantitativa, baseada na utilização de dados secundários provenientes da Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), com base no Panorama e no Censo Demográfico de 2022. Os dados serão organizados e analisados por meio de estatística descritiva.

A relevância desta pesquisa reside na necessidade de compreender a relação entre a precariedade do saneamento básico e a dinâmica de transmissão da dengue, evidenciando como fatores ambientais e urbanos contribuem para a proliferação do vetor. Além disso, o estudo possui importância científica e social ao subsidiar reflexões voltadas ao planejamento urbano e às políticas públicas de saúde, com ênfase em estratégias integradas de controle de vetores e melhoria da salubridade ambiental.

Material e Métodos

Foram utilizados dados secundários de dengue provenientes do sistema InfoDengue, desenvolvido pela Fiocruz. A análise baseou-se na série temporal de casos notificados e na taxa de incidência semanal (casos por 100.000 habitantes), bem como nos níveis de alerta epidemiológico (verde, amarelo, laranja e vermelho), que indicam diferentes intensidades de transmissão da doença. Também foram considerados os limiares de incidência definidos pelo sistema (pré-epidêmico, pós-epidêmico e epidêmico) como referência para interpretação da gravidade ao longo do período analisado.

Os dados epidemiológicos foram analisados em escala municipal, em função da indisponibilidade de informação desagregada por bairro em bases públicas. Para complementar a análise e incorporar a dimensão intraurbana, foram utilizados dados do IBGE, com base no Panorama e no Censo Demográfico de 2022, contemplando indicadores de saneamento básico, como abastecimento de água, esgotamento sanitário e manejo de resíduos sólidos.

Ressalta-se que, embora o sistema InfoDengue integre variáveis climáticas em sua modelagem, a presente pesquisa concentrou-se exclusivamente nos dados epidemiológicos, com ênfase na evolução dos casos e sua relação com fatores estruturais urbanos. Os dados foram organizados em figura (gráfico) e analisados por meio de estatística descritiva, permitindo a identificação de padrões e a associação entre as condições de saneamento e a ocorrência da dengue. A abordagem adotada é de natureza descritiva e interpretativa, visando compreender a dinâmica temporal da doença e sua relação com indicadores de vulnerabilidade socioambiental no município.

Para a caracterização do bairro Tarumã, localizado em Manaus, foram utilizados dados secundários provenientes do IBGE (2022). Considerando a ausência de informações desagregadas sobre saneamento básico em nível de bairro, optou-se pela utilização de indicadores domiciliares como variáveis proxy, incluindo número de domicílios, média de moradores por unidade, densidade demográfica e tipologia habitacional. Esses indicadores permitem inferir, de forma indireta, as condições de infraestrutura urbana e sua possível relação com a vulnerabilidade à dengue, especialmente no que se refere à organização do espaço urbano e às condições de habitabilidade.

Resultados e Discussão

A análise da série temporal de dengue em Manaus, com base nos dados do sistema InfoDengue, evidencia variações importantes na incidência da doença ao longo das semanas epidemiológicas entre 2024 e 2026. Observa-se que, no início de 2024, houve um período de elevada incidência, com valores próximos ao limiar epidêmico (9,8 casos por 100.000 habitantes), acompanhado da predominância do nível de alerta vermelho, indicando alta transmissão e situação crítica. Esse comportamento sugere um cenário favorável à proliferação do vetor, possivelmente associado a condições ambientais propícias, como temperatura e umidade elevadas no Gráfico 1.

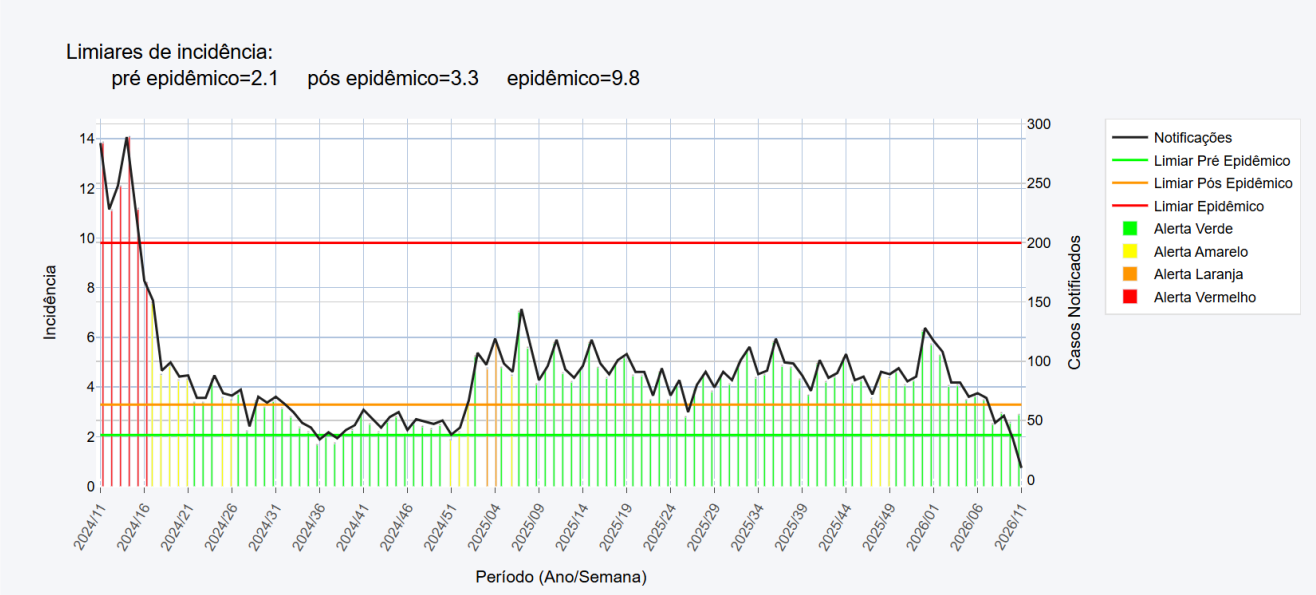


Gráfico 1 – Evolução semanal dos casos e da incidência de dengue com níveis de alerta em Manaus (2024–2026). Fonte: InfoDengue, desenvolvido pela Fundação Oswaldo Cruz.

Após esse pico inicial, verifica-se uma redução expressiva da incidência, com predomínio do nível de alerta verde ao longo de grande parte de 2024, indicando condições menos favoráveis à transmissão e maior controle da doença. No entanto, ao longo de 2025, observa-se uma oscilação nos níveis de incidência, com períodos intercalados entre os níveis verde, amarelo e laranja, evidenciando momentos de aumento da transmissão, ainda que sem atingir novamente o limiar epidêmico. Comparativamente, nota-se uma diminuição no número acumulado de casos no período mais recente (748 casos) em relação ao mesmo período do ano anterior (1.135 casos), indicando uma tendência de redução da carga da doença. Apesar disso, a presença de níveis intermediários de alerta demonstra que a dengue permanece sensível às variações climáticas e ambientais, exigindo vigilância contínua. Dessa forma, os resultados indicam uma melhora no dado epidemiológico recente, porém reforçam a necessidade de manutenção das ações de monitoramento e controle, considerando o caráter sazonal e dinâmico da dengue em áreas urbanas amazônicas.

A análise dos dados indica que a ocorrência da dengue em Manaus está associada a fatores estruturais, ultrapassando explicações apenas sazonais. Embora haja variação temporal dos casos, a persistência da transmissão relaciona-se às condições urbanas, especialmente ao saneamento básico e ao adensamento domiciliar. Áreas com infraestrutura sanitária precária favorecem a proliferação do *Aedes aegypti* e a manutenção da doença. Nesse sentido, dados do InfoDengue e do IBGE evidenciam que a dengue constitui um problema de saúde pública vinculado à organização do espaço urbano, demandando políticas voltadas à melhoria do saneamento.

No meio urbano, fatores como o adensamento populacional, condições habitacionais precárias, desigualdade na distribuição de renda e a ausência de saneamento ambiental adequado contribuem significativamente para a disseminação de doenças vetoriais, como dengue, chikungunya e zika. A propagação das arboviroses está associada à interação entre o vírus, o vetor e o ser humano, além das características do espaço geográfico que favorecem a proliferação de insetos. Nesse contexto, os arbovírus configuram-se como um importante problema de saúde pública global, especialmente em países tropicais e subtropicais, devido à elevada suscetibilidade da população e ao aumento de casos graves, que podem envolver complicações neurológicas, articulares e hemorrágicas (DONALISIO; FREITAS; VON ZUBEN, 2017 *apud* SILVA; OLIVEIRA, 2025).

A implantação da Zona Franca de Manaus impulsionou a industrialização e o crescimento urbano acelerado, atraindo população. Esse processo ocorreu mais rápido que o planejamento e a expansão da infraestrutura, resultando em ocupação desordenada e áreas com déficit de saneamento, alta densidade populacional e precariedade habitacional. Em Manaus, a expansão periférica não planejada contribui para limitações na infraestrutura e para o manejo inadequado de resíduos e esgotamento sanitário, evidenciado pela presença de recipientes plásticos em igarapés e rios (Figura 1).



Figura 1 – Resíduos sólidos no Rio Negro como risco à dengue em Manaus (2026).
Fonte: Santos (2026).

De acordo com dados do IBGE (Censo 2022), o município de Manaus possui uma população de 2.063.689 habitantes, distribuída em uma área de 11.401,09 km², com densidade demográfica de 181,01 hab/km². Em relação à infraestrutura domiciliar, observa-se que 50,6% dos domicílios estão conectados à rede de esgotamento sanitário, 76,24% possuem abastecimento de água pela rede geral, 99,09% contam com banheiro de uso exclusivo e 97,34% dispõem de coleta de resíduos sólidos. As áreas que concentraram maior número de fatores favoráveis à proliferação da dengue foram aquelas que registraram também os maiores índices de casos na Zona Oeste e Leste da cidade de Manaus (AMAZONAS ATUAL, 2024).

Entretanto, os dados evidenciam fortes desigualdades socioespaciais. Aproximadamente 52,94% dos domicílios do município (390.725) estão localizados em áreas de periferias de comunidades urbanas. Nesses espaços, reside 44,2% da população (1.151.828 habitantes), enquanto 55,8% (911.861 habitantes) vivem fora dessas áreas. Quanto à distribuição da população por situação do domicílio, predomina o espaço urbano, com 2.043.677 habitantes, em contraste com apenas 20.012 residentes na zona rural, reforçando o caráter altamente urbanizado do município. Nesse sentido, a ideia de que a dengue é uma doença "democrática" não se confirma, uma vez que os grupos populacionais de menor renda são os mais afetados, especialmente em contextos marcados por ocupação irregular do solo e deficiência no acesso ao saneamento básico (LITE, 2011, p. 58).

Nesse sentido, o 4º Levantamento do Índice Rápido do Aedes aegypti (LIRAa) de 2025 evidenciou a heterogeneidade do risco de infestação no município de Manaus, identificando seis bairros classificados como de alto risco — Tarumã, Da Paz, Alvorada, Lírio do Vale, Nova Esperança e Santo Agostinho —, enquanto 29 bairros apresentaram médio risco e 28 foram considerados de baixo risco. Com base nesses índices e nas notificações de arboviroses, a Secretaria Municipal de Saúde de Manaus elaborou um Mapa de Vulnerabilidade que apontou 18 bairros em situação crítica, incluindo Cidade Nova, Parque 10 de Novembro, Compensa, Centro e Jorge Teixeira. No período analisado, foram vistoriados 25.954 imóveis, resultando em um Índice de Infestação Predial de 1,8%, valor que mantém o município em classificação de médio risco para doenças como dengue, zika e chikungunya, conforme os parâmetros estabelecidos para o LIRAa (1,0 a 3,9), G1 AM (2025).

Vulnerabilidade à dengue associada às condições domiciliares no bairro Tarumã em Manaus

De acordo com dados Prefeitura de Manaus (2026), com base em dados da vigilância em saúde do município, o levantamento indicou bairros com diferentes níveis de risco de infestação pelo *Aedes aegypti*. O bairro Tarumã, localizado na zona oeste de Manaus, apresenta intenso crescimento imobiliário e uma ocupação heterogênea, composta por condomínios residenciais, áreas rurais, remanescentes de vegetação e regiões alagadiças. Essa configuração espacial contribui para sua valorização como área de moradia, ao mesmo tempo em que impõe desafios à infraestrutura urbana. No âmbito epidemiológico, o bairro é classificado como área de alta vulnerabilidade e elevado risco de infestação pelo *Aedes aegypti*, conforme informações divulgadas pelo poder público municipal.

De acordo com o IBGE (Censo 2022), o Tarumã possui 57.733 habitantes distribuídos em 20.374 domicílios, com média de 3,40 moradores por unidade, o que pode indicar situações de coabitação e adensamento domiciliar. A área do bairro é de 39,20 km², com densidade demográfica de 1.472,69 hab/km². Quanto à tipologia habitacional, predominam as casas (73,65%), seguidas por apartamentos (16,93%), habitações em vila ou condomínio (9,27%) e uma pequena parcela de cortiços (0,15%).

A análise integrada das características domiciliares e da ocupação do solo permite compreender a vulnerabilidade à dengue. A predominância de casas, associada à expansão urbana, áreas vegetadas e regiões alagadiças, favorece a formação de criadouros do vetor. O adensamento domiciliar e a organização do espaço urbano também influenciam a dinâmica de transmissão, especialmente em áreas periféricas marcadas pela ocupação irregular e pela precariedade de infraestrutura, criando ambientes insalubres. Nesse contexto, os indicadores socioambientais são essenciais para avaliar a salubridade ambiental, identificar desigualdades intraurbanas e subsidiar políticas públicas mais eficazes (DUARTE; BEZERRA; GONÇALVES, 2021).

Considerações Finais

A análise dos dados evidencia que a ocorrência da dengue em Manaus está mais fortemente associada às condições estruturais do espaço urbano do que a fatores exclusivamente sazonais. Embora se observe, após um pico inicial, uma redução da incidência ao longo de 2024, com predomínio de níveis de alerta mais baixos, e uma diminuição do número acumulado de casos em 2025, a persistência de níveis intermediários indica a manutenção do risco epidemiológico. Nesse contexto, destacam-se as limitações do saneamento básico, especialmente no que se refere ao esgotamento sanitário, além da disposição inadequada de resíduos sólidos, frequentemente observada em corpos hídricos como o Rio Negro. Esses fatores, associados à elevada urbanização e à concentração populacional, favorecem a formação de criadouros do *Aedes aegypti* e contribuem para a continuidade da transmissão da doença, evidenciando que a dengue deve ser compreendida como um problema diretamente relacionado às desigualdades na infraestrutura urbana.

No bairro Tarumã, também em Manaus, a vulnerabilidade à dengue manifesta-se principalmente a partir das dinâmicas de ocupação domiciliar e da organização do espaço urbano. A média de moradores por domicílio (3,40) e a possibilidade de coabitação indicam situações de adensamento domiciliar, que intensificam a circulação de pessoas em espaços reduzidos e ampliam a exposição ao vetor. Além disso, a predominância de habitações do tipo casa e a expansão urbana, associadas à presença de áreas com limitações de infraestrutura, podem favorecer a formação de criadouros. Ainda que não haja dados específicos de saneamento básico para o bairro, a análise dos indicadores domiciliares permite inferir condições que contribuem para o risco epidemiológico. Dessa forma, considerando que a dispersão do vetor ocorre em escala municipal, conclui-se que a vulnerabilidade no Tarumã está inserida em uma dinâmica urbana mais ampla, na qual fatores como adensamento domiciliar e fragilidades na infraestrutura urbana reforçam a manutenção da dengue no município.

Referências Bibliográficas

AMAZONAS ATUAL. **Saiba quais os bairros de Manaus mais vulneráveis ao mosquito da dengue. Manaus**, 12 dez. 2024. Disponível em: https://amazonasatual.com.br/saiba-quais-os-bairros-de-manaus-mais-vulneraveis-ao-mosquito-da-dengue/. Acesso em: 7 abr. 2026.

DUARTE, A. D.; BEZERRA, S. de T. M.; GONÇALVES, E. A. P. Indicador de salubridade ambiental para avaliação de bairros em áreas urbanas: um estudo de caso em Caruaru (PE), Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, Rio de Janeiro, v. 56, n. 1, p. 166–179, 2021. DOI: 10.5327/Z21769478750. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/750. Acesso em: 31 mar. 2026.

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ (FIOCRUZ). **Sistema InfoDengue: situação epidemiológica da dengue em Manaus.** Disponível em: https://info.dengue.mat.br/alerta/1302603/dengue. Acesso em: 01 abr. 2026.

G1 AM. **Seis bairros de Manaus têm alto risco de infestação da dengue**. Manaus, 13 dez. 2025. Disponível em: https://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2025/12/13/seis-bairros-de-manaus-tem-alto-risco-de-infestacao-da-dengue.ghtml. Acesso em: 31 mar. 2026.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama do Censo 2022**. Disponível em: https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/. Acesso em: 01 abr. 2026.

LITE, Marcos Esdras. ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE DENGUE E INDICADORES SOCIAIS A PARTIR DO SIG. **Hygeia - Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, Uberlândia, v. 6, n. 11, p. 44–59, 2011. DOI: 10.14393/Hygeia616981. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/hygeia/article/view/16981. Acesso em: 31 mar. 2026.

PREFEITURA DE MANAUS. **Prefeitura de Manaus utilizará nova estratégia para monitoramento e controle do *Aedes aegypti* em 2026.** Manaus, 18 jan. 2026. Disponível em: https://www.manaus.am.gov.br/noticia/noticia-tecnologia/nova-estrategia-controle-aedes-aegypti-2026/. Acesso em: 31 mar. 2026.

SILVA, Aichely Rodrigues da; OLIVEIRA, Allison Bezerra. SANEAMENTO AMBIENTAL E ARBOVIROSES NOS MUNICÍPIOS DA REGIÃO METROPOLITANA DO SUDOESTE MARANHENSE (2014–2024). **Hygeia - Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, Uberlândia, v. 21, p. e2169, 2025. DOI: 10.14393/Hygeia2176852. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/hygeia/article/view/76852. Acesso em: 31 mar. 2026.

EQUIPAMENTO DE CONTROLE DE PRAGAS URBANAS COM USO DE FREQUÊNCIA SONORA

1 Gabriel Wicher Travagini, 2 Leticia Rodovalho Rodrigues, 3 Rafaela Trindade Manhoso, 4 Rebeca Andrade Fagundes, 5Guênia Mara Vieira Ladeira, 6Angela Marcia de Souza

1 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: gabriel.travagini@ufu.br; 2 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: leticia.rodovalho@ufu.br; 3 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: rafaelat.manhoso@ufu.br; 4 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: rebeca.fagundes@ufu.br; 5 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: guenia@ufu.br; 6 Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: angela.souza@ufu.br

Palavras-chave: pombos; ondas sonoras; Arduino.

Introdução

O atual desequilíbrio ambiental presente nos centros urbanos tem entre suas consequências a proliferação de pombos, animais sinantrópicos considerados pragas urbanas por causarem a degradação de espaços públicos e privados, além de transmitirem doenças como a criptococose, a salmonelose e a histoplasmose. Além disso, a presença constante desses animais em áreas urbanas pode comprometer a qualidade de vida da população, principalmente em locais com grande circulação de pessoas, como praças, terminais e centros comerciais.

Nesse contexto, a elevada capacidade reprodutiva das aves da família Columbidae, associada à ausência de predadores naturais e à abundante oferta de alimento e abrigo em ambientes urbanos, favorece a rápida proliferação de pombos. Esse crescimento populacional ocorre de forma descontrolada, uma vez que o ambiente urbano oferece condições ideais para sua sobrevivência, incluindo fontes constantes de alimento provenientes de resíduos sólidos e ações antrópicas. Apesar desse cenário, o crescimento acelerado dos centros urbanos não foi acompanhado pela implementação de estratégias de manejo eficazes, capazes de conter a expansão dessas populações consideradas risco à saúde pública.

Os pombos são considerados reservatórios de agentes infecciosos por portarem cerca de 70 tipos de microrganismos patogênicos, como fungos e parasitos, que são dispersos para o meio através da deposição de fezes pela ave. A infecção do ser humano pelos agentes patógenos transmitidos geralmente ocorre pelo contato indireto com as excretas de pombo devido à inalação ou ingestão de poeira em locais contaminados com as fezes secas (SILVA e CAPUANO, 2008).

Diante desse cenário, o presente estudo propõe o desenvolvimento de um dispositivo sonoro para o controle de pombos em centros urbanos. Segundo Göpfert & Robert (2001), esses animais têm audição sensível até a frequência de 33 kHz; dessa forma, avalia-se a eficiência da emissão de ondas sonoras entre 20 kHz e 30 kHz de forma espaçada e randômica, para evitar a habituação aos estímulos sonoros, fazendo com que o desconforto causado às aves as direcione para áreas não ocupadas. Essa abordagem busca explorar características sensoriais dos pombos como estratégia de controle não invasivo.

O dispositivo utiliza o Arduino Uno, uma plataforma de prototipagem eletrônica de baixo custo, para executar código em linguagem C++, responsável pelo controle da emissão sonora na faixa de frequência de interesse, previamente estabelecida, sendo inaudível para humanos e incômoda para pombos. O uso dessa tecnologia permite maior flexibilidade no desenvolvimento do sistema, além de possibilitar ajustes na frequência e nos padrões de emissão sonora conforme a necessidade.

O equipamento de manejo proposto busca encontrar uma alternativa ética, sustentável e não invasiva em comparação com os métodos convencionais para o controle de pombos, promovendo a mitigação dos impactos ambientais e dos riscos à saúde pública causados pelas aves. Dessa forma, o estudo contribui para o desenvolvimento de soluções tecnológicas aplicadas ao controle populacional de espécies sinantrópicas em ambientes urbanos.

Material e Métodos

O presente estudo caracteriza-se como uma investigação de caráter exploratório, com foco no desenvolvimento e validação preliminar de um protótipo eletrônico. Os procedimentos realizados tiveram como objetivo avaliar a viabilidade técnica do sistema, não configurando ainda um experimento controlado com delineamento estatístico ou amostral.

A construção do protótipo foi realizada por meio da utilização da plataforma Arduino Uno, uma plataforma de computação física de código aberto capaz de interagir com diferentes componentes eletrônicos, como sensores, LEDs, displays e alto-falantes (BANZI, 2011). Essa plataforma é amplamente utilizada em projetos de prototipagem devido à sua versatilidade e baixo custo.

A comunicação entre o computador, onde o código é desenvolvido, e a placa ocorre por meio da conexão USB. Após o envio, o código é executado diretamente no microcontrolador, permitindo a interação do Arduino com o meio externo por meio dos pinos de entrada e saída, que controlam os dispositivos conectados ao circuito.

Foi desenvolvido um código em linguagem C++ para a plataforma Arduino, executado inicialmente em ambiente de simulação TinkerCAD, exposto na Figura 1, possibilitando a validação prévia do funcionamento lógico do sistema antes da montagem física do protótipo. O programa controla a emissão de ondas sonoras na faixa de 20 kHz a 30 kHz, frequências inaudíveis ao ouvido humano, porém utilizadas com o objetivo de provocar desconforto em pombos.

O sistema opera em ciclos de 10 segundos, nos quais são gerados 20 pulsos sonoros com duração de 50 milissegundos, separados por intervalos de 60 milissegundos. Além disso, o algoritmo realiza a randomização da frequência de cada pulso dentro

da faixa estabelecida (entre 20 e 30 kHz), com o objetivo de evitar a adaptação dos pombos ao estímulo sonoro, aumentando a variabilidade do sinal emitido. A estrutura do algoritmo desenvolvido é apresentada na Figura 2.

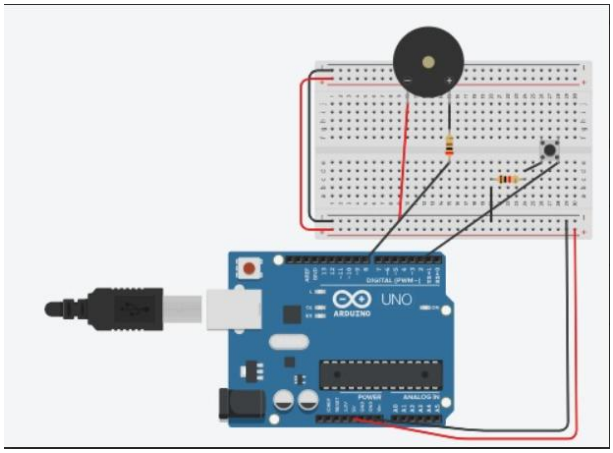


Figura 1: Simulação do protótipo no TinkerCAD.
Fonte: Autores (2026)

```
// Código - Repelente de Pombos Ultrassônico

class RepelentePombos {
  private:
    byte pinoSpeaker;
    unsigned long intervalo = 10000;  // 10 segundos
    unsigned int freqMin = 20000;     // 20 kHz
    unsigned int freqMax = 30000;     // 30 kHz
    unsigned long ultimaAtivacao = 0;

  public:
    // Construtor
    RepelentePombos(byte pin) {
      pinoSpeaker = pin;
      pinMode(pinoSpeaker, OUTPUT);
    }

    void atualizar() {
      if (millis() - ultimaAtivacao >= intervalo) {
        // Emite 20 pulsos de 50ms cada
        for (byte i = 0; i < 20; i++) {
          unsigned int freq = random(freqMin, freqMax);
          tone(pinoSpeaker, freq, 50);
          delay(60);
        }
        noTone(pinoSpeaker);
        ultimaAtivacao = millis();
      }
    }
};
// Definição dos pinos
#define PINO_ALTO_FALANTE 8    // Pino digital 8 conectado ao alto-falante ultr
#define PINO_ANALOG_RANDOM A0  // Pino analógico não conectado para randomizaçã

// Criação do objeto no pino definido
RepelentePombos repelente(PINO_ALTO_FALANTE);

void setup() {
  randomSeed(analogRead(PINO_ANALOG_RANDOM));  // Inicializa o gerador aleatóri
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Sistema Repelente de Pombos Iniciado");
}
void loop() {
  repelente.atualizar();
}
```

Figura 2: Código em linguagem C++.
Fonte: Autores (2026)

Para verificar se a frequência sonora emitida pelo alto-falante se encontrava entre 20 kHz e 30 kHz, foi utilizado um osciloscópio, exposto na Figura 3, que permite visualizar as formas de onda dos sinais elétricos e analisar o comportamento do circuito.



Figura 3: Verificação da frequência sonora emitida por meio do osciloscópio.
Fonte: Autores (2026).

A protoboard, também conhecida como placa de ensaio, foi utilizada para a montagem do protótipo, permitindo conexões elétricas temporárias sem necessidade de soldagem (THOMAS, 2024).

A montagem do protótipo foi realizada por meio da integração dos componentes principais na protoboard, conforme apresentado na Figura 4. O Arduino Uno foi interligado aos demais elementos por fios jumper, estabelecendo a comunicação entre o microcontrolador e o restante do circuito. Para fornecer energia ao sistema, foi utilizada uma bateria de 12 volts, garantindo o funcionamento independente de uma fonte externa.

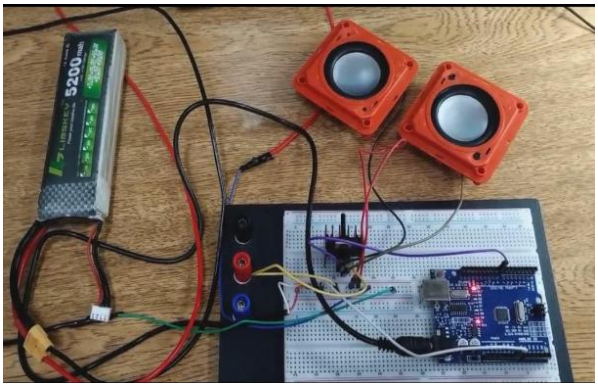


Figura 4: Montagem do protótipo usando a Protoboard.
Fonte: Autores (2026)

A montagem anterior mostrou-se pouco viável na emissão da frequência sonora por meio desses pequenos alto-falantes. Dessa forma, optou-se por testar a emissão sonora com a utilização do alto-falante Bravox, exibido na Figura 5. Esse equipamento foi integrado à protoboard juntamente com dois amplificadores sonoros de 6 W, permitindo a emissão das ondas sonoras na faixa de frequência desejada. A utilização de amplificadores foi necessária para aumentar a intensidade do sinal sonoro gerado pelo Arduino, tornando-o mais adequado para aplicação prática no afastamento dos pombos.

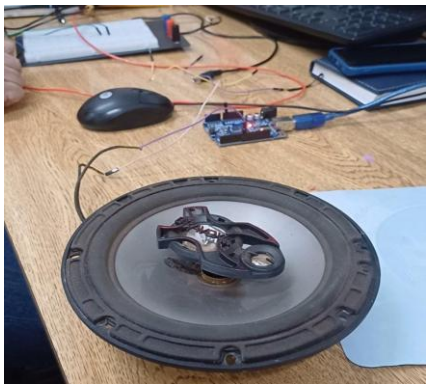


Figura 5: Alto-falante Bravox integrado ao circuito.
Fonte: Autores (2026)

Resultados e discussão

Os testes preliminares realizados em campo não evidenciaram alterações significativas no comportamento dos pombos, não sendo possível confirmar a eficácia do dispositivo no afastamento das aves. Esse resultado inicial pode estar associado a diferentes fatores, como a limitação do alcance do sistema, a intensidade insuficiente do sinal sonoro emitido e a interferência de ruídos característicos do ambiente urbano. Além disso, a dificuldade de aproximação das aves e a ausência de controle experimental rigoroso limitaram a obtenção de dados mais consistentes.

A literatura aponta que aves podem apresentar processos de habituação a estímulos sonoros, especialmente quando estes não possuem intensidade ou variabilidade suficientes, o que pode ter influenciado o comportamento observado. Nesse sentido, a randomização das frequências adotada no presente estudo representa uma estratégia relevante, embora sua eficácia dependa também de outros fatores físicos do sistema, como potência sonora e alcance. Apesar das limitações observadas, o protótipo demonstrou funcionamento técnico adequado quanto à geração e variação das frequências, evidenciando viabilidade como base para aprimoramentos futuros.

O protótipo apresenta viabilidade econômica significativa, visto que possui custo de montagem de aproximadamente R$ 100,00, tornando-se mais acessível do que métodos convencionais. Os materiais utilizados, como alto-falante, amplificadores e bateria, foram obtidos por meio de reutilização e doação, o que reforça os princípios de sustentabilidade do projeto e contribui para a economia circular.

Ao ser comparado aos métodos convencionais de controle de pombos, como barreiras físicas, uso de substância químicas ou métodos letais, o dispositivo proposto apresenta vantagens relacionadas ao menor impacto ambiental e à ausência de riscos diretos à fauna e à população humana. Além disso, a abordagem sonora permite uma aplicação mais flexível diferente dos métodos tradicionais que podem apresentar limitações de uso em ambientes abertos.

A utilização do osciloscópio confirmou que a frequência emitida opera dentro da faixa inicialmente projetada, assegurando a funcionalidade do circuito e a eficácia da amplificação do sinal. A montagem do protótipo na protoboard possibilitou a realização de testes preliminares não controlados, conduzidos na Universidade Federal de Uberlândia (UFU), com caráter observacional.

Contudo, os testes demonstraram que o protótipo precisa de alterações em seu sistema para que o afastamento das aves da espécie *Columbidae* ocorra com êxito. Pressupõe-se que o alcance do sinal seja um fator contribuinte para o comportamento observado, somado à inadequação entre a frequência sonora emitida e a faixa de sensibilidade auditiva dessas aves.

Dessa forma, por mais que a viabilidade econômica seja significativa, há a necessidade de implementar ajustes no protótipo, objetivando o aprimoramento de sua eficiência. Entre as principais limitações do estudo, destaca-se a ausência de um delineamento experimental controlado, com definição de grupos de comparação, número amostral e repetição dos testes. Além disso, não houve mensuração quantitativa do comportamento das aves, sendo as observações realizadas de forma qualitativa.

Outro fator limitante refere-se à ausência de controle de variáveis ambientais, como ruído urbano, presença de alimento, fluxo de pessoas e condições climáticas, que podem influenciar diretamente o comportamento dos pombos.

Adicionalmente, não foi possível garantir que as frequências emitidas pelo sistema coincidam com a faixa de maior sensibilidade auditiva das aves em condições reais, o que pode comprometer a eficácia do dispositivo.

Comentários finais

O presente estudo permitiu o desenvolvimento e a avaliação inicial de um dispositivo eletrônico de baixo custo para o afastamento de pombos dos ambientes urbanos. O protótipo demonstrou funcionamento técnico adequado quanto à faixa de frequência sonora estabelecida, além de comprovar sua viabilidade econômica.

O dispositivo apresenta potencial como alternativa acessível e sustentável. Para validação de sua aplicabilidade em condições reais, faz-se necessária a continuidade dos estudos sobre o tema e das possíveis modificações a serem efetuadas no sistema. Avalia-se, portanto, a realização de estudos experimentais controlados, com definição de áreas teste e controle, permitindo a comparação direta da presença de pombos antes e após a aplicação do estímulo sonoro.

Do ponto de vista técnico, futuras melhorias podem incluir o uso de transdutores ultrassônicos mais eficientes, ajuste fino da faixa de frequência emitida e aumento da potência do sinal, visando ampliar o alcance do dispositivo. Além da integração com sensores de presença ou sistemas automatizados pode otimizar o funcionamento do equipamento, reduzindo o consumo energético e aumentando sua aplicabilidade em diferentes contextos urbanos.

Agradecimentos

Agradecemos o suporte da “Universidade Federal de Uberlândia” e do “Programa Empreendedorismo Ambiental” para o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ARDUINO. Arduino Uno Rev3. Disponível em: https://www.arduino.cc. Acesso em: 02 abr. 2026.

BANZI, Massimo. Getting started with Arduino. 2. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2011.

BRASIL. Ministério da Saúde. Manual de controle de zoonoses. Brasília: Ministério da Saúde, 2016. Disponível em: https://www.gov.br/saude. Acesso em: 20 abr. 2026.

GÖPFERT, M. C.; ROBERT, D. Turning the key on Drosophila audition. Nature, v. 411, n. 6840, p. 908–908, jun. 2001.

JOHNSON, Richard J.; GLASS, David. Urban bird management. Wildlife Society Bulletin, v. 27, n. 2, p. 330–336, 1999.

SILVA, Jaqueline Otero; CAPUANO, Divani Maria. Ocorrência de Cryptococcus spp e de parasitas de interesse em saúde pública, nas excretas de pombos na cidade de Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil. Revista do Instituto Adolfo Lutz, v. 67, n. 2, p. 137- 141, 2008. Disponível em: https://www.ial.sp.gov.br/resources/insituto-adolfo-lutz/publicacoes/rial/2000/rial67_2_completa/1166.pdf. Acesso em: 20 abr. 2026.

THOMAS, John. Electronics for beginners: a practical introduction. [S.l.]: Independently Published, 2024.

ADSORÇÃO DE GLIFOSATO EM ÁGUA UTILIZANDO RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO E AVALIAÇÃO DA TOXICIDADE RESIDUAL POR *ALLIUM CEPA*: ESTUDO PRELIMINAR

1 Eduarda Grunwald Ceretta, 2 Dhiovani Felipe Ciganski, 3 Manuela Gomes Cardoso 4 Suzymeire Baroni
1 Universidade Federal da Fronteira Sul, e-mail: eduarda.ceretta@estudante.uffs.edu.br; 2 Fortes & Fortes Advogados, e-mail: dfciganski@gmail.com; 3 Universidade Federal da Fronteira Sul, e-mail: manuela.cardoso@uffs.edu.br
4 Universidade Federal da Fronteira Sul, e-mail: suzymeire.baroni@uffs.edu.br

Palavras-chave: Contaminante; Remoção; Herbicida

Os seres humanos se utilizam dos recursos da natureza para seu desenvolvimento, impulsionando impactos ambientais. A geração de efluentes industriais, esgotos domésticos e de resíduos sólidos, bem como a mineração e os processos de beneficiamento de minérios são alguns exemplos. Muitos compostos utilizados pelo homem, como medicamentos, corantes usados em indústria têxtil, agroquímicos e diversos produtos químicos podem ser incorporados à água ao entrarem em contato com ela (Montagner *et al.,* 2017). No contexto de revolução industrial e desenvolvimento econômico dos países, os recursos naturais passaram a ser cada vez mais utilizados e, por conseguinte, degradados e poluídos. De especial importância para a manutenção da vida, e muito presente entre as ocupações humanas está a atividade agrícola, cuja realização impacta diretamente os ecossistemas (Ribeiro *et al*., 2022). Diante da necessidade do aumento de produtividade, novas técnicas precisaram ser implementadas na agricultura, como o uso de agrotóxicos. Com a Segunda Guerra Mundial, e com a chamada "Revolução Verde" na década de 1950, nos Estados Unidos, novas tecnologias foram criadas, e no contexto da agricultura, foi nesta época que começaram a desenvolver os primeiros agroquímicos, como inseticidas, pesticidas e herbicidas, também chamados de agrotóxicos, conforme Meller, Reolon-Costa e Ceolin (2021). Segundo Rad, Ray e Barghi (2022), a agricultura é responsável por movimentar o mercado mundial de pesticidas em quatro milhões de toneladas por ano no mundo. Esses compostos, cada vez mais utilizados para manter grandes quantidades de produção agrícola, acabam por se dispersarem no ambiente, contaminando água, solo, e ar. Os agrotóxicos, também conhecidos como defensivos agrícolas ou pesticidas, ou ainda agroquímicos (Ramos, Oliveira e Araújo, 2019), são utilizados na agricultura para aumentar o crescimento das culturas por meio do controle de pragas, e ao mesmo tempo, são persistentes no ambiente e podem desencadear efeitos nocivos à saúde humana, além de poluição ambiental, impactando o solo, água e ar. Existem diversas categorias destes compostos, entre os quais estão os fungicidas, herbicidas e inseticidas (Ribeiro *et al*., 2022). A contaminação de corpos hídricos por pesticidas tem se intensificado nas últimas décadas, especialmente em regiões com forte atividade agrícola. Santos *et al*. (2022) identificaram os dez agrotóxicos mais utilizados na região noroeste do Rio Grande do Sul: glifosato, 2,4-D, além de atrazina, acefato, mancozebe, dicloreto de paraquate, simazina, imidacloprido, trifloxistrobina e protioconazol. Alguns desses compostos apresentam alta mobilidade e potencial de lixiviação, podendo atingir aquíferos. Ainda, a exposição contínua a essas substâncias pode ocasionar problemas cardiovasculares, disfunções reprodutivas e maior incidência de câncer (Santos *et al*., 2022). Dentre os diversos tipos de agrotóxicos, está o glifosato (N-(phosphonomethyl) glicina), o qual consiste em um herbicida de amplo espectro indicado para o controle de plantas daninhas terrestres e aquáticas. O glifosato possui fórmula molecular $C_3H_8NO_5P$, sendo um composto orgânico que se degrada facilmente em AMPA (ácido aminometilfosfônico), e, uma vez que apresentam alta solubilidade em água, ambos os compostos têm sido frequentemente detectados em águas superficiais e subterrâneas (Bou-Mitri *et al.,* 2025). Conforme Zuker e Cardoso (2025), o glifosato atua bloqueando a enzima fundamental na via do shikimato, sendo absorvido pelas folhas das plantas. Ele inibe a síntese de aminoácidos essenciais aromáticos e da enzima 5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato sintase (EPSPs), segundo Lima, Boëchat e Gücker (2021). Conforme Losch *et al.* (2022), Herbicidas a Base de Glifosato (HBG) são os mais vendidos no Brasil, uma vez que este ingrediente ativo pode ser encontrado em mais de 750 produtos distintos. Trata-se de um dos herbicidas mais usados em todo o mundo, em pelo menos 130 países. Segundo Nascimento, Marques e Trevisol (2019), apesar de haver discussões na Europa e no Brasil sobre o uso do glifosato há evidências de riscos associados a ele, a Comissão Europeia e a ANVISA decidiram continuar com o uso, além de que, o uso também é permitido nos Estados Unidos. Mas países como como Áustria, Suécia, Bermudas, Malawi, Togo, Vietnã, Sri Lanka, Omã, Arabia Saudita, Kuwait, Emirados Árabes, Catar e Bahrain, sua venda é proibida por ser considerado prejudicial à saúde humana (Pol, Hupffer e Figueiredo, 2021). Considerando essa problemática, diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas para tentar diminuir a concentração deste produto em meio aquoso. Estudos associam o glifosato a doenças graves, podendo-se citar como exemplo: provável agente carcinogênico, possível gerador de Transtorno do Déficit de Atenção e Hiperatividade (TDHA), relação com a incidência de doença celíaca e intolerância ao glúten, além de contribuir para as deficiências em metais (Oliveira *et al*., 2018; Nascimento, Marques e Trevisol, 2019). Devido a esse cenário, diferentes tecnologias vêm sendo empregadas para remover esses e outros contaminantes da água. Processos físico-químicos tradicionais, como coagulação, floculação e flotação, bem como processos mais recentes como adsorção, filtração por membranas, processos de oxidação avançada (POAs), além de processos combinados, têm sido utilizadas para viabilizar o tratamento de águas contaminadas com glifosato (Espinoza-Montero, 2020). O objetivo do trabalho em desenvolvimento é utilizar materiais alternativos para a realização de testes de adsorção de glifosato em água, uma vez que esta é uma técnica de baixo custo e com diversas vantagens em termos de eficiência de remoção (Espinoza-

Montero, 2020). De acordo com Franco, Georgin e Meili (2024), a adsorção é um fenômeno baseado na transferência de solutos (adsorvatos) da fase líquida para a superfície de um material sólido (adsorvente) e é regido por forças físicas ou químicas, sendo diretamente influenciado por propriedades estruturais do sólido, tais como sua porosidade, pH, diâmetro de poros, área superficial e a presença de grupos funcionais. No contexto de herbicidas, as moléculas do contaminante preenchem as cavidades porosas do adsorvente até que o equilíbrio de saturação seja atingido (Kausar *et al*., 2018). Os resíduos escolhidos e utilizados como materiais adsorventes são oriundos de indústria de fundição. O aproveitamento de resíduos desempenha um importante papel na sustentabilidade, uma vez que evita que esses sejam despejados na natureza em local inadequado, diminui o espaço para disposição em aterro sanitário promovendo sua reinserção na cadeia produtiva de novos produtos, conforme prevê a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305/2010 (Brasil, 2010). Se verificado o potencial de remoção, tem-se uma alternativa para as demandas industriais em terem uma destinação para seus resíduos e um material adsorvente para glifosato, já que os estudos que envolvem a adsorção do herbicida com outros resíduos é menos frequente. Alguns autores fazem uso de resíduos para adsorção do glifosato como Qiu, Li, Wang e Li (2024), utilizam resíduos do tratamento de água à base de ferro e obtêm eficácia. Outros como Bezerra *et al.* (2022) realizaram tratamento químico de bagaço de cana-de-açúcar para utilizá-lo como biossorvente; Enderle *et al.*, (2025) usam um resíduo agroindustrial, a casca de ovo, para adsorção de glifosato; Hu, Zhao e Sorohan (2011) fizeram uso de lodo de alumínio de Estações de Tratamento de água (ETA). No caso deste estudo, os resíduos usados são areia de fundição, escória de alto-forno e fumo do filtro manga (fumo). A fundição de metais é um processo industrial indispensável, especialmente para a cadeia de suprimentos do setor de transportes, embora resulte na geração de resíduos consideráveis (Pereira *et al*., 2025). A composição destes materiais é diversificada: a areia de fundição é composta por sílica e aglomerantes químicos, entre os quais estão resinas epóxi, silicatos de sódio, óxidos de alumínio, de ferro, magnésio, estrôncio, potássio e sódio, dióxidos de silício e titânio, trióxido de enxofre e manganês, conforme Siddique e Singh (2011). As escórias se formam durante a fusão pela reação entre impurezas, são compostas essencialmente por óxidos de silício, cálcio, alumínio e ferro (Pereira *et al.*, 2025). O fumo é um material residual particulado, retido em filtro manga, que contém metais pesados, fumaça e poeira contendo gases de combustão, escória, cinzas volante Para a realização deste trabalho de pesquisa, os materiais foram inicialmente lavados, secados em estufa por 105 ºC durante 24h, no pH inicial original da solução de glifosato (em torno de 6,7) Após isso, realizou-se a pesagem dos materiais, em que 1,25g de cada material foi colocado em Erlenmeyer de polipropileno em contato com glifosato de concentração teórica inicial de 1 mg/L, a 25 ºC, sob agitação constante por 24h em uma incubadora shaker (Bertolo, 2025). Terminado o tempo de adsorção, os materiais foram filtrados, centrifugados e preparados para análise com o Cromatografia Líquida acoplada à Espectrometria de Massas em Série (LC-MS/MS). Foram observadas as concentrações finais de glifosato e AMPA, em duplicata. Os ensaios de adsorção indicaram redução na concentração de glifosato (AMPA não foi detectado) nas amostras tratadas, evidenciando o potencial dos materiais oriundos da indústria de fundição como adsorventes. Após o tratamento por adsorção, as amostras foram utilizadas na exposição de bulbos de *Allium cepa* para avaliação ecotoxicológica, conforme Fiskesjö (2008). Para a realização do estudo, os bulbos de *Allium cepa* foram adquiridos no comércio local e colocados em beckers de 50mL em contato com água da torneira por 72 horas para o enraizamento. Posteriormente, os mesmos serão expostos por 48 horas, a um grupo considerado controle negativo, com 3 bulbos em água da torneira pelo mesmo período e outro grupo com 3 bulbos será submetido ao Nitrato de Chumbo ($Pb(NO_3)_2$), o controle positivo. Para cada tratamento com os resíduos de fundição, também serão colocados 3 bulbos após o processo de adsorção já ter sido realizado, as amostras filtradas e centrifugadas. Os meristemas radiculares serão coletados e condicionados por um período de 24 horas em microtubos, tipo Ependorf®, contendo o fixador de Carnoy (3: etanol / 1: ácido acético). Posteriormente, as raízes serão lavadas em água destilada e armazenadas em álcool a 70% sob refrigeração até a confecção das lâminas. A coloração seguirá o protocolo de Feulgen com modificações, onde as raízes serão submetidas à hidrólise ácida com HCL 1N por 15 minutos a 60ºC, a hidrólise permite boa coloração devido sua ação nas bases púricas do DNA, liberando grupos aldeídos e carboidratos. Em seguida, serão imersos em reagente de Schiff por 60 minutos no escuro e em temperatura ambiente. As pontas das raízes serão seccionadas para a extração das suas regiões meristemáticas e serão amassadas sob uma lâmina, uma gota de orceína acética 2% e fechada com a lamínula. Em microscopia Óptica Olympus® CX31, serão observadas 1000 células por lâmina, ou seja, 3000 células por tratamento contabilizando as células em mitose. O índice mitótico (IM) será obtido seguindo as recomendações de Leme e Marin-Morales (2009), dividindo-se o número de células em mitose (prófase + metáfase + anáfase + telófase) pelo número total de células (intérfase + mitose) multiplicando-se por 100. Os dados extraídos das contagens total de Micronúcleos (MN) e Anormalidade Nucleares (AN) por indivíduos serão posteriormente submetidos a análise estatística. Os primeiros resultados apontam que houve remoção de glifosato. A areia de fundição apresentou remoção de glifosato em aproximadamente 87%, enquanto que o fumo do filtro manga e escória de alto-forno apresentaram remoção de 100%, o que corrobora com estudos de Bertolo, (2025), em estudo com estes materiais, encontrou valores semelhantes para o fumo, e escória, com 100% de remoção de glifosato e porcentagem semelhantes para areia, em torno de 70%. A etapa seguinte consiste na avaliação da citotoxicidade, que está em fase de realização. As análises permitirão verificar a ocorrência de efeitos tóxicos residuais após o processo de adsorção, como alteração nas características das células como MN, AN, e alterações no IM, indicando toxicidade de alguns materiais. Para que os materiais sejam, efetivamente, possíveis de serem usados para a adsorção do glifosato, precisa-se combinar as eficiências do processo de adsorção com a ausência de prejuízos significativos nas células do sistema *A. cepa.* Isto representará uma reutilização benéfica dos resíduos da indústria de fundição e ainda uma alternativa de material adsorvente para a remoção do glifosato.

Agradecimentos

Ao CNPq, pela bolsa de pesquisa, à Universidade Federal da Fronteira Sul, pelo Apoio financeiro UFFS com projeto registro PES-2025-0498. Ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis (PPGATS), ao Laboratório de Análises de Resíduos de Pesticidas (LARP) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), por meio dos professores Renato Zanella e Osmar Damian Prestes.

Referências Bibliográficas

BERTOLO, Jéssica Piovesan. **Adsorção do glifosato utilizando materiais naturais e resíduos industriais:** equilíbrio e cinética. 2025. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis) – Campus Cerro Largo, Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2025. Disponível em: https://rd.uffs.edu.br/handle/prefix/8910. Acesso em: 3 mar. 2026.

BEZERRA, Williene Faria da Penha *et al.* Chemical treatment of sugarcane bagasse and its influence on glyphosate adsorption. Matéria (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 27, n. 1, p. 1-11, jan. 2022. **FapUNIFESP** (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620220001.1342. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rmat/a/5SwvbNHkcHDxFMmCkRpF4Zt/abstract/?lang=pt. Acesso em: 01 abr. 2026.

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. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 3 ago. 2010.

BOU-MITRI, Christelle *et al*. Glyphosate in food: a narrative review. **Journal Of Agriculture And Food Research**, [S.L.], v. 19, n. 101643, p. 1-6, mar. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101643.

ENDERLE, Mirian Cristina *et al.* From waste to resource: production and characterization of eggshell adsorbent for glyphosate removal by adsorption. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 72, p. 1-15, abr. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107464. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714425005367. Acesso em: 28 abr. 2026.

ESPINOZA-MONTERO, Patricio J. *et al*. Technologies Employed in the Treatment of Water Contaminated with Glyphosate: a review. **Molecules**, [S.L.], v. 25, n. 23, p. 5550, 26 nov. 2020. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/molecules25235550. Disponível em: https://www.mdpi.com/1420-3049/25/23/5550. Acesso em: 28 abr. 2026.

FRANCO, Dison; GEORGIN, Jordana; MEILI, Lucas. Decontamination of water contaminated by the herbicide glyphosate through adsorption technology: a critical review**. Latin American Developments In Energy Engineering**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 9-26, 19 nov. 2024. Corporation Universidad de la Costa, CUC. http://dx.doi.org/10.17981/ladee.05.01.2024.2. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/386005914_Decontamination_of_water_contaminated_by_the_herbicide_glyphosate_through_adsorption_technology_a_critical_review. Acesso em: 25 abr. 2026.

FISKESJÖ, Geirid. The *Allium* test as a standard in environmental monitoring. Hereditas, [S.L.], v. 102, n. 1, p. 99-112, 14 fev. 2008. **Springer Science and Business Media LLC**. http://dx.doi.org/10.1111/j.1601-5223.1985.tb00471.x. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1601-5223.1985.tb00471.x. Acesso em: 5 dez. 2025.

HU, Yuansheng; ZHAO, Yaqian; SOROHAN, Brian. Removal of glyphosate from aqueous environment by adsorption using water industrial residual. Desalination, [S.L.], v. 271, n. 1-3, p. 150-156, abr. 2011. **Elsevier** BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2010.12.014. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916410009343. Acesso em: 20 abr. 2026.

KAUSAR, Abida *et al*. Dyes adsorption using clay and modified clay: a review. Journal Of Molecular Liquids, [S.L.], v. 256, p. 395-407, abr. 2018. **Elsevier** BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.034. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167732217346366?via%3Dihub. Acesso em: 25 abr. 2026.

LEME, Daniela Morais; MARIN-MORALES, Maria Aparecida. *Allium cepa* test in environmental monitoring**:** a review on its application. Mutation Research/Reviews In Mutation Research, [S.L.], v. 682, n. 1, p. 71-81, jul. 2009. **Elsevier BV.** http://dx.doi.org/10.1016/j.mrrev.2009.06.002. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383574209000404?via%3Dihub. Acesso em: 16 mar. 2026.

LIMA, Igor Barbosa; BOËCHAT, Iola Gonçalves; GÜCKER, Björn. Glifosato no Brasil: uso, contaminação aquática, efeitos ambientais e perigos para a saúde humana. **Caderno de Geografia,** Belo Horizonte, v. 31, n. 1, p. 90, 2021. DOI: 10.5752/P.2318-2962.2021v31nesp1p90. Disponível em: https://periodicos.pucminas.br/geografia/article/view/25538. Acesso em: 11 set. 2025.

LOPES, Carla Vanessa Alves; ALBUQUERQUE, Guilherme Souza Cavalcanti de. Agrotóxicos e seus impactos na saúde humana e ambiental: uma revisão sistemática. **Saúde em Debate**, [S.L.], v. 42, n. 117, p. 518-534, jun. 2018. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: https://www.scielo.br/j/sdeb/a/bGBYRZvVVKMrV4yzqfwwKtP/. Acesso em: 20 jun. 2025.

LOSCH, Edaciano Leandro *et al*. Os agrotóxicos no contexto da Saúde Única. **Saúde em Debate**, [S.L.], v. 46, n. 2, p. 438-454, 2022. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: https://www.scielo.br/j/sdeb/a/JBdk4QSc8nFxc5wxRzcMYqM/. Acesso em: 22 mar. 2025.

MELLER, Fernanda; REOLON-COSTA, Angélica; CEOLIN, Silvana. Uso de pesticidas e riscos para a saúde humana: panorama da área rural do município de Independência - RS. **Research, Society and Development**, [S. l.] , v. 10, n. 13, p. e454101321161, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i13.21161 . Disponível em: https://rsdjournal.org/rsd/article/view/21161 . Acesso em: 10 mar. 2026.

MONTAGNER, Cassiana Carolina *et al*. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. **Química Nova**, v. 40, p. 1094-1110, 2017.

NASCIMENTO, Diego Zapelini do; MARQUES, Gabriela Moreno; TREVISOL, Daisson José. O desafio das agências reguladoras ao redor do mundo no uso do glifosato. Saúde e Sociedade, [S.L.], v. 28, n. 4, p. 297-298, dez. 2019. **FapUNIFESP** (SciELO). Disponível em: https://www.scielo.br/j/sausoc/a/zFbTrgdPGYJQCKqjhx6wxwF/?lang=pt. Acesso em: 25 jun. 2025.

OLIVEIRA, Luã Kramer *et al*. Processo sócio-sanitário-ambiental da poluição por agrotóxicos na bacia dos rios Juruena, Tapajós e Amazonas em Mato Grosso, Brasil. **Saúde e Sociedade**, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 573-587, 2018.

PEREIRA, Nuria *et al*. Mechanical, microstructural and electrical characterization of Portland cement mortars with foundry slags as sand replacement. Journal Of Building Engineering, [S.L.], v. 100, p. 111786, abr. 2025. **Elsevier BV.** http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2025.111786. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710225000221?via%3Dihub. Acesso em: 20 abr. 2026.

POL, Jeferson Jeldoci; HUPFFER, Haide Maria; FIGUEIREDO, João Alcione Sganderla. Os riscos do agrotóxico glifosato: controvérsia científica ou negação do dano à saúde humana. **Revista Opinião Jurídica** (Fortaleza), [S.L.], v. 19, n. 32, p. 267, 6 ago. 2021. Instituto para o Desenvolvimento da Educação. Disponível em: https://periodicos.unichristus.edu.br/opiniaojuridica/article/view/3596/1403. Acesso em: 26 jun. 2025.

QIU, Fuguo *et al*.. Adsorption of Glyphosate in Water Using Iron-Based Water Treatment Residuals Derived from Drinking Water Treatment Plants. **Processes**, [S.L.], v. 12, n. 7, p. 1352, 28 jun. 2024. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/pr12071352. Disponível em: https://www.mdpi.com/2227-9717/12/7/1352. Acesso em: 30 mar. 2026.

RAD, Samira Mosalaei; RAY, Ajay K.; BARGHI, Shahzad. **Water Pollution and Agriculture Pesticide. Clean Technologies**, [S.L.], v. 4, n. 4, p. 1088-1102, 20 out. 2022. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/cleantechnol4040066. Disponível em: https://www.mdpi.com/2571-8797/4/4/66. Acesso em: 07 abr. 2026.

RAMOS, Adolfo de Souza; OLIVEIRA, Vicente de Paulo Santos de; ARAÚJO, Thiago Moreira de Rezende. Qualidade da água: parâmetros e métodos mais utilizados para análise de água de recursos hídricos superficiais. **Holos Environment**, [S. l.], v. 19, n. 2, p. 205–219, 2019. DOI: 10.14295/holos.v19i2.12315.

RIBEIRO, Suellen Dayse de Moura *et al*. A **comercialização de agrotóxicos e o modelo químico-dependente da agricultura do Brasil. Saúde em Debate**, [S.L.], v. 46, n. 2, p. 210-223, 2022. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: https://www.scielo.br/j/sdeb/a/Xfb8PRPzXmNdbyWWdwMtGXf/. Acesso em: 19 jun. 2025.

SANTOS, Caroline Emiliano *et al.* **Mapeamento Do Potencial De Contaminação Das Águas Subterrâneas E Superficiais Por Agrotóxicos No Nw Do Rio Grande Do Sul.** Geosciences = Geociências, [S.L.], v. 40, n. 4, p. 949-964, 2 fev. 2022. UNESP - Universidade Estadual Paulista. http://dx.doi.org/10.5016/geociencias.v40i04.15459.

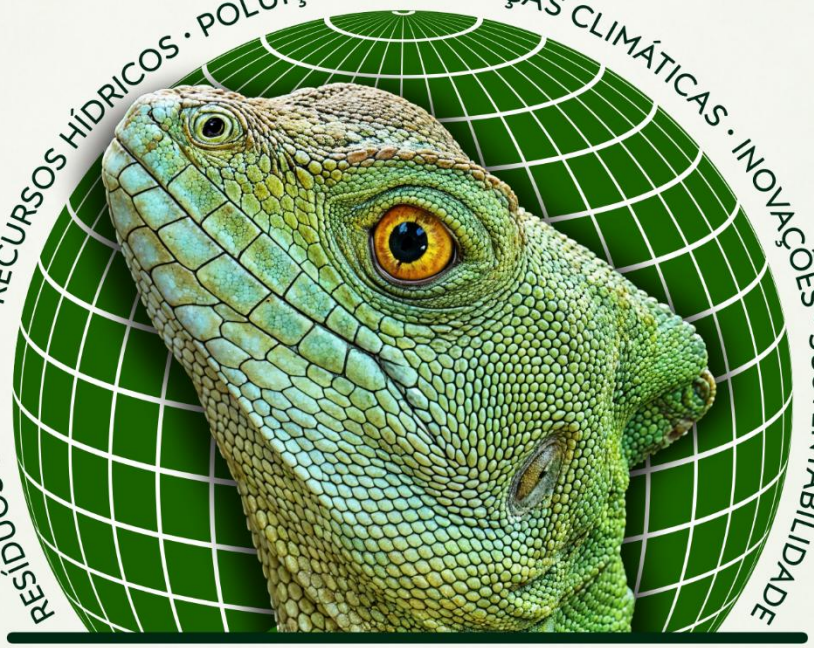
SIDDIQUE, Rafat; SINGH, Gurpreet. **Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 55, n. 11, p. 885-892, set. 2011. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.001.

ZUKER, Fábio; CARDOSO, Jéssica Ferreira. As múltiplas existências do glifosato: uma etnografia da indústria agroalimentar seguindo um veneno. **Revista de Antropologia**,[s. l.]. v. 68, p. e222607, 2025

ZHOU, Yun *et al*. Characterization and environmental risk assessment of heavy metals found in fly ashes from waste filter bags obtained from a Chinese steel plant. **Ecotoxicology And Environmental Safety,** [S.L.], v. 95, p. 130-136, set. 2013. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.05.026.

ÁREA TEMÁTICA 36

SUSTENTABILIDADE DO AGRONEGÓCIO



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

GESTÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NA BOVINOCULTURA: COMPARAÇÃO ENTRE PADRÕES LEGAIS E IMPLICAÇÕES PARA SUSTENTABILIDADE PRODUTIVA

1Ana Moutinho Vilella Machado, 2 Danilo Barbosa Ferreira, 3 Marcelo Libânio
1 Departamento de Clínica e Cirurgia Veterinárias - UFMG, e-mail: ana.ufmg.vet@gmail.com; 2 Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, e-mail: danilobarbosaferreira00@gmail.com; 3 Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, e-mail: marcelo@desa.ufmg.br

Palavras-chave: Dessedentação animal; Sustentabilidade agropecuária; Gestão de recursos hídricos

Introdução

A pecuária representa um dos principais pilares do agronegócio brasileiro, responsável por aproximadamente 8,2% do Produto Interno Bruto nacional. Em 2023, o PIB da cadeia produtiva da carne bovina alcançou USD 179,2 bilhões, com 71,5% da produção destinada ao mercado interno e 28,5% à exportação. No mesmo ano, o Brasil exportou 2,29 milhões de toneladas de carne bovina para 157 países, gerando uma receita de USD 10,55 bilhões e mantendo-se, desde 2004, como o maior exportador mundial do produto (Embrapa, 2025). No segmento leiteiro, a produção nacional atingiu 35,37 bilhões de litros, posicionando o país em quarto lugar no ranking global, entretanto, entre 2002 e 2023, foram exportados apenas 260 milhões e importados 967,8 milhões de litros equivalentes. Ainda assim, o setor primário da produção de leite movimenta anualmente cerca de R$ 67,8 bilhões (Embrapa, 2025). Em escala global, o rebanho bovino deve ultrapassar 914 milhões de cabeças em 2025, sendo o Brasil o segundo maior detentor, com cerca de 197 milhões de animais em 2023, com sua maior parte destinada à pecuária de corte, e apenas aproximadamente 24,6 milhões de vacas destinadas à produção leiteira (Embrapa, 2025).

A bovinocultura apresenta distintas demandas hídricas entre os sistemas de produção de carne e leite. Estudos sobre "água virtual" indicam que a produção de 1 kg de carne bovina pode requerer até 15 mil litros de água, ao se considerar o consumo direto dos animais, a irrigação de pastagens e o uso em frigoríficos, conforme o conceito de água virtual, definido como o volume total de água utilizado ao longo da cadeia produtiva (Allan, 2003; Mekonnen & Hoekstra, 2012). Já na bovinocultura leiteira, a produção de 1 litro de leite demanda entre 600 e 1.000 litros de água em sistemas intensivos (Mekonnen & Hoekstra, 2012).

Além da água incorporada ao processo produtivo, é fundamental compreender o papel do consumo direto de água pelo animal, tendo em vista sua influência na eficiência zootécnica. A ingestão hídrica total aumenta de forma diretamente proporcional à ingestão de matéria seca e ao peso corporal, enquanto a adequada hidratação favorece o metabolismo energético e a digestibilidade dos nutrientes, resultando em melhor conversão alimentar e maior ganho de peso médio diário (Wagner & Engle, 2021; Ahlberg et al., 2019). Na bovinocultura leiteira, o consumo constante de água é essencial para a produção láctea, sendo estimado que vacas em lactação necessitam de aproximadamente 0,37 litros de água para cada 0,45 kg de leite produzido (Linn & Raeth-Knight, 2005).

O volume de água ideal para bovinos de corte e leite varia conforme fatores como peso corporal, dieta, temperatura ambiente, umidade relativa e estágio fisiológico (Wright, 2007; Morgan, 2011). Um animal adulto de 450 kg consome, em média, cerca de 40 litros de água por dia, podendo apresentar aumento significativo em condições de estresse térmico (Mason & Martin, 2022). Aspectos genéticos também influenciam essa demanda, sendo que raças europeias (Bos taurus) tendem a consumir mais água que raças zebuínas (Bos indicus) (Ahlberg et al., 2019). Além do volume, a qualidade da água é determinante para o desempenho zootécnico e a saúde do rebanho, uma vez que águas de baixa qualidade reduzem o consumo voluntário, afetando o ganho de peso, a produção de leite e a rentabilidade (Higgins et al., 2008; Morgan, 2011). A oferta de água livre de contaminantes contribui para o equilíbrio osmótico e a homeostase metabólica, refletindo em melhor desempenho produtivo e reprodutivo (Wagner & Engle, 2021).

A água fornecida aos animais deve atender a padrões físico-químicos e microbiológicos adequados, contemplando valores ideais de pH, dureza, sólidos dissolvidos totais, além do controle de microrganismos como *E. coli* e coliformes totais (Higgins et al., 2008; Brazil, 2021). Também é essencial o monitoramento das concentrações de íons e metais, incluindo nitrato, nitrito, cloreto, sódio, sulfato, alumínio, ferro, manganês, zinco, arsênio, cobre, níquel e chumbo (Brazil, 2005; Morgan, 2011). Cada parâmetro deve ser mantido dentro de faixas adequadas, pois desvios nesses limites interferem na ingestão voluntária de água e no desempenho produtivo (Wright, 2007).

A análise comparativa da qualidade da água destinada ao consumo humano e à dessedentação animal permite compreender sua relação com a eficiência produtiva e a sustentabilidade agropecuária. Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo realizar uma análise comparativa dos padrões de qualidade da água destinados ao consumo humano e à dessedentação de bovinos de corte e leite, com base em legislações nacionais e referências técnicas consolidadas. Busca-se identificar diferenças nos limites máximos recomendados para parâmetros físico-químicos e microbiológicos, bem como discutir suas implicações sobre o desempenho produtivo animal, a saúde dos rebanhos e a sustentabilidade dos sistemas pecuários.

Material e Métodos

A Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece padrões de enquadramento dos corpos hídricos superficiais no Brasil, enquanto a Portaria GM/MS nº 888 define padrões de potabilidade para abastecimento humano (Brazil, 2005; Brazil, 2021). Para a presente avaliação, foram selecionados 15 parâmetros estratégicos com base em sua relevância técnica e recorrência na literatura (Higgins et al., 2008; Morgan, 2011). O pH ideal da água para bovinos situa-se entre 5,5 e 9,0, sendo que valores extremos podem reduzir o consumo e afetar a absorção de minerais (Higgins et al., 2008). Já a dureza total não representa risco direto à saúde, mas pode interferir na palatabilidade e na absorção de elementos essenciais (Morgan, 2011).

Para a análise comparativa, foi realizada a sistematização dos limites máximos permitidos ou recomendados para cada parâmetro, considerando quatro abordagens: dessedentação animal conforme a Resolução CONAMA nº 357/2005, consumo humano segundo a Portaria GM/MS nº 888/2021, e valores de referência para bovinos de corte e leite obtidos na literatura técnico-científica. Os dados foram organizados em uma matriz comparativa (Tabela 1), permitindo a avaliação direta das diferenças entre os usos.

Adicionalmente, foi elaborado um gráfico de diferença percentual em relação aos limites estabelecidos para consumo humano, com o objetivo de padronizar a escala de comparação entre parâmetros de diferentes magnitudes. Essa abordagem permitiu evidenciar de forma mais clara as discrepâncias entre os padrões adotados para cada finalidade, facilitando a interpretação dos resultados.

Resultados e Discussão

A comparação entre os padrões de qualidade da água para diferentes usos permite identificar variações significativas nos limites estabelecidos para cada parâmetro, refletindo diferenças nos níveis de tolerância entre humanos e bovinos, bem como nas exigências produtivas dos sistemas pecuários. A Tabela 1 apresenta a síntese dos valores máximos permitidos ou recomendados, possibilitando a análise integrada entre os diferentes referenciais normativos e técnicos.

Parâmetros		Concentrações Máximas Permitidas ou Recomendadas			
		Dessedentação Animal (CONAMA 357)	Consumo Humano (PORTARIA 888)	Criação de Gado de Corte	Criação de Gado de Leite
pH	-	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0	5,5 - 9,0	6,8 - 7,5
Dureza total	mg/ L	-	300	60 - 350	500
SDT		500	500	1000	500
Sulfato		250	250	300 - 500	500
Alumínio		0,2	0,2	5,0	0,5
Manganês		0,5	0,1	0,05	0,05 - 0,17
Zinco		5,0	5,0	24,0	5,0
Arsênio		0,033	0,01	0,2	0,05
Cobre		0,013	2,0	0,5	0,07
Níquel		0,025	0,07	1,0	0,25
Chumbo		0,033	0,01	0,1	0,015
Nitrato		10	10	10 - 45	44
Nitrito		1,0	1,0	33 - 44	10
Escherichia coli	Unid. para 100 mL	-	0	1	0 - 1
Cianobactérias	mm^3/L	100000	20000	20000	20000

Tabela 01: Concentrações Máximas Permitidas ou Recomendadas de Parâmetros de Qualidade da Água para Usos. Fonte: Autoral (2025)

A partir dos dados apresentados na Tabela 1, observa-se que diversos parâmetros apresentam amplitudes distintas entre os usos analisados, com destaque para compostos nitrogenados, metais-traço e sólidos dissolvidos totais. Essas variações indicam que os limites adotados para a dessedentação animal e para a produção pecuária são, em muitos casos, mais permissivos que aqueles estabelecidos para o consumo humano, refletindo diferenças fisiológicas e de sensibilidade entre as espécies, além das demandas produtivas envolvidas.

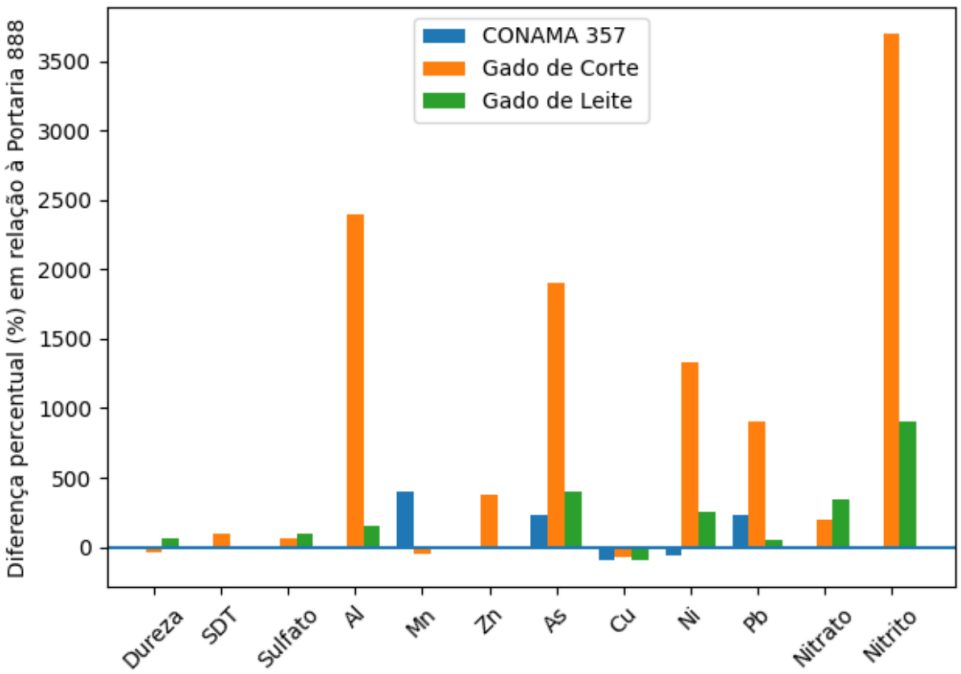


Figura 1: Diferença percentual em relação à Portaria 888.
Fonte: Autoral (2026)

Com o intuito de facilitar a visualização dessas diferenças, a Figura 1 apresenta a variação percentual dos limites em relação aos padrões de potabilidade humana. Essa abordagem permite comparar parâmetros com diferentes ordens de magnitude em uma mesma escala, evidenciando de forma mais clara quais substâncias apresentam maior discrepância entre os usos avaliados.

A dureza total não representa risco direto à saúde, mas pode interferir na palatabilidade e na absorção de elementos essenciais (Morgan, 2011). A ingestão de água com concentrações elevadas de sódio e cloreto pode provocar desidratação, diarreia e redução da eficiência alimentar, podendo evoluir para intoxicação salina em casos agudos (Wright, 2007; Morgan, 2011). Em vacas leiteiras, níveis elevados de sódio podem comprometer o equilíbrio eletrolítico e a qualidade do leite (Linn & Raeth-Knight, 2005). Os sulfatos, em altas concentrações, apresentam efeito laxativo e podem interferir na absorção de cobre, além de estarem associados a distúrbios neurológicos como a polioencefalomalácia (Higgins et al., 2008).

A contaminação por nitratos e nitritos é uma das causas mais comuns de intoxicação hídrica em ruminantes. Em condições normais, o nitrato é convertido em nitrito e posteriormente em amônia no rúmen; entretanto, em situações de ingestão excessiva, ocorre acúmulo de nitrito, que reage com a hemoglobina formando metemoglobina, reduzindo a capacidade de transporte de oxigênio no sangue (Morgan, 2011; Wright, 2007). Os sinais clínicos incluem fraqueza, dispneia, mucosas cianóticas, abortos e morte súbita. Mesmo níveis subclínicos podem comprometer o ganho de peso e a produção leiteira (Higgins et al., 2008).

O excesso de metais-traço como chumbo e arsênio representa risco significativo à saúde animal. O chumbo pode causar intoxicações neurológicas e distúrbios gastrointestinais, além de se acumular em tecidos e ser excretado no leite (Morgan, 2011). O arsênio está associado a distúrbios gastrointestinais, lesões hepáticas e renais e efeitos crônicos como imunossupressão (Wright, 2007). O alumínio, quando em concentrações elevadas, pode interferir na absorção de fósforo e cálcio, comprometendo o metabolismo ósseo e a eficiência produtiva (Higgins et al., 2008).

A contaminação microbiológica, indicada pela presença de *E. coli* e coliformes totais, representa risco direto à saúde do rebanho, estando associada a doenças entéricas e reprodutivas (Brazil, 2021; Mohammed, 2016). Rebanhos com acesso a água de boa qualidade microbiológica apresentam maior consumo voluntário, melhor desempenho produtivo e menor incidência de enfermidades (Mohammed, 2016).

De forma geral, os resultados indicam que os parâmetros relacionados a compostos nitrogenados e metais-traço apresentam as maiores variações entre os padrões analisados, evidenciando diferenças significativas nos limites de segurança adotados. Enquanto a legislação voltada ao consumo humano tende a ser mais restritiva, visando a proteção da saúde pública, os limites estabelecidos para bovinos consideram a capacidade adaptativa dos animais e os impactos sobre o desempenho produtivo. No entanto, níveis elevados de determinados compostos podem comprometer tanto a eficiência produtiva quanto a qualidade dos produtos de origem animal, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade da água nos sistemas pecuários.

Considerações Finais

Os resultados evidenciam que a manutenção da qualidade da água é determinante não apenas para a saúde e o bem-estar animal, mas também para a eficiência produtiva e a sustentabilidade dos sistemas pecuários. A oferta de água em padrões adequados reduz o estresse fisiológico, otimiza o metabolismo e melhora a conversão alimentar, contribuindo para maior produtividade e menor uso de recursos naturais (Wagner & Engle, 2021; Minho & Mane, 2014).

Os resultados evidenciam que a qualidade da água desempenha papel central na interface entre saúde animal, eficiência produtiva e sustentabilidade dos sistemas pecuários. A análise comparativa demonstrou que, embora os limites estabelecidos para dessedentação animal sejam, em muitos casos, mais permissivos que aqueles definidos para consumo humano, tais diferenças estão diretamente relacionadas às particularidades fisiológicas dos bovinos e às exigências dos sistemas de produção.

Entretanto, a adoção de padrões menos restritivos não elimina os riscos associados à presença de contaminantes, uma vez que concentrações elevadas de determinados parâmetros podem impactar negativamente o desempenho zootécnico, a qualidade dos produtos e, potencialmente, a saúde pública. Nesse sentido, destaca-se a importância da gestão integrada da qualidade da água, aliando monitoramento sistemático, adequação às normativas vigentes e aplicação de boas práticas de manejo.

Dessa forma, a garantia de água em condições adequadas não apenas promove o bem-estar animal, mas também contribui para a otimização do uso de recursos naturais e para o fortalecimento da sustentabilidade e competitividade do agronegócio brasileiro.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Universidade Federal de Minas Gerais pelo apoio a pesquisa.

Referências Bibliográficas

AHLBERG, C. M. et al. Characterization of water intake and water efficiency in beef cattle. *Journal of Animal Science*, v. 97, n. 12, p. 4770–4782, 2019.

ALLAN, J. A. Virtual water – the water, food, and trade nexus. *Water International*, v. 28, n. 1, p. 4–11, 2003.

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. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Anuário do leite 2025*. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Anuário da cadeia produtiva da carne bovina 2024–2025 (CiCarne)*. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2025.

HIGGINS, S. F.; AGOURIDIS, C. T.; GUMBERT, A. A. Drinking water quality guidelines for cattle. Lexington: University of Kentucky Cooperative Extension Service, 2008.

LINN, J.; RAETH-KNIGHT, M. Water quality and quantity for dairy cattle. Minnesota: University of Minnesota Extension, 2005.

MASON, K.; MARTIN, G. Water quality for beef cattle. Knoxville: University of Tennessee, Institute of Agriculture, 2022.

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, v. 15, n. 3, p. 401–415, 2012.

MEKONNEN, M. M.; GERBENS-LEENES, P. W. The water footprint of global food production. *Water*, v. 12, n. 10, p. 2696, 2020.

MINHO, A. P.; MANE, E. B. G. Manejo da água na pecuária: aplicação de conceitos, princípios e práticas para racionalizar o uso. In: _____. *[Título da obra completa, se houver]*. [S.l.: s.n.], 2014. Cap. 5.

MOHAMMED, A. N. Field study on evaluation of the efficacy and usability of two disinfectants for drinking water treatment at small cattle breeders and dairy cattle farms. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 188, p. 151, 2016.

MORGAN, S. E. Water quality for cattle. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, v. 27, n. 2, p. 285–295, 2011.

WAGNER, J. J.; ENGLE, T. E. Water consumption and drinking behavior of beef cattle, and effects of water quality. *Applied Animal Science*, v. 37, n. 4, p. 418–435, 2021.

WRIGHT, C. L. Management of water quality for beef cattle. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, v. 23, n. 1, p. 91–103, 2007.

ESTOQUES DE CARBONO EM SISTEMAS DE USO DO SOLO COM MACAÚBA (*Acrocomia aculeata*) NA CAATINGA

1 Giulia Karolline Kaminski, 2 Josileia Acordi Zanatta, 3 Vanderley Porfírio da Silva, 4 Simone Palma Favaro; 5 Humberto Umbelino de Sousa; 6 Francisco Jose de Seixas Santos

1 Bolsista – Embrapa Florestas e-mail:giulia.kkaminski@gmail.com; 2 Pesquisadora – Embrapa Florestas , e-mail: josileia.zanatta@embrapa.br; 3 Pesquisador – Embrapa Florestas, e-mail: vanderley.porfirio@embrapa.br; 4 Pesquisadora – Embrapa Agroenergia, e-mail: simone.favaro@embrapa.br; 5 Pesquisador - Embrapa Meio Norte, e-mail: humberto.souza@embrapa.br; 6 Pesquisador - Embrapa Meio Norte, e-mail: fransisco.seixas@embrapa.br

Palavras-chave: biocombustível; sequestro de carbono; sistemas silvipastoris.

Introdução

A crescente preocupação e ações voltadas à redução das emissões de gases de efeito estufa, visando minimizar os efeitos da mudança climática, têm se intensificado nos últimos anos, com a criação de acordos e planos governamentais para identificar soluções e práticas capazes de diminuir os impactos ambientais. Entre essas estratégias, destaca-se o sequestro e armazenamento de carbono no solo. O solo é o segundo maior reservatório de carbono no mundo e apresenta um papel fundamental na mitigação da mudança climática. O acúmulo de carbono orgânico do solo (COS) está diretamente relacionado à contribuição de materiais vegetais, à atividade de microrganismos e às práticas de manejo adotadas (Mazumder et al., 2025).

Em paralelo, a crescente demanda por culturas oleaginosas para produção de biocombustíveis tem impulsionado alternativas que substituam combustíveis fósseis, reduzam a emissão de gases de efeito estufa e não concorram com áreas destinadas à produção de alimentos. Nesse contexto, a macaúba tem se mostrado uma espécie promissora. A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palmeira nativa dos trópicos do continente americano, produtora de frutos com alto teor de óleo, utilizados na produção de biodiesel, bioquerosene e na indústria de cosméticos (Barbosa-Evaristo et al., 2018). Diferentemente de espécies florestais que produzem madeira, o produto principal da macaúba são os frutos, permitindo que a planta permaneça na área após a colheita, o que favorece sua inserção em sistemas integrados (Ampese et al., 2023). Além disso, a espécie atinge sua produtividade máxima em cerca de quatro anos e pode permanecer produtiva por mais de 100 anos, apresentando rendimento de óleo superior ao da soja (Silva et al., 2018).

A arquitetura de sua copa, do tipo monopodial, permite a redução da temperatura em áreas de pastagem sem comprometer o desenvolvimento do pasto (Lorenzi, 2006; Mota et al., 2011). Embora já seja cultivada principalmente em áreas de cerrado, ainda são necessários estudos que avaliem seu desempenho em outros contextos, como em sistemas silvipastoris e sistemas irrigados na Caatinga, especialmente quanto ao seu potencial de sequestro de carbono em diferentes condições de solo e vegetação (Vargas-Carpinteiro et al., 2021). Estudos anteriores indicam eficiência da macaúba no sequestro e armazenamento de carbono em solos argilosos (Moreira et al., 2024), porém ainda há lacunas quanto ao seu comportamento em solos arenosos.

A caatinga pode atuar como depósito de carbono, embora esse papel ainda seja pouco explorado devido à sua sazonalidade climática. Nesse cenário, a adoção de sistemas de manejo mais sustentáveis pode contribuir para o aumento do estoque de carbono no solo (Souza et al., 2019), especialmente considerando que os solos da região são, em geral, pobres em COS, o que torna a produção agrícola dependente de práticas eficientes de conservação do solo.

Material e Métodos

O estudo foi conduzido na Unidade de Execução de Pesquisa da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA Meio-Norte), localizada no município de Parnaíba, Piauí, Brasil (3°05’ S, 41°46’ W). O solo da área é classificado como Latossolo Amarelo e a vegetação do tipo Caatinga. A área experimental foi implantada entre os anos de 2015 e 2016. O delineamento experimental adotado foi em blocos inteiramente casualizados, contemplando quatro sistemas de uso da terra: (i) sistema silvipastoril com *Acrocomia aculeata* (macaúba) em fileira simples consorciada com *Brachiaria brizantha* (capim-marandu), denominado IPFS; (ii) sistema silvipastoril com *Acrocomia aculeata* em fileira dupla consorciada com *Brachiaria brizantha*, denominado IPFD; (iii) monocultivo de *Acrocomia aculeata*, manejado com adubação e irrigação (MI); (iv) área de mata nativa (MT), caracterizada por vegetação típica de Caatinga utilizada como área de referência.

As amostras de solo foram coletadas manualmente em novembro de 2024. O solo foi amostrado por meio de trincheiras, nas camadas 0-10, 10-20, 20-30, 30-50 e 50-100 cm. Em cada ponto de amostragem o solo foi coletado com espátula, destorroado, seco em estufa a 45°C, moído e peneirado para 2mm. Uma porção desse solo foi finamente moída (<250µm) para proceder a análise de Carbono. Subamostras de solo não perturbadas foram coletadas de cada camada para determinar a densidade do solo pelo método do cilindro volumétrico (Teixeira *et al.*, 2017).

As amostras secas ao ar, moídas e peneiradas (≤250 µm) foram submetidas a combustão seca (Vario Macro Cube, Elementar Analyser) para determinar o carbono total do solo. Para cada uso do solo foram analisadas 12 réplicas de solo nas camadas 0-30 cm e para as camadas de 30-100 cm. Os estoques de carbono foram estimados pelo método da camada equivalente de solo.

Os dados foram testados, cumprindo a suposição de normalidade. Foram realizadas análises de variância (ANOVA), seguida de modelos lineares mistos e teste de comparação de médias de Tukey. Todas as análises foram realizadas no programa R Studio, considerando blocos inteiramente casualizados, com 3 repetições por bloco

Resultados e Discussão

As concentrações de carbono nas camadas superficiais, principalmente até 30 cm (Figura 1), foram maiores na área de mata nativa, seguidas pelas áreas de macaúba em sistemas silvipastoris e monocultivo. Essas diferenças certamente são devido ao histórico de uso da área com frutíferas e outras espécies e também pelas práticas de manejo adotadas, refletindo nos teores de carbono do solo. A análise do teor de carbono no início do experimento na camada de 0-20 cm indicou 38 g kg^{-1}. A partir desse referencial, considera-se que os sistemas de produção de macaúba no sistema silvipastoril estão evoluindo para teores de carbono superiores ao valor inicial, principalmente na camada de 0-10 cm (6,5 g kg^{-1}). A macaúba em monocultivo com adubação e irrigação, também demonstra aumento nos teores de carbono na camada superficial, mas abaixo de 10 cm, os teores são equivalentes ao valor estimado no início do experimento. A presença da pastagem nos sistemas silvipastoris certamente adiciona maior quantidade de resíduos no sistema de produção e suporta o processo de manutenção/ganho de carbono no solo.

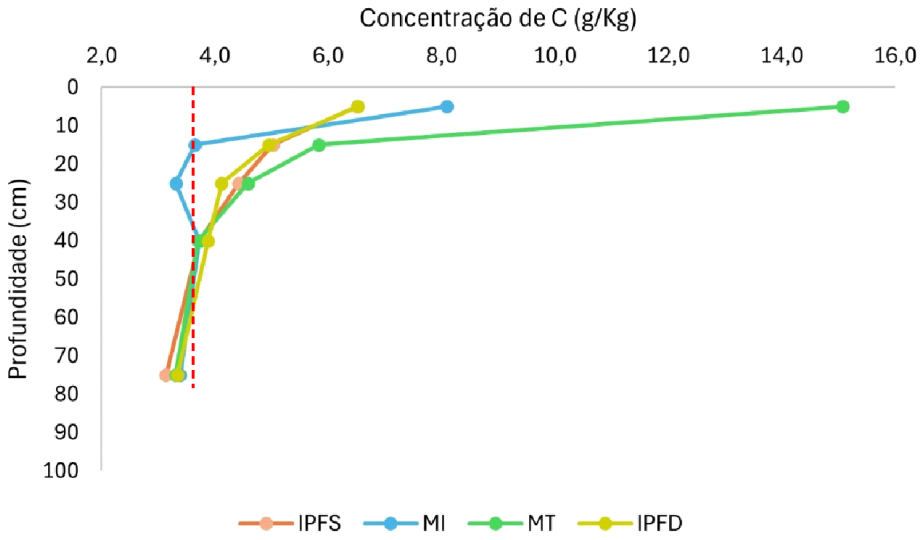


Figura 01: Concentração de carbono (g/kg^{-1}) ao longo do perfil do solo sob sistemas de uso. Linha tracejada vermelha representa o teor de carbono no início do experimento.

Por outro lado, a macaúba em sistema de monocultivo com irrigação e adubação, apesar do aporte vegetal pela deposição de folhas e exsudatos radiculares, este não é suficiente para subsidiar o aumento do teor de carbono. Outro aspecto importante de destacar é que na presença de irrigação, a manutenção dos teores de carbono no solo fica mais desafiador, pois a umidade facilita a atividade biológica e o processo de mineralização da matéria orgânica do solo (De Bona et al., 2006). A partir da profundidade de 30 cm, observa-se comportamento semelhante entre os sistemas, com concentrações de carbono muito similares entre os sistemas. Esse padrão de decréscimo do carbono em profundidade é esperado, uma vez que há menor aporte de material vegetal nas camadas mais profundas, resultando em menor acúmulo de carbono.

Como reflexo dos teores de carbono, os estoques de carbono do solo, tanto na camada de 0–30 cm (Figura 2A), como na camada de 0-100 cm foram inferiores aos da referência (mata nativa – MT), o que já era esperado por se tratar de uma área sem interferência antrópica e com maior diversidade vegetal, e devido ao histórico de uso da área antes da implantação da macaúba. Entre os sistemas de produção, porém, não há diferenças nos estoques de carbono e os conteúdos variam de 20 a 25 Mg ha^{-1} na camada de 0-30 cm e de 54 a 58 Mg ha^{-1} na camada de 0-100 cm.

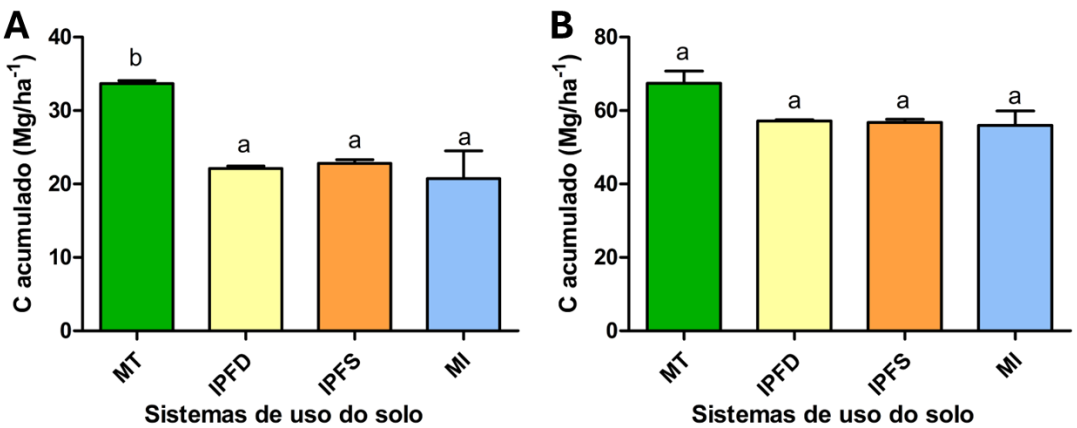


Figura 02: Carbono acumulado nas camadas 0-30 (A) e 0-100 (B) em diferentes sistemas de uso do solo
Fonte: o autor (2026)

A macaúba apresenta sistema radicular profundo, ultrapassando 1 m e se estendendo lateralmente pela projeção da copa, o que favorece o armazenamento de carbono no solo em subsuperfície, sendo que cerca de 80% das raízes atingem essa profundidade (Moreira et al., 2019). Nos sistemas integrados, a presença de palmeiras e de serrapilheira da pastagem também contribui para a manutenção de temperaturas mais amenas no solo e para a regulação da atividade microbiana, favorecendo o acúmulo de carbono. O arranjo do sistema silvipastoril com macaúba, em fila simples ou dupla, não influenciou o acúmulo de carbono, com desempenho semelhante entre os arranjos. Embora a macaúba seja tradicionalmente cultivada em áreas de cerrado, seu cultivo em áreas de caatinga é viável por meio de sistemas integrados e ou com presença de irrigação, especialmente em solos arenosos, que apresentam baixa capacidade de armazenamento de água (Motta et al., 2002). A irrigação favorece a decomposição da serrapilheira e da matéria orgânica, enquanto, nos sistemas integrados, a presença da pastagem associada à cobertura do solo, favorece a manutenção da umidade e maior aporte de material vegetal.

Considerações Finais

Sistemas integrados de produção silvipastoril com macaúba em solos arenosos podem regenerar ou manter o carbono no solo em áreas de caatinga que anteriormente tiveram os teores de carbono comprometidos pelo histórico de uso, podendo representar uma estratégia para mitigar a emissão de gases de efeito estufa e mudança climática nessa região. O monitoramento da evolução desses resultados é importante para confirmar o potencial desses sistemas no longo prazo.

Agradecimentos

Os autores agradecem Acelen Renováveis pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

AMPESE, L.C.; BULLER, L.S.; MONROY, Y.M.; GARCIA, M.P.; RAMOS-RODRIGUEZ, A.R.; FORSTER-CARNEIRO, T. Macaúba's world scenario: a bibliometric analysis, **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, p. 3329-3347, 2023.

BARBOSA-EVARISTO, A.; FERNÁNDEZ-COPPEL, I. A.; CORRÊA-GUIMARÃES, A.; MARTÍN-GIL, J.; DUARTE-PIMENTEL, L.; SARAIVA-GROSSI, J.A.; NAVAS-GARCIA, L.M.; MARTÍN-RAMOS, J.A Simulation of macuba palm cultivation: na energy-balace and greenhouse gas emissions analysis. **Carbon Management**, v. 9, p. 243-254, 2018.

CARVALHO, A.M.; QUINTANA, L.G.; SOUZA, A.M.; COSER, T.R.; SOUZA, T.R.; OLIVEIRA, A.D.; RAMOS, M.L.G. Decomposition, biochemical composition and nutriente cycling of macauba palm in a Cerrado Entisol. **Scientia Agricola**, v. 81, 2024.

DE BONA, F. D.; BAYER, C.; BERGAMASCHI, H.; DIECKOW, J. Carbono orgânico no solo em sistemas irrigados por aspersão sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 5, p. 911-920, 2006.

ESQUIVEL-MIMENZA, H.; IBRAHIM, M.; HARVEY, C.A.; BENJAMIN, T.; SINCLAIR, F.L. Standing herbage biomass under different tree species dispersed in pastures of cattle farms. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 16, p. 277-288, 2013.

LORENZI, G.M.A.C. *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lood. Ex Mart. Arecaceae: bases para o extrativismo sustentável. **Tese Doutorado**, Universidade Federal do Paraná, Brasil, 2006.

MAZUMDER, S.Y.; BANIA, J.K.; SILESHI, G.W.; PAUL, .K. DAS, A.K.; NATH, A.J. Variation in biomass and soil carbon storage and sequestration rates in different agroforestry systems with climatic zones and soil types. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 25, 2025.

MENEZES, R.S.C.; SAMPAIO, E.V.S.B.; GIONGO, V.; PÉREZ-MARIN, A.M. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 3, p. 643-653, 2012.

MOREIRA, S.L.S.; IMBUZEIRO, H.M.A.; DIETRICH, O.H.S.; HENRIQUES, E.; FLORES, M.E.P.; PIMENTEL, L.D.; FERNANDES, R.B.A. Roots distribution of cultivated macauba trees, **Industrial Crops and Products**, v. 137, n. 1, p. 646-651, 2019.

MOREIRA, S.L.S; SANTOS, R.A.F.; PAES, E.C.; BAHIA, M.L.; CERQUEIRA, A.E.S.; PARREIRA, D.S.; IMBUZEIRO, H.M.A.; FERNANDES, R.B.A. Carbon accumulation in the soil and biomass of macauba palm commercial plantations. **Biomass and Bioenergy**, v. 190, 2024.

MOTA, C.S.; CORRÊA, T.R.; GROSSI, J.A.S.; CASTRICINI, A.; RIBEIRO, A.S. Exploração sustentável da macaúba para produção de biodiesel: Colheita, pós-colheita e qualidade dos frutos. **Informe Agropecuário**, v. 32, p. 41-51, 2011.

MOTTA, P.E.F.; CURI, N.; OLIVEIRA-FILHO, A.T.; GOMES, J.B.V. Occurrence of macauba in Minas Gerais, Brazil: relationship with climatic, pedological and vegetation attributes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 7, p. 1023-1031, 2002.

VARGAS-CARPINTEIRO, R.; HILGER, T.; MÖSSINGER, J.; SOUZA, R.F.; ARMAS, J.C.B.; RIEDE, K.; LEWANDOWSKI, I. *Acrocomia* spp.: neglected crop, ballyhooed multipurpose palm or fit for the bioeconomy? A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 41, n. 75, 2021.

SILVA, W.L.G; SALOMÃO, A.A.; SOUZA, P.T.; ANSOLIN, M.; TUBINO, M. Binary blends of biodiesel from macauba (*Acrocomia aculeata*) Kernel oil with other biodiesels. **Journal of the Brazilian Chmical Society**, v. 29, n. 2, p. 240-247, 2018.

SOUZA, B.V.; SOUTO, P. C.; SOUTO, J.S.; SALES, F.C.V.; SOUZA JUNIOR, C.M.P. Carbon in soil in different phisionomies of caatinga in Paraíba, Brazil. **Floresta**, v. 49, n. 2, p. 287-296, 2019.

DESEMPENHO AGRONÔMICO DA CEBOLINHA E SALSINHA EM VASOS SOB FERTIRRIGAÇÃO COM ÁGUA RESIDUÁRIA DE BOVINOCULTURA LEITEIRA

1 Abel Nero de Azevedo, 2 Cesar Gaudêncio da Silva, 3 Cíntia Bezerra de Moraes, 4 Barbara Costa Pereira, 5 Rozileni Piont Kovsky Caletti, 6 Evandro Francisco Ferreira da Silva Souza, 7 Ricardo Ganem Leal, 8 Leonardo Duarte Batista da Silva

1 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail: abel.azevedo590@gmail.com; 2 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail: cesargaudencio@ufrrj.br; 3 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail: cintiaengamb@ufrrj.br; 4 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail: barbaracp90@gmail.com; 5 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail: rozileni.pkc@hotmail.com; 6 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail: evandroffss@gmail.com; 7 PortosRio - Companhia Docas do Rio de Janeiro, e-mail: ricardo.ganem@portosrio.gov.br; 8 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail:monitoreambiental@gmail.com

Palavras-chave: Horticultura; Sustentabilidade; Irrigação

Introdução

O manejo sustentável da produção de hortaliças constitui um dos principais desafios para a agricultura, especialmente em sistemas intensivos de pequena escala, nos quais o uso eficiente da água e dos nutrientes exerce influência direta sobre o desempenho agronômico das culturas. Nesse contexto, a fertirrigação como fonte alternativa de nutrientes tem sido reconhecida como estratégia de sucesso para otimizar o uso de recursos naturais e reduzir a dependência de fertilizantes minerais, contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas hortícolas (Boularbah et al., 2024).

Entre as atividades agropecuárias, a bovinocultura leiteira destaca-se pela geração de volumes expressivos de efluentes com elevada concentração de matéria orgânica e nutrientes, como nitrogênio, fósforo e potássio, cujo manejo inadequado pode resultar em impactos ambientais significativos, incluindo contaminação do solo e eutrofização de corpos hídricos (Cvetkovic et al., 2025). Quando submetidos a processos adequados de tratamento, esses efluentes podem ser reutilizados na agricultura como fonte alternativa de água e nutrientes, possibilitando sua aplicação via fertirrigação e contribuindo para o fechamento de ciclos produtivos em equilíbrio com princípios de sustentabilidade ambiental e economia circular (Jaoude et al., 2025).

Nesse cenário, a utilização da água residuária da bovinocultura leiteira tratada apresenta potencial para integração entre manejo de resíduos agropecuários e produção vegetal, promovendo maior eficiência no uso de insumos e redução da pressão sobre fontes convencionais de água e fertilizantes (Christou et al., 2017). Entre as hortaliças condimentares amplamente cultivadas em sistemas intensivos de pequena escala, destacam-se a cebolinha *Allium fistulosum* e a salsinha *Petroselinum crispum*, espécies de elevada importância na alimentação humana e na produção hortícola, caracterizadas por ciclos relativamente curtos e elevada exigência nutricional. Essas características tornam essas culturas particularmente sensíveis ao manejo da fertirrigação, especialmente quanto ao fornecimento adequado de água e nutrientes ao longo do ciclo produtivo (Ofori et al., 2024).

Embora estudos tenham demonstrado efeitos positivos da aplicação desse efluente sobre o desempenho agronômico de diferentes culturas, ainda são escassas informações sobre a resposta de hortaliças condimentares cultivadas em vasos sob fertirrigação com diferentes proporções de água residuária tratada, especialmente em espécies como *Allium fistulosum* e *Petroselinum crispum*. Além disso, a ausência de informações experimentais sobre níveis adequados de substituição da água de abastecimento por esse efluente tratado dificulta a definição de estratégias tecnicamente seguras e agronomicamente eficientes para sua utilização na fertirrigação dessas espécies (Wang et al., 2022).

Nesse contexto, torna-se necessário compreender como diferentes proporções de água residuária da bovinocultura leiteira tratada influenciam o desempenho agronômico dessas espécies em condições de cultivo em vasos, de modo a subsidiar a definição de níveis da água de abastecimento que possibilitem sua utilização de forma tecnicamente segura e agronomicamente eficiente.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho agronômico da cebolinha *Allium fistulosum* e da salsinha *Petroselinum crispum* cultivadas em vasos sob fertirrigação com diferentes proporções volumétricas de água residuária da bovinocultura leiteira tratada e água de abastecimento, visando identificar níveis de substituição da água de abastecimento pelo efluente tratado agronomicamente eficientes para o manejo da fertirrigação dessas espécies.

Material e Métodos

A pesquisa foi realizada na Fazendinha Agroecológica do Km 47, em Seropédica–RJ, no Sistema Integrado de Produção Agroecológica (SIPA), sob condições de ambiente protegido. Foram conduzidos dois experimentos independentes para as culturas de cebolinha (*Allium fistulosum*) e salsinha (*Petroselinum crispum*), garantindo similaridade de condições edafoclimáticas e de manejo ao longo dos ciclos experimentais. O solo utilizado foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo, previamente caracterizado conforme metodologia da Embrapa. A água residuária da bovinocultura leiteira foi coletada durante a lavagem dos currais do SIPA e submetida a tratamento composto por esterqueira inicial, tanque séptico, filtros biológicos sequenciais, Sistema de Alagado Construído (SAC) de fluxo horizontal e módulo de aquecimento solar.

As culturas foram conduzidas em vasos preenchidos com o solo descrito, sendo instalada no fundo de cada vaso uma camada de 3 cm de brita e manta geotêxtil para favorecer a drenagem. As mudas foram produzidas em substrato à base de vermicomposto (83%), fino de carvão (15%) e torta de mamona (2%) em bandejas de 200 células. Após o transplante, três plantas foram mantidas por unidade experimental, sendo sua média considerada para análise estatística. A irrigação foi realizada manualmente, com frequência ajustada conforme a estação do ano, três vezes por semana no inverno e dia sim dia não na primavera.

O delineamento experimental adotado foi o Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), composto por quatro tratamentos correspondentes às proporções volumétricas de água residuária da bovinocultura leiteira (ARB) e água de abastecimento (AA): 300 mL ARB + 0 mL AA; 200 mL ARB + 100 mL AA; 100 mL ARB + 200 mL AA; e 0 mL ARB + 300 mL AA, aqui descritas como T1, T2, T3 e T4, respectivamente. Cada tratamento contou com dez repetições. Na Figura 01 são apresentados os vasos com as culturas de cebolinha e salsinha.



Figura 02: Vasos de cultivo de cebolinha e salsinha.
Fonte: Autoria própria (2026)

Para a cultura da cebolinha, foram avaliados os parâmetros a altura de planta (AP); o número de talos (NT); o número de perfilhos (NP); o diâmetro do maior talo (DMT); o diâmetro do maior perfilho (DMP) e o diâmetro da touceira (DT). Na cultura da salsinha foram avaliadas a altura de planta (AP); o número de talos (NT); o diâmetro do maior talo (DMT) e o diâmetro da touceira (DT).

Para o tratamento estatístico, verificou-se a normalidade dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk e fez-se a comparação dos tratamentos empregados pelo teste de Kruskal-Wallis, aplicado a um nível de significância de 5%. As análises estatísticas foram realizadas no software R.

Resultados e Discussão

Na Figura 02 estão representados os resultados obtidos para os parâmetros estudados no cultivo da cebolinha. Os tratamentos testados não influenciaram significativamente as variáveis analisadas. Essa ausência de efeito significativo pode ser corroborada pelas observações de Rossi et al. (2024), que ao testarem diferentes concentrações de calda bordalesa, não obtiveram interações estatísticas significativas para o rendimento da cultura na maioria das semanas avaliadas. O parâmetro diâmetro do maior perfilho (DMP) por ter apresentado p-valor = 0,0532, pode ser o mais sensível à variação das características de cada tratamento, enquanto os demais parâmetros foram menos impactados.

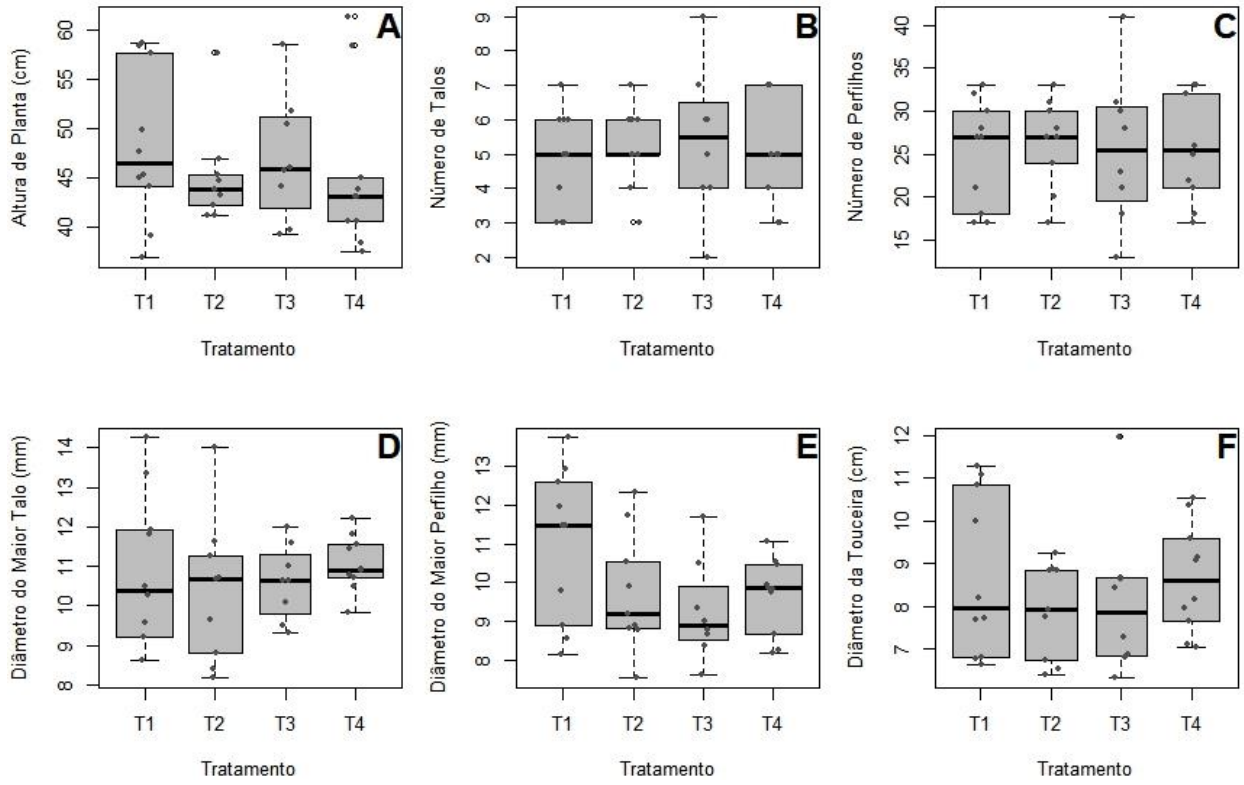


Figura 02: Representação em boxplot dos parâmetros altura de planta (AP) (A), número de talos (NT) (B), número de perfilhos (NP) (C), diâmetro do maior talo (DMT) (D), diâmetro do maior perfilho (DMP) (E) e diâmetro da touceira (DT) (F) de plantas de cebolinha cultivadas sob fertirrigação com diferentes proporções de água residuária da bovinocultura e água de abastecimento.
Fonte: Autoria própria (2026)

Na Figura 03 estão representados os resultados obtidos para os parâmetros estudados no cultivo da salsinha. O teste de Kruskal-Wallis também não indicou diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. De maneira análoga ao que se observou para a cebolinha, a ausência de diferenças significativas sugere que a ARB pode ser utilizada como fonte de água para irrigação sem comprometer o desenvolvimento da cultura.

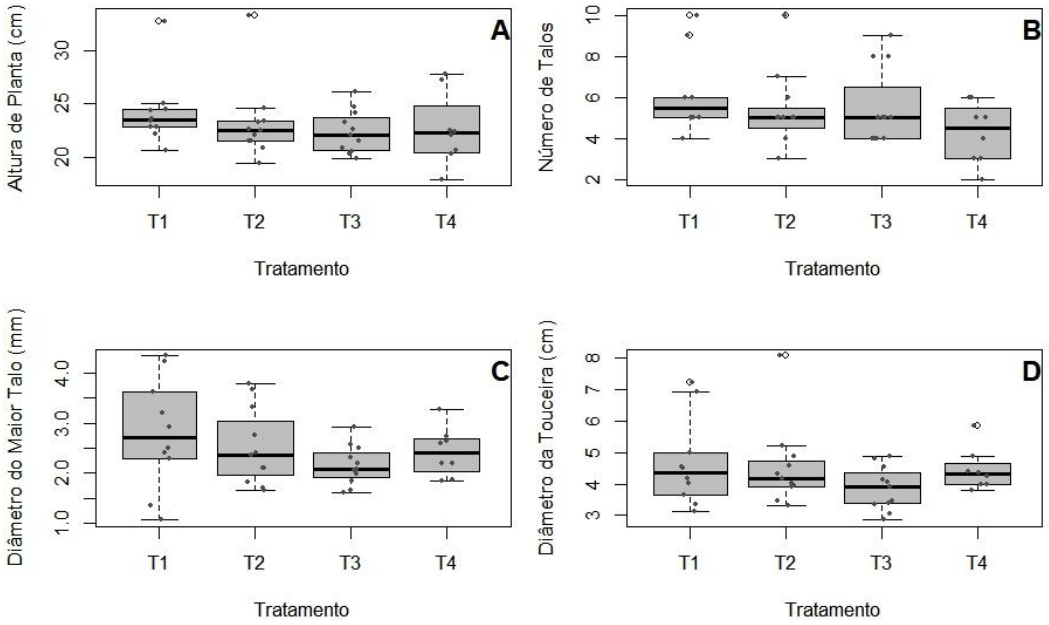


Figura 03: Representação em boxplot dos parâmetros altura de planta (AP) (A), número de talos (NT) (B), diâmetro do maior talo (DMT) (C) e diâmetro da touceira (DT) (D) de plantas de salsinha cultivadas sob fertirrigação com diferentes proporções de água residuária da bovinocultura e água de abastecimento.
Fonte: Autoria própria (2026)

Este resultado corrobora as conclusões de Fekih et al. (2023), que avaliaram o efeito da irrigação com efluente tratado de estação de tratamento de esgoto sobre a salsa. Os autores afirmam que o efluente tratado pode ser utilizado como alternativa hídrica para irrigação de culturas destinadas à alimentação humana. O parâmetro número de talos (NT) com p-valor = 0,0608 no teste estatístico, se mostrou potencialmente mais sensível às características de cada tratamento.

Considerações Finais

Os resultados indicam que a substituição da água de abastecimento por água residuária de bovinocultura, nas proporções testadas, não impactou o desenvolvimento das plantas. As tendências observadas para o diâmetro do maior perfilho na cebolinha e para o número de talos na salsinha sugerem que estas variáveis podem ser mais sensíveis às variações na qualidade da água de irrigação, embora não tenham atingido significância estatística ao nível de 5%. Recomenda-se para estudos futuros a adoção de maior número de repetições para confirmar as tendências observadas.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental da UFRRJ (PGEAAmb), à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA Agrobiologia), à Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro (PESAGRO – RIO) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – (Código de Financiamento 001) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

BOULARBAH, S. et al. Treated wastewater reuse in agriculture: An Overview. **E3S Web of Conferences**, v. 492, p. 05002, 2024. DOI: 10.1051/e3sconf/202449205002

CHRISTOU, A. et al. The potential implications of reclaimed wastewater reuse for irrigation on the agricultural environment: The knowns and unknowns of the fate of antibiotics and antibiotic resistant bacteria and resistance genes – A review. **Water Research**, v. 123, p. 448–467, 2017. DOI: 10.1016/j.watres.2017.07.004

CVETKOVIĆ, B. R. et al. Addressing wastewater challenges in the dairy industry: a focused case study. **Journal of Dairy Research**, v. 92, n. 2, p. 135–145, 2025. DOI: 10.1017/S0022029925101131

FEKIH, I. et al. Reuse of treated urban wastewater on the growth and physiology of Medicago sativa L. cv. Gea and Petroselinum crispum L. cv. Commun: correlation with oxidative stress and DNA damage**. Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 21, p. 59449-59469, 2023. DOI: 10.1007/s11356-023-26474-8.

JAOUDE, L. et al. Treated wastewater reuse and its impact on soil properties and potato and corn growth. **Science of The Total Environment**, v. 958, p. 178130, 2025. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.178130

OFORI, S. et al. Reuse of Treated Wastewater for Crop Irrigation: Water Suitability, Fertilization Potential, and Impact on Selected Soil Physicochemical Properties. **Water**, v. 16, n. 3, p. 484, 2024. DOI: 10.3390/w16030484

ROSSI, A. J. D. et al. Organic cultivation of Allium fistulosum under concentrations of Bordeaux mixture. **Comunicata Scientiae**, v. 15, p. e4091, 2024. DOI: 10.14295/CS.v15.4091

WANG, H.; WANG, J.; YU, X. Wastewater irrigation and crop yield: A meta-analysis. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 21, n. 4, p. 1215–1224, 2022. DOI: 10.1016/S2095-3119(21)63853-4.

BIOFERTILIZANTES DE VINHOTO: INFLUÊNCIA DA FORMA DE APLICAÇÃO NA UMIDADE DO SOLO E DESEMPENHO AGRONÔMICO FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Thiago Henrique Silva de Almeida[1], Izadora Barroso Santos[2], Victor Rezende Moreira[3]
1 Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: thiagohsa@ufmg.br; 2 Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: izadorabarroso@ufmg.br; 3 Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: victor@desa.ufmg.br

Palavras-chave: Indústria sucroalcooleira; Processos por separação de membranas; Fertilizantes granulares.

Introdução

A produção agrícola moderna emprega diversos tipos de fertilizantes sintéticos na cultura vegetal, de modo a aprimorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. O uso controlado de tais insumos pode impactar de forma positiva o cultivo, tendo em vista que estes realizam a manutenção dos nutrientes disponíveis às plantas, auxiliando no equilíbrio nutricional a longo prazo, bem como na maior absorção de água (BNDES, 2026; RIC-CPS, 2026).

Apesar dos efeitos benéficos dos fertilizantes, o seu uso indiscriminado representa um risco à saúde ambiental, dado que eles podem alterar a estrutura química do solo (SOUZA, 2018). Nesse sentido, considerando a importância e valia do processo de fertilização para a agricultura moderna, a busca por insumos com um bom aporte de nutrientes e menor impacto ambiental se faz necessária. Assim, os biofertilizantes surgem como uma via alternativa aos insumos sintéticos tradicionais (RESENDE, 2026). Um destes biofertilizantes provém de um recurso residual da indústria sucroalcooleira, o vinhoto. A indústria açucareira gera, dentre outros resíduos, este coproduto líquido orgânico derivado do processo de destilação. Inicialmente, a vinhaça tem potencial de contaminação devido às suas características químicas e, por isso, deve receber tratamento adequado para ser beneficiada como biofertilizante ou ser descartado de forma adequada (EMBRAPA, 2026; SIQUEIRA et al., 2018).

Dentre os produtores de cana-de-açúcar em escala mundial, o Brasil se destaca com alto percentual produtivo global (CONAB, 2025). À luz desse cenário, o alto volume de vinhaça produzido surge como um fator crítico que necessita de correta gestão residual e manejo adequado em casos de reutilização. O vinhoto tem como características coloração marrom-escuro, pH baixo, alta concentração de nutrientes como potássio e apresenta alta carga de matéria orgânica, o que caracteriza o efluente como altamente poluidor. Esse recurso é descrito em estudos recentes como um passivo ambiental que pode ser transformado em coproduto e retornar à cadeia produtiva e, ainda, pode ter seu potencial agronômico ampliado quando é processado e beneficiado como um biofertilizante (FUESS et al. 2020).

Desta maneira, algumas tecnologias limpas que buscam aprimorar a produção de tais insumos sustentáveis no setor agroindustrial surgem como foco de pesquisa. Dentre elas, a osmose inversa (OI) e ultrafiltração (UF) se destacam no contexto de processos por separação de membranas, sendo técnicas que contribuem para a resolução da problemática de disposição residual do vinhoto. Estes processos viabilizam a produção de um concentrado de grande valia à agricultura e que favorece o equilíbrio nutricional do solo (SIQUEIRA et al, 2018). Ademais, agregar a vinhaça em matriz sólida também surge como uma tecnologia promissora e que caracteriza tais biofertilizantes como agentes de liberação controlada. Nesse sentido, o beneficiamento desse resíduo na forma granular representa a criação de um produto de alto valor agregado, ao mesmo tempo em que auxilia na diminuição da poluição ambiental (NAZ e SULAIMAN, 2016) e também tem vantagens associadas à logística de transporte. Sob essa ótica, o transporte da vinhaça diluída esbarra em gargalos de transporte, havendo a necessidade de investigar meios de priorizar as formas concentradas e, majoritariamente, granulares.

Simultaneamente, outro problema é exposto pelos modelos climáticos atuais, os quais apontam que as consequências das mudanças climáticas se estendem à produtividade das culturas agrícolas (IPCC, 2021), haja vista os impactos à saúde do solo e desenvolvimento vegetativo. Tais fenômenos climáticos configuram uma interface entre diversos estresses abióticos, os quais acometem, dentre outras atividades agrárias, o cultivo de alface crespa com o estresse hídrico e temperaturas extremas. Nesse sentido, os desafios supramencionados vão ao encontro do panorama adverso atrelado às mudanças climáticas, dado que existe uma notável influência desse fator na produção agrícola. E, outra vez, os biofertilizantes se destacam como alternativa ambientalmente vantajosa, à medida que melhoram a qualidade do solo e, possivelmente, auxiliam na mitigação dos estresses abióticos.

Diante o exposto, o presente trabalho busca analisar a utilização do vinhoto como biofertilizante orgânico obtido por meio de processos de separação de membrana do concentrado da vinhaça, de modo a avaliar a atuação da forma concentrada e granular em ensaios de vaso. Especificamente, há um empenho em investigar a sua eficiência agronômica no desenvolvimento inicial e crescimento da alface crespa (*Lactuca sativa* var. *crispa.*), em razão de seu fácil cultivo, sensibilidade às variações ambientais e rápido ciclo vegetativo. Para além disso, há uma análise do comportamento físico-químico desses fertilizantes ante o estresse térmico e outros fatores decorrentes das mudanças climáticas.

Material e Métodos

O experimento foi realizado em laboratório do Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária (DESA) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), *campus* Pampulha, no período de agosto de 2025 até fevereiro de 2026. O experimento foi conduzido em ensaios de vaso, os quais foram realizados em condições controladas de temperatura e umidade,

reguladas por câmara climática. Os vasos utilizados têm as seguintes dimensões: 19,7 cm de altura, 12,7 cm de altura do solo e diâmetro externo de 24,5 cm e foram preenchidos com dois terços de terra peneirada (4mm), um terço de areia e uma camada de esferas de argila ao fundo. Antes da semeadura, os vasos foram umedecidos com 60% da capacidade de campo do solo, previamente avaliada, e fora considerada também a capacidade real de água no solo (CRA) para obter lâmina de irrigação que seria posteriormente utilizada. Após o tempo mencionado, os fertilizantes foram incorporados e a semeadura foi realizada em 10 berços rasos com aproximadamente 0,5 cm de profundidade e uma semente em cada. Após isso, os vasos foram mantidos em câmara climática a 25ºC e 60% de umidade relativa e irrigados diariamente com base no valor da CRA a cada 5 dias de aplicação.

As amostras do vinhoto passaram pelo processo de osmose inversa (pressão de 10 bar) e ultrafiltração (vácuo a 0,7 bar), processos de membrana que conceberam os concentrados com nutrientes preservados. Após serem processados, foram misturados à torta de filtração em uma proporção 1:1 sólido líquido e, depois disso, os grânulos formados foram secos ao ar por 72h até atingir massa constante para posterior caracterização (CARPANEZ, L. T. et al.). As concentrações do vinhoto e dos fertilizantes foram analisadas e estão descritas na Tabela 1.

	Concentrado UF (mg/L)	Concentrado OI (mg/L)	Fertilizante UF (mg/g)	Fertilizante OI (mg/g)
Concentração K	2336	5089	5,4	21,4
Concentração N	97	158	0,1	0,19
Concentração P	64	95	5	6

Tabela 1 - Concentração NPK do vinhoto.
Fonte: autores (2026)

O alinhamento experimental utilizado foi o delineamento inteiramente casualizado (DIC) que abrangeu vasos com seis tipos de tratamento e suas respectivas duplicatas, totalizando doze vasos a cada ensaio, submetidos a condições homogêneas de temperatura e umidade. A organização dos vasos está descrita na Tabela 2.

	A	B	C	D	E	F
Replicata 1	Controle	Concentrado UF vinhoto	Concentrado OI vinhoto	Fertilizante UF vinhoto	Fertilizante OI vinhoto	Fertilizante comercial
Replicata 2	Controle	Concentrado UF vinhoto	Concentrado OI vinhoto	Fertilizante UF vinhoto	Fertilizante OI vinhoto	Fertilizante comercial

Tabela 2 - Alinhamento experimental.
Fonte: autores (2026)

Após o plantio, foi realizado monitoramento diário de diversos parâmetros físico-químicos do solo e da alface. Os indicadores do solo avaliados diariamente foram pH, condutividade elétrica, umidade relativa e temperatura. Já com relação ao ciclo germinativo e de desenvolvimento da espécie vegetal, foi avaliado o número de sementes germinadas nos dias 3, 5 e 7 após o plantio e ao final de 14 dias, registrando também o índice de velocidade de germinação (IVG). Depois desse período, três plântulas aleatórias são retiradas por vaso para avaliar comprimento da raiz, parte aérea e massa fresca. E duas das plântulas mais vigorosas que ainda estavam no vaso foram escolhidas, enquanto o restante foi retirado. As plantas permaneceram nos vasos pelo período de 45 dias e, posteriormente, foram retiradas para avaliar a altura final, número total de folhas, massa fresca e disponibilidade de nitrogênio, fósforo, potássio e sódio foliar, das raízes e do solo.

Nesse sentido, a eficiência agronômica dos fertilizantes foi avaliada por meio de indicadores de desempenho vegetal, com vistas à comparação entre as formas de aplicação líquida e granular. Foram consideradas como variáveis-resposta: taxa de germinação (%), índice de velocidade de germinação (IVG), teor de clorofila, comprimento de raiz e parte aérea, massa fresca das plântulas, altura final e número de folhas. A comparação entre os tratamentos foi realizada a partir da análise dos valores médios obtidos para cada variável e os resultados foram organizados por tratamento e avaliados em relação ao controle (sem fertilização), permitindo a análise da resposta relativa das plantas a cada tipo de fertilizante. Adicionalmente, o monitoramento diário dos parâmetros físico-químicos do solo (pH, condutividade elétrica, umidade e temperatura) foi utilizado como suporte para interpretação da dinâmica de disponibilização de nutrientes em função da forma de aplicação.

Discussão e Resultados preliminares

O monitoramento do teor de umidade relativa do solo permitiu identificar diferentes comportamentos em cada tipo de tratamento. Dentre os vasos que receberam tratamento com biofertilizantes, as maiores médias de umidade foram observadas nos vasos que receberam a vinhaça da osmose inversa (OI) na forma granular com umidade volumétrica de 9,1% e nos vasos que receberam vinhaça granular da ultrafiltração (UF) com valor de 9,3%, o que sugere uma maior capacidade de retenção hídrica desses tipos de insumo. Paralelamente, o fertilizante comercial apresentou boa manutenção da quantidade de água no solo, com média de umidade volumétrica igual a 9,5%, sendo tão alta quanto a do tratamento mencionado anteriormente. Contudo, discussões posteriores no presente trabalho apontam que, apesar do bom desempenho no percentual de umidade, o

desenvolvimento vegetativo não foi favorecido por este tratamento, indicando que essa maior porcentagem é explicada pelo fato de que há poucas plântulas absorvendo água. Então, esse maior grau de umidade não necessariamente reflete a eficiência do fertilizador comercial em reter água por um maior período de tempo.

Com base nessa perspectiva, é perceptível que dentre os tratamentos supracitados, o uso de biofertilizantes granulares da vinhaça processados pelos processos de OI e UF representa uma forte alternativa ao fertilizante comercial ante o contexto de necessidade de resiliência climática. Nesse sentido, os outros fertilizantes derivados de processos de membrana do vinhoto também se destacam como alternativa, uma vez que à longo prazo, mesmo que apresentem valores intermediários de umidade e abaixo do fertilizador convencional, saem à frente no aprimoramento do desenvolvimento vegetativo. Então, com resultados promissores e comparáveis à capacidade de manutenção dos fertilizantes convencionais, é válido avançar com o uso dos biofertilizantes e validar seu uso em outras culturas.

De modo geral, observou-se diferença no desempenho agronômico entre os fertilizantes testados, com variações associadas à forma de aplicação e ao processo de obtenção do vinhoto. Para os fertilizantes provenientes do vinhoto, foram observadas diferenças mais expressivas entre os tratamentos. O fertilizante líquido apresentou maior variabilidade nos estágios iniciais, enquanto a forma granular (sólida) demonstrou desempenho mais consistente ao longo do desenvolvimento, especialmente em variáveis relacionadas ao crescimento, como altura e número de folhas. Esse comportamento sugere uma liberação mais gradual de nutrientes no caso do fertilizante sólido.

Ao se comparar os processos de obtenção, os fertilizantes derivados da osmose inversa apresentaram, de modo multifatorial, desempenho superior em relação aos obtidos por ultrafiltração, sobretudo quando aplicados na forma granular, indicando maior potencial agronômico associado à concentração e disponibilidade de nutrientes. Ainda assim, os fertilizantes provenientes da ultrafiltração também demonstraram resultados satisfatórios (se destacando, por exemplo, na manutenção da umidade), com desempenho superior ao controle e comportamento intermediário entre os demais tratamentos. Em relação ao fertilizante comercial, verificou-se que, embora este apresente desempenho estável, os fertilizantes derivados do vinhoto, em especial aqueles obtidos por osmose inversa e aplicados na forma sólida, foram capazes de alcançar resultados equivalentes ou superiores em diferentes parâmetros analisados. Esse resultado indica potencial competitivo dos biofertilizantes desenvolvidos, especialmente considerando sua origem residual e proposta sustentável.

Considerações finais

A comparação entre as formas de aplicação indica que fertilizantes líquidos tendem a favorecer respostas mais imediatas, enquanto os granulares contribuem com a liberação gradual, conforme necessidade da planta, o que diminui a chance de haver, por exemplo, super dosagens e formação de subprodutos indesejáveis (como o dióxido de nitrogênio). Assim, a eficiência agronômica pode ser associada à dinâmica de disponibilização de nutrientes de cada formulação. Nesse sentido, as posteriores análises de nutrientes no solo e no tecido vegetal permitirão uma avaliação mais fundamentada da eficiência agronômica dos fertilizantes, ao possibilitar a correlação entre a disponibilidade de nutrientes no meio edáfico e sua efetiva absorção pelas plantas.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. Washington: APHA, 2017.

BNDES. **Perspectivas para o setor de fertilizantes no Brasil**. Rio de Janeiro: BNDES, 2026.

CARPANEZ, L. T. et al. Recovery of nutrients from sugarcane vinasse by integrated ultrafiltration and reverse osmosis. **Journal of Water Process Engineering**, v. 47, p. 102715, 2022.

DA SILVA, T. L. R. et al. Nutrient recovery from sugarcane vinasse using membrane processes. **Separation and Purification Technology**, v. 240, p. 116641, 2020.

EMBRAPA. **Cultura da alface**. Brasília, DF: Embrapa, 2024.

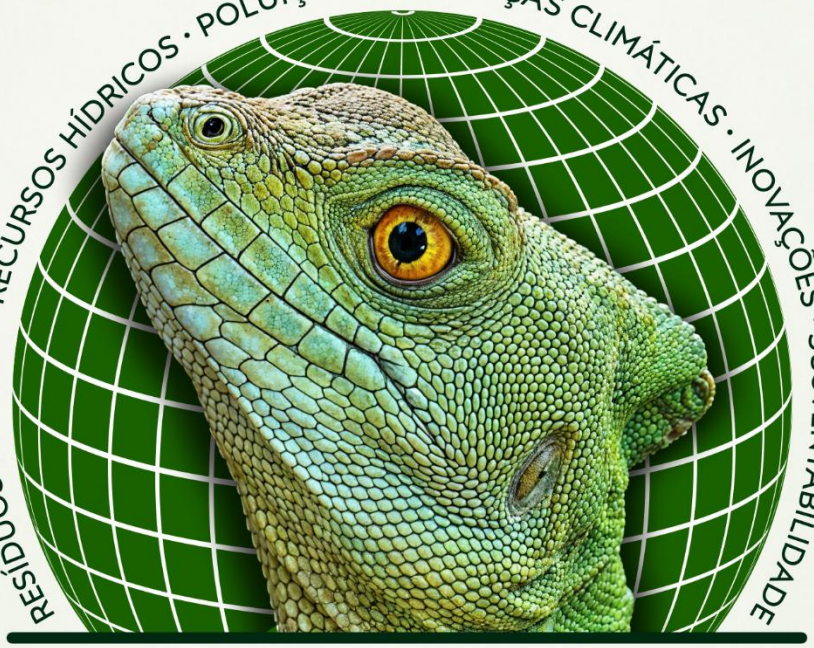
IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

MAGALHÃES, N. C. et al. Evaluation of membrane filtration for the recovery of nutrients from sugarcane vinasse. **Water Science and Technology**, v. 82, n. 11, p. 2515-2527, 2020.

WANG, H. et al. Impacts of sodium accumulation on soil structure and agricultural sustainability. **Soil and Tillage Research**, v. 238, p. 105982, 2024.

ÁREA TEMÁTICA 37

TECNOLOGIAS VERDES E INOVAÇÃO SUSTENTÁVEL



5° CONGRESSO INTERNACIONAL DE

ENGENHARIA AMBIENTAL

BIOPROSPECÇÃO DE LEVEDURAS AUTÓCTONES ISOLADAS DE MEL DE PRODUTOR LOCAL EM ACAIACA-MG: POTENCIAL PARA PRODUÇÃO DE HIDROMEL ARTESANAL NA BIOECONOMIA REGIONAL

1 Diego Henriques Aguiar de Melo, 2 Tarso Souza Dayrell Filho, 3 Rogelio Lopes Brandão, 4 Izinara Rosse 5 Ana Maria dos Santos, 6 Aureliano Claret da Cunha, 7 Sandra Aparecida Lima de Moura

1 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: diego.henriques@aluno.ufop.edu.br; 2 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: paulo.dayrell@aluno.ufop.edu.br; 3 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: rlbrand@ufop.edu.br; 4 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: izinara.cruz@ufop.edu.br; 5 Universidade Federal de Ouro Preto, email anamaria.ds.bio@gmail.com; 6 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: aureliano.cunha@ufop.edu.br; 7 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: sandramoura@ufop.edu.br

Palavras-chave: Leveduras nativas; Hidromel artesanal; Agricultura familiar.

Introdução

A apicultura é um pilar do desenvolvimento rural sustentável e da manutenção de serviços ecossistêmicos, sendo vital para a preservação da biodiversidade e o fortalecimento da economia regional (Rocha et al., 2020). No Brasil, a atividade é predominantemente familiar; pequenos produtores respondem por 60,2% da produção nacional, representando o mel até 40% da renda anual dessas unidades (IBGE, 2023; Trevisol et al., 2022). Contudo, desafios estruturais e entraves logísticos na comercialização do mel in natura limitam a competitividade dos produtores (Santana, 2023). Essa vulnerabilidade exige estratégias de agregação de valor, como a biotecnologia fermentativa para a produção de hidromel artesanal, setor em expansão que demanda baixo investimento e promove a resiliência financeira (R. K. Silva et al., 2022).

A inovação deste estudo baseia-se na bioprospecção de leveduras autóctones, explorando a elevada pressão seletiva do nicho ecológico do mel, caracterizado por alta osmolaridade e acidez, para identificar estirpes com robustez metabólica e resistência a estresses fermentativos (Rodríguez Machado et al., 2024; R. N. A. da Silva et al., 2024). Ao integrar microrganismos locais adaptados à matéria-prima, consolida-se o conceito de terroir e converte-se a biodiversidade do apiário em vantagem tecnológica. Tal abordagem promove a inovação, permitindo bioprocessos com eficiência e menor dependência de insumos externos. Assim, o trabalho objetivou selecionar uma levedura autóctone capaz de mostrar desempenho fermentativo para a produção de hidromel regional de forma artesanal, sustentável e de baixo impacto ambiental em Acaiaca (MG).

Material e Métodos

O isolamento microbiológico foi realizado a partir de méis de Acaiaca (MG) em meio YP (2% glicose e 100 µl/ml cloranfenicol) a 30 ºC, com posterior preservação a -80 ºC em YP acrescido de 30% de glicerol. A triagem (*screening*) das colônias ocorreu em microplacas de 96 poços avaliando o crescimento em cada poço (0 a 4 pontos), submetendo os isolados a gradientes de açúcares (15-35% m/m), etanol (8-18% v/v), pH (3,0-6,0) e temperatura (25-37 ºC), além de ensaios de estresse múltiplo e resistência a drogas metabólicas (cerulenina, PFP e TFL), seguindo protocolos adaptados (Vicente et al., 2006). A produção de H_2S foi avaliada em meio BSA (escala 0-3), utilizando *Candida albicans* como controle positivo. Para a seleção das linhagens mais promissoras, aplicou-se um sistema de ranking baseado na soma das pontuações fisiológicas subtraída do índice de H_2S, tendo a cepa comercial Lalvin® ICV D47 como referência.

Os ensaios fermentativos (inóculo de 0,3 g/L seco) foram conduzidos em frascos de 250 ml (25 ºC, pH 4,3) sob dois cenários operacionais: Cenário I (30 ºBrix; 150 mg/L de YAN) e Cenário II (24 ºBrix; 300 mg/L de YAN) visando cepas capazes de atuar em cenários com pouco controle como os de uma fermentação artesanal. A cinética foi monitorada via gravimetria e o etanol produzido foi quantificado por HPLC com coluna de troca iônica e detector de índice de refração. A eficiência fermentativa foi calculada considerando a produção ideal de etanol e os dados submetidos à análise de variância (ANOVA) com teste de Tukey ($p < 0,05$) no software GraphPad Prism.

Resultados e Discussão

A bioprospecção a partir do mel de Acaiaca-MG resultou no isolamento de 43 colônias de leveduras nativas, distribuídas entre as amostras 1 (18 isolados), 2 (12 isolados) e 3 (13 isolados). A microbiota nativa demonstrou adaptação superior à linhagem comercial D47 frente ao estresse osmótico, com 72% das cepas atingindo vigor máximo em concentrações de 25% de açúcares, robustez atribuída à pressão seletiva do nicho original e ao acúmulo de solutos compatíveis. Sob a ótica da eficiência energética, a termotolerância observada (100% de vigor a 30 °C e 49% a 37 °C) permite a condução do bioprocesso em climas tropicais sem a necessidade de refrigeração artificial, reduzindo drasticamente de carbono da planta produtiva. Paralelamente, a resiliência a pH 4,0 (77% dos isolados) e a baixa síntese de H_2S (9% com notas 0-1) caracterizam uma produção com características sensoriais mais agradáveis e sem a necessidade de correção química (Vicente et al., 2006).

Embora a exposição direta ao etanol (8% v/v) tenha inibido 58% dos isolados, a resistência em fermentações reais é favorecida pela síntese progressiva do álcool, que ativa respostas adaptativas de membrana (M. S. Silva et al., 2020). A validação dessa robustez ocorreu no teste de estresse múltiplo, identificando um grupo de elite (7%) capaz de suportar a sinergia de condições críticas. A plasticidade bioquímica foi confirmada pela elevada tolerância a inibidores metabólicos como TFL (93% com score 3 ou 4), PFP (49% com score 3 ou 4) e cerulenina (26% com score máximo), superando a performance da cepa D47 para estes parâmetros. Enquanto a resistência ao TFL e à PFP sinaliza o potencial para a síntese de acetato de isoamila (notas tropicais) e 2-feniletanol (notas florais), a tolerância à cerulenina atua como um marcador de integridade da membrana citoplasmática e produção de ésteres de ácidos graxos, como o caproato de etila (Araújo, 2018).

A seleção final dos isolados fundamentou-se no equilíbrio entre o desempenho fisiológico global e a baixa síntese de H_2S (Tabela 01). No caso da Amostra 1, optou-se pelas cepas 1-15 e 1-16; a inclusão de dois isolados justificou-se pelo fato de a linhagem com maior pontuação bruta nesta amostra ter apresentado uma produção moderada de compostos sulfurados (score 2), o que demandou a avaliação de alternativas com perfil sensorial mais limpo. Para as Amostras 2 e 3, foram selecionadas as linhagens 2-11 e 3-2, com destaque para a última, que atingiu 57 pontos, igualando-se à pontuação da levedura comercial de referência D47.

Colônia	GF-15%	GF-20%	GF-25%	GF-30%	Cerulinina	PFP	TFL	Etanol 5%	Etanol 8%	Etanol	Etanol	Etanol	25 °C	30 °C	37 °C	pH 4,0	pH 4,5	pH 5,0	Estresse múltiplo	H_2S	Total
1-15	4	4	4	3	0	0	3	1	0	0	0	0	3	4	4	4	4	4	1	-1	42
1-16	4	4	4	3	0	4	4	1	1	0	0	0	4	4	4	4	3	4	0	-2	46
2-11	3	4	4	3	0	3	3	4	2	0	0	0	4	4	2	3	3	4	1	0	47
3-2	4	4	4	4	0	3	4	4	3	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	-1	57
D47	3	3	3	3	3	3	4	4	3	4	0	0	4	4	4	3	3	3	4	-1	57

Tabela 01: Desempenho comparativo das leveduras nativas isoladas e selecionadas frente à cepa comercial de referência (D47) para a produção de hidromel.

Conforme observado na Figura 01, o perfil fermentativo foi alterado pela composição do meio. No gráfico (a) (Cenário I), caracterizado por elevada pressão osmótica e limitação de nutrientes, as cepas apresentaram taxas de perda de massa reduzidas, não atingindo a fase estacionária no período de 31 dias. Neste ambiente de estresse, a linhagem comercial D47 demonstrou a maior perda de massa acumulada, seguida pela cepa nativa 3-2, indicando que ambas possuem um limiar de tolerância basal superior para iniciar o catabolismo em meios restritivos. Em contraste, o gráfico b (Cenário II), com meio nutricionalmente equilibrado e menor pressão osmótica, revelou uma fase *lag* e estacionária mais evidente, porém com uma cinética de consumo mais eficiente, permitindo que as linhagens de maior desempenho se aproximassem da fase estacionária ao final do experimento, com destaque para as cepas D47 e 3-2.

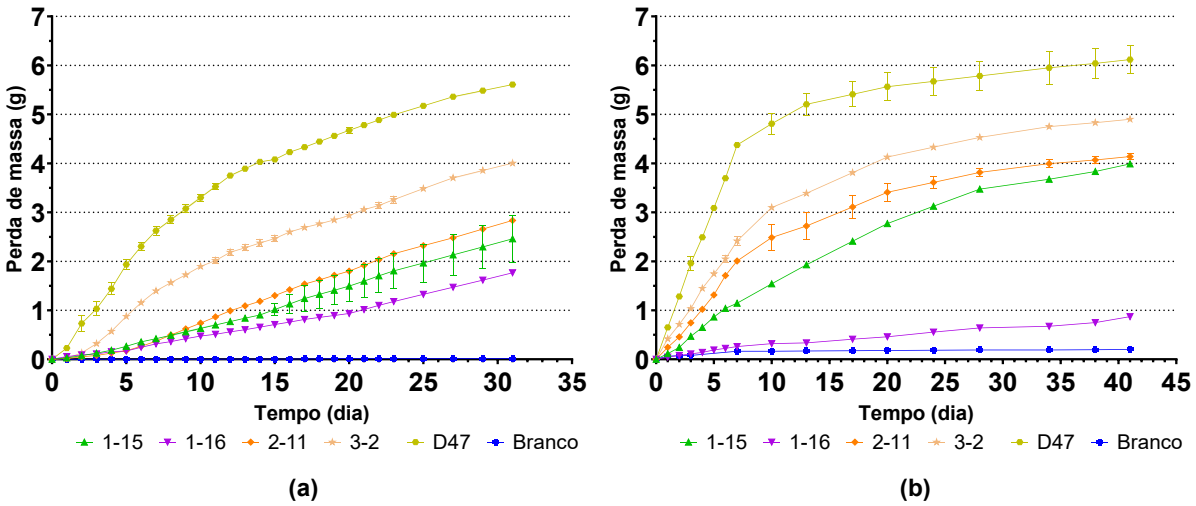


Figura 01: Curvas cinéticas de perda de massa por tempo de fermentação em mosto de hidromel: (A) Cenário I – Elevada pressão osmótica e limitação nutricional; (B) Cenário II – Equilíbrio osmótico e maior aporte nutricional.

Essa discrepância entre os cenários justifica-se pelo balanço entre a disponibilidade de nitrogênio e a pressão osmótica. No Cenário I, a elevada concentração de açúcares parece saturar os transportadores de membrana, enquanto a escassez de nutrientes impede a síntese de nova biomassa (Bisson et al., 2016). Como resultado, a energia gerada via glicólise é desviada primordialmente para o metabolismo de manutenção, especificamente para o bombeamento de prótons e manutenção da

homeostase interna contra o gradiente osmótico, em vez de ser canalizada para a replicação celular (Bisson et al., 2016). Já no Cenário II, o aporte nutricional favorece o crescimento ordenado e a formação de biomassa resultando em uma fermentação mais consistente e energeticamente sustentável ao final do processo (Fossati et al., 2025).

Os parâmetros consolidados na Tabela 02 corroboram esse fenômeno, evidenciando que a taxa máxima de perda de peso (μ_{max}) foi, paradoxalmente, superior no Cenário I em comparação ao Cenário II. Esse aumento na taxa específica, apesar do menor rendimento final, reflete o desacoplamento metabólico onde a célula opera em velocidades maiores de consumo de substrato para sobreviver ao estresse osmótico imediato, o que se reflete diretamente na redução do tempo de duplicação observado no Cenário I. O ambiente estressante do cenário I pode ter impedido também a renovação celular, levando a uma exaustão precoce e interrupção da fermentação (*stuck fermentation*) (Fossati et al., 2025). Sendo assim, uma alta velocidade inicial sob estresse não assegurou a eficiência; pelo contrário, a menor taxa máxima de perda de peso e a consistência da fermentação observadas no Cenário II indicaram um processo mais controlado, minimizando desperdícios de substrato e deslocando o balanço de massa para uma maior produção de etanol.

Cenário	Cepas	Perda máxima de peso (g)	Taxa máxima de perda de peso (1/dia)	R^2	Tempo de duplicação (Dias)
I	1-15	2,46	0,3864	0,9832	1,8
	1-16	1,76	0,2619	0,9734	2,6
	2-11	2,83	0,3982	0,9955	1,7
	3-2	4,00	0,2963	0,9677	2,3
	D47	5,61	0,2957	0,9451	2,3
II	1-15	3,99	0,225	0,9559	3,1
	1-16	0,87	0,2456	0,9348	2,8
	2-11	4,14	0,2498	0,9870	2,8
	3-2	4,9	0,1696	0,9882	4,1
	D47	6,12	0,2003	0,9867	3,5

Tabela 02: Parâmetros cinéticos da fermentação de mosto contendo mel por linhagens nativas e controle comercial (D47) sob diferentes condições operacionais.

Os resultados de teor alcoólico e eficiência fermentativa, apresentados na Figura 02, confirmam que o equilíbrio nutricional do Cenário II (letras maiúsculas) é essencial para a viabilidade do bioprocesso. Observou-se que, no Cenário I (letras minúsculas), a severa limitação de nutrientes e a pressão osmótica resultaram em eficiências reduzidas para todos os isolados nativos, uma vez que a energia gerada foi prioritariamente canalizada para o metabolismo de manutenção celular em detrimento da produção de etanol. Com a otimização nutricional no Cenário II, houve um incremento significativo no rendimento para todas as cepas, evidenciando a plasticidade metabólica da microbiota de Acaiaca.

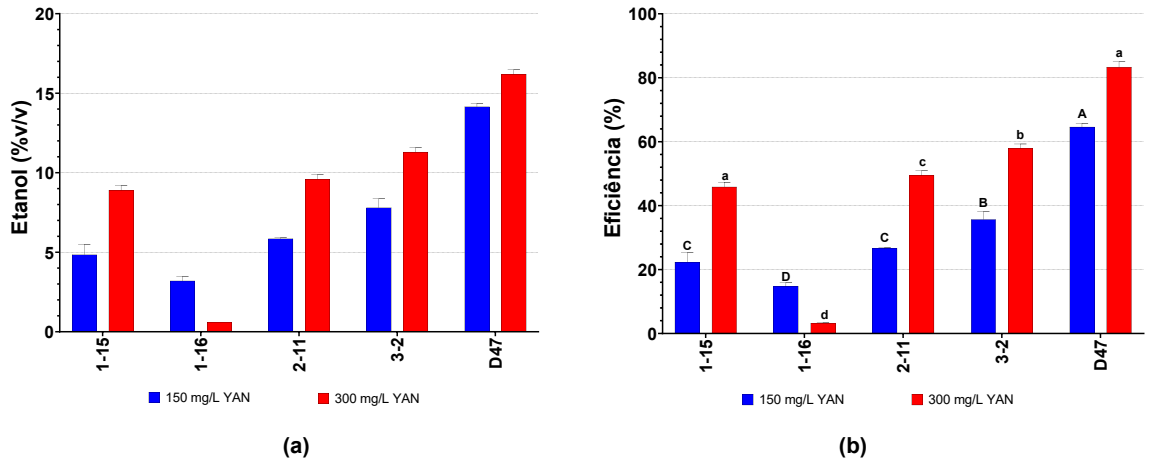


Figura 02. Concentração de etanol (% v/v) (a) e eficiência fermentativa (%) (b) das leveduras nativas e comercial nos Cenários I e II. As letras sobre as barras e (b) representam agrupamentos estatisticamente distintos ($p < 0,05$), conforme teste de Tukey pós ANOVA unidirecional. Cepas que compartilham letras não diferem estatisticamente entre si. As letras minúsculas compreendem o cenário I e as letras maiúsculas o cenário II.

A análise estatística pelo teste de Tukey revelou que a Cepa 3-2 consolidou-se como o isolado de maior performance entre as linhagens nativas. Contudo, é fundamental destacar que, embora seja a líder do grupo autóctone, a Cepa 3-2 apresentou-se estatisticamente inferior à linhagem comercial D47, não alcançando a mesma eficiência de conversão da referência industrial. Este fato porém não exclui a cepa 3-2 como potencial produtora de hidromel de maior teor alcoólico, e da mesma forma ainda

inclui a cepa 2-11 no grupo de potenciais produtoras de hidromel suave. A legislação brasileira vigente, regida pela Instrução Normativa nº 34/2012 do MAPA, estabelece os padrões de identidade e qualidade para o hidromel. Considerando-se somente o teor de etanol, as cepas 2-11 e 3-2 seriam capazes de atender a legislação (4% a 14% v/v). Além do mais, a legislação não impõe restrições às temperaturas de processamento, o que viabiliza conduzir a fermentação em condições tropicais. A capacidade destas leveduras em agregar valor ao mel, produzindo hidromel de caráter regional, sem a exigência de sistemas de refrigeração sofisticados ou equipamentos de alto custo, representa uma oportunidade estratégica para a agricultura familiar.

Considerações Finais

A investigação permitiu concluir que a Cepa 3-2 é a linhagem autóctone de maior potencial biotecnológico para a produção de hidromel no apiário de Acaiaca (MG), destacando-se pela robustez térmica que dispensa sistemas de refrigeração e reduz a pegada de carbono do bioprocesso. Embora apresente desempenho estatisticamente inferior à referência comercial D47, sua aplicação promove a inovação ao valorizar a biodiversidade da região e permitir que o apicultor familiar tenha mais uma opção de ativo de alto valor agregado. Assim, a seleção desta microbiota regional consolida um modelo de produção rentável e de potencial agregador à cadeia apícola, ajudando a garantir a resiliência financeira para a comunidade local.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, CNPq, FAPEMIG, Samarco Mineração e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da UFOP pelo fomento financeiro. Agradecem também ao Grupo de Pesquisa APICRIM e ao Laboratório de Biotecnologia Celular e Molecular (UFOP) pela infraestrutura e suporte técnico-científico prestados ao longo deste estudo.

Referências Bibliográficas

Araújo, T. M. (2018). *Análises Genômicas para Otimização da Produção de Compostos Aromatizantes por Estirpe de Saccharomyces cerevisiae Isolada de Produção de Cachaça* [Tese]. Universidade federal de Ouro Preto.

Bisson, L. F., Fan, Q., & Walker, G. A. (2016). *Sugar and Glycerol Transport in Saccharomyces cerevisiae* (p. 125–168). https://doi.org/10.1007/978-3-319-25304-6_6

Fossati, E., Onguta, E., & Reid, S. (2025). *YEAST NUTRITION FOR HEALTHY FERMENTATIONS*.

IBGE. (2023). *Produção de Mel de abelha no Brasil*. kik. https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/mel-de-abelha/br

Rocha, B. D., Lobato, Z. I. P., Junior, A. de P. M., & Martins, N. R. da S. (2020). *Apicultura*. www.crmvmg.org.br

Rodríguez Machado, A., Caro, C. M., Hurtado-Murillo, J. J., Gomes Lobo, C. J., Zúñiga, R. N., & Franco, W. (2024). Unconventional Yeasts Isolated from Chilean Honey: A Probiotic and Phenotypic Characterization. *Foods*, *13*(10), 1582. https://doi.org/10.3390/foods13101582

Santana, M. portugal. (2023). *APICULTURA: BOAS PRÁTICAS DE AGROPECUÁRIA*.

Silva, R. N. A. da, Oliveira Alves, R. M. de, Souza, A. C., Schwan, R. F., & Umsza-Guez, M. A. (2024). Yeast Diversity in Honey and Pollen Samples from Stingless Bees in the State of Bahia, Brazil: Use of the MALDI-TOF MS/Genbank Proteomic Technique. *Microorganisms*, *12*(4), 678. https://doi.org/10.3390/microorganisms12040678

Silva, M. S., Arruda, L. M., Xavier, P. L., Ramírez, M. X. D., da Silveira, F. A., Santana, W. C., Silva, P. H. A. da, Fietto, L. G., & Eller, M. R. (2020). Selection of yeasts from bee products for alcoholic beverage production. *Brazilian Journal of Microbiology*, *51*(1), 323–334. https://doi.org/10.1007/s42770-019-00184-1

Silva, R. K., Pinto Neto, W. de P., Morais Júnior, M. A. de, & Souza, R. B. de. (2022). Desafios da produção de hidromel no Brasil: processamento e legislação brasileira. Em *Bebidas Fermentadas e Destiladas: pesquisas e aplicabilidades*. Instituto Multiprofissional de Ensino. https://doi.org/10.51161/editoraime/248/66

Trevisol, G., Pinheiro Bueno, M., Leonardo de Oliveira, J. P., & Macedo, K. G. (2022). Panorama econômico da produção e exportação de mel de abelha produzidos no Brasil. *Revista de Gestão e Secretariado*, *13*(3), 352–368. https://doi.org/10.7769/gesec.v13i3.1321

Vicente, M. D. A., Fietto, L. G., Castro, I. D. M., Gonçalves Dos Santos, A. N., Coutrim, M. X., & Brandão, R. L. (2006). Isolation of Saccharomyces cerevisiae strains producing higher levels of flavoring compounds for production of "cachaça" the Brazilian sugarcane spirit. *International Journal of Food Microbiology*, *108*(1), 51–59. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2005.10.018.

APROVEITAMENTO DE SUBPRODUTOS DE TUBÉRCULOS PARA PRODUÇÃO DE CHIPS VEGETAIS COMO ALTERNATIVA AO DESPERDÍCIO ALIMENTAR

1 Aline Mauriam da Silva Vieira, 2 Diego Henriques Aguiar de Melo, 3 Sandra Aparecida Lima de Moura, 4 Maria Helena Nasser Brumano

1 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: aline.mauriam@aluno.ufop.edu.br; 2 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: diego.henriques@aluno.ufop.edu.br; 3 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: sandramoura@ufop.edu.br; 4 Universidade Federal de Ouro Preto, e-mail: maria.brumano@ufop.edu.br

Palavras-chave: Desperdício de alimentos; Desidratação; Tubérculos; Sustentabilidade; Geração de renda; Inclusão produtiva.

Introdução

O desperdício de alimentos é um desafio global que impacta diretamente a sustentabilidade ambiental, a segurança alimentar e a economia (FAO, 2019). Estima-se que uma parcela significativa dos alimentos produzidos mundialmente seja perdida ao longo da cadeia produtiva, especialmente nas etapas de pós-colheita e distribuição (PARFITT; BARTHEL; MACNAUGHTON, 2010). Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), cerca de 14% dos alimentos são perdidos entre a colheita e o comércio varejista (FAO, 2022). No Brasil, o desperdício de alimentos ocorre principalmente nas etapas de produção e pós-colheita, sendo ainda mais expressivo entre pequenos produtores rurais (SCHNEIDER, 2016). No distrito de Santa Rita, localizado em Ouro Preto (MG), a agricultura familiar enfrenta desafios críticos de infraestrutura logística e acesso ao mercado, resultando no descarte de muitos alimentos por imperfeições estéticas, mesmo que estes mantenham seu valor nutricional e qualidade sanitária (SILVA; SOUZA, 2017).

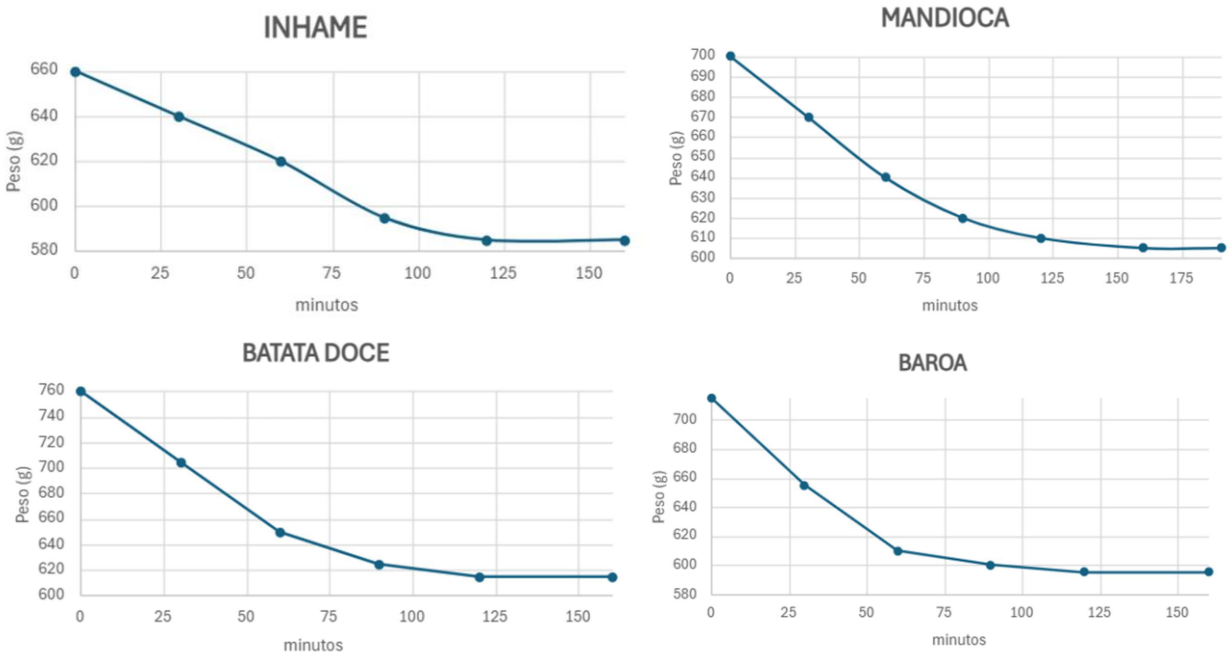
Nesse contexto, a desidratação surge como uma alternativa para reduzir perdas, prolongar a vida útil dos produtos e agregar valor à produção agrícola local, uma vez que a remoção de água inibe a proliferação de microrganismos e reações químicas indesejáveis, sem a necessidade de refrigeração (CELESTINO, 2010). Diferentemente dos chips tradicionais fritos, que possuem alto teor de lipídios, os chips vegetais obtidos por desidratação atendem à crescente demanda por alimentos mais saudáveis e nutritivos (RICHETA, 2021). Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar a viabilidade técnica da produção de chips desidratados a partir de tubérculos excedentes ou rejeitados da produção agrícola local, buscando promover a geração de renda e a inclusão produtiva da comunidade rural de Santa Rita.

Material e Métodos

O estudo foi realizado no distrito de Santa Rita, município de Ouro Preto (MG). Os tubérculos utilizados (mandioca, inhame, batata-doce e batata-baroa) foram adquiridos junto a agricultores familiares da região, selecionando-se exemplares que seriam descartados por não atenderem aos padrões estéticos do mercado convencional. O processamento foi realizado na Planta Piloto do Departamento de Alimentos da Escola de Nutrição da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Inicialmente, os tubérculos foram submetidos à limpeza e sanitização em solução de hipoclorito de sódio a 200 ppm por 15 minutos. Em seguida, procedeu-se ao descascamento manual e ao corte em fatias uniformes (aproximadamente 2 mm de espessura) com o auxílio de um fatiador industrial. A desidratação foi conduzida em um desidratador convectivo com circulação de ar forçada, mantido a uma temperatura constante de 60°C de acordo com a metodologia de (CELESTINO, 2010). O acompanhamento da perda de umidade foi realizado por meio da pesagem das amostras em balança semianalítica em intervalos de 30 minutos, até que as mesmas atingissem peso constante. Após o processamento, foram realizadas análises físico-químicas de umidade (estufa a 105°C), cinzas (mufla a 550°C) e proteínas (método de Kjeldahl), em triplicata, seguindo as normas do Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008).

Resultados e Discussão

As curvas de secagem (Figuras 1, 2, 3 e 4) exibiram o comportamento típico de desidratação de vegetais em leito fixo, caracterizado por um período de taxa decrescente de secagem. Inicialmente, observou-se uma perda acelerada de água livre superficial, seguida por uma etapa onde a migração interna da umidade torna-se o fator limitante, conforme descrito por Celestino (2010). A estabilização do peso ocorreu em tempos distintos devido às características intrínsecas de cada matriz: enquanto a maioria dos tubérculos atingiu a constância em 2 horas e 40 minutos, a mandioca exigiu 3 horas e 10 minutos. Esse prolongamento no tempo de secagem da mandioca é corroborado por Maieves (2010), que atribui o fenômeno à alta densidade do amido e à estrutura celular do tubérculo, que retém a água com maior intensidade.



Quanto ao aproveitamento e valorização do produto, o estudo mostrou que a transformação de tubérculos rejeitados em chips permite uma agregação de valor significativa. Observou-se que o baixo custo da matéria-prima, aliado ao rendimento do processo de desidratação, possibilita a oferta de um produto final com preço competitivo, o que representa uma alternativa estratégica para o incremento da renda de produtores familiares em Santa Rita.

Tubérculo	Preço In Natura (R$/kg)	Rendimento de Chips (%)	Custo para produzir 100g de Chips (R$)	Preço de Venda dos Chips (100g)	Lucro Bruto Potencial (R$/100g)
Mandioca	2,00	32,1	0,64	14,90 a 26,00	14,26 a 25,36
Batata doce	1,50	27,4	0,41	14,90 a 26,00	14,49 a 25,59
Inhame	2,50		1,20	14,90 a 26,00	13,70 a 24,80
Baroa	3,50	21,9	1,62	14,90 a 26,00	13,28 a 24,38

As análises centesimais (Tabela 2) confirmaram a qualidade nutricional e a segurança dos chips. Os teores de umidade variaram entre 5,82% e 8,05%, valores consideravelmente inferiores ao limite de 12% estabelecido pela legislação brasileira para produtos desidratados (BRASIL, 2005). Essa baixa atividade de água é fundamental para garantir a estabilidade microbiológica e a crocância do produto sem o uso de conservantes químicos. Os teores de proteínas e cinzas mantiveram-se condizentes com os dados de Richeta (2021) para chips de vegetais, evidenciando que o processo de secagem a 60°C preservou os constituintes minerais e proteicos essenciais dos subprodutos.

Tubérculo	Umidade (%)	Cinzas (%)	Proteínas (%)	Carboidratos (%)
Baroa	7,63	2,98	1,5	87,9
Mandioca	6,95	1,34	1,46	90,26
Batata-doce	6,14	3,14	1,5	89,06
Inhame	5,92	4,65	1,47	87,97

Considerações Finais

A produção de chips a partir de subprodutos de tubérculos mostrou-se tecnicamente eficiente e uma via promissora para a valorização da produção agrícola local. A utilização da técnica de desidratação não apenas reduz o desperdício alimentar, mas também oferece um produto de alto valor agregado e qualidade nutricional. Embora o estudo econômico seja preliminar, os resultados indicam que o aproveitamento desses materiais contribui diretamente para a sustentabilidade e para o fortalecimento da economia rural e segurança alimentar da agricultura familiar no distrito de Santa Rita.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) pelo suporte institucional e pela disponibilização da infraestrutura laboratorial utilizada neste estudo. Agradeço também aos professores que foram apoio e agricultores da comunidade de Santa Rita pela colaboração e participação na pesquisa.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 263, de 22 de setembro de 2005. Regulamento técnico para produtos de cereais, amidos, farinhas e farelos. Brasília, DF, 2005.

CELESTINO, S. M. C. Princípios de secagem de alimentos. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010. 51 p.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction. Roma: FAO, 2019.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Métodos físico-químicos para análise de alimentos. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p.

MAIEVES, H. A. Caracterização de clones de mandioca (Manihot esculenta Crantz) quanto a aspectos físicos, químicos e sensoriais. 2010. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

PARFITT, J.; BARTHEL, M.; MACNAUGHTON, S. Food waste within food supply chains: Quantification and potential for change to 2050. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, v. 365, n. 1554, p. 3065-3081, 2010.

RICHETA, P. D. Chips de batata-doce e análise físico-química. 2021. 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Laranjeiras do Sul, PR, 2021.

ROCHA, M. P.; GUINÉ, R. P. F.; CORREIA, P. Technological processes for food waste valorization in rural communities. Waste Management & Research, v. 37, n. 1_suppl, p. 46-53, 2019.

SCHNEIDER, S. Agricultura familiar e desenvolvimento rural: conceitos e questões em debate. Revista Brasileira de Desenvolvimento Regional, v. 4, n. 1, p. 6-20, 2016.

SILVA, R. M.; SOUZA, M. L. Agroindústria de base familiar: estratégias para o fortalecimento da agricultura familiar e segurança alimentar. Revista de Extensão e Estudos Rurais, v. 3, n. 1, p. 55-72, 2017.

ESTUDO DO USO DOS RESÍDUOS DE ESCÓRIA E REFRATÁRIO DE FUNDIÇÃO EM REFORÇO DE SUBLEITO

1 Raquel Luísa Pereira Carnin, 2 João Artur de Souza, 3 Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira
1 Nova Era Soluções Ambientais, Universidade Federal de Santa Catarina, Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas (FT/UNICAMP) e-mail: raquel@nesaconsultoria.com; 2 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: joao.artur@ufsc.br; 3 Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas (FT/UNICAMP), e-mail: gisleiva@unicamp.br

Palavras-chave: escória de fundição; resíduos refratários; reforço de subleito

Introdução

A gestão adequada de resíduos industriais representa um dos principais desafios contemporâneos para os setores produtivos, especialmente em atividades intensivas em recursos naturais e geração de subprodutos. No setor metalúrgico, as fundições geram quantidades significativas de escórias e resíduos refratários como parte inerente do processo produtivo. Tradicionalmente, esses materiais são destinados a aterros industriais privados, prática que implica custos elevados e reduz o potencial de valorização desses resíduos no ciclo produtivo.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) estabelece princípios voltados à não geração, redução, reutilização e reciclagem de resíduos, priorizando alternativas que possibilitem seu reaproveitamento em novos processos produtivos. Nesse contexto, a utilização de resíduos industriais na construção civil surge como estratégia relevante para promover a economia circular e reduzir a demanda por matérias-primas naturais.

No estado de Santa Catarina, a promulgação da Lei Estadual nº 19.725/2026 estabeleceu diretrizes para a utilização de escórias e resíduos refratários de fundição como insumos na construção civil, permitindo sua aplicação em obras de infraestrutura, pavimentação, estabilização de solos e produção de materiais cimentícios. Essa regulamentação cria um ambiente jurídico favorável ao reaproveitamento desses materiais, incentivando soluções técnicas para sua utilização.

Estudos prévios indicam que resíduos provenientes de processos metalúrgicos apresentam propriedades físicas e mecânicas compatíveis com aplicações na construção civil, incluindo pavimentação asfáltica, argamassas, concretos e camadas estruturais de pavimentos. A escória de fundição, por exemplo, é formada durante a fusão de ferro-gusa e sucata metálica, apresentando composição rica em óxidos metálicos e características granulométricas que podem favorecer sua utilização como agregado.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica da utilização de resíduos de escória de fundição e refratários como agregados em camadas de reforço de subleito em obras de infraestrutura viária, analisando suas propriedades geotécnicas e seu potencial de aplicação como alternativa aos agregados naturais.

Material e Métodos

O estudo foi realizado com amostras de resíduos de escória de fundição e resíduos refratários fornecidas por uma indústria localizada na região de Joinville, Santa Catarina. Inicialmente foram realizadas análises de caracterização ambiental com o objetivo de avaliar o potencial de liberação de contaminantes e determinar a classificação dos resíduos quanto à sua periculosidade.

Os ensaios de lixiviação e solubilização foram conduzidos conforme as normas ABNT NBR 10005/2004 e NBR 10006/2004, permitindo avaliar a presença de metais e outros compostos potencialmente contaminantes nos resíduos. As análises laboratoriais foram realizadas em laboratório especializado localizado no município de Timbó, Santa Catarina.

Após a classificação ambiental dos materiais, foram conduzidos ensaios geotécnicos destinados a avaliar o comportamento mecânico dos resíduos. O ensaio de granulometria foi realizado de acordo com a ABNT NBR 7181:2016, permitindo identificar a distribuição das partículas e as características texturais do material.

A compactação foi avaliada por meio do ensaio Proctor Normal, conforme a ABNT NBR 7182:2016 e a norma DNER-M 162/94, com o objetivo de determinar a massa específica aparente e o teor de umidade das amostras.

O Índice de Suporte Califórnia (ISC) foi determinado para avaliar a capacidade de suporte do material, parâmetro amplamente utilizado na avaliação de solos e agregados empregados em camadas de pavimentação.

Também foram realizados ensaios de cisalhamento direto conforme a norma ASTM D3080-98, com velocidade de deslocamento controlada e amostras saturadas, permitindo determinar a resistência ao cisalhamento dos materiais.

Por fim, foi determinado o coeficiente de permeabilidade das amostras por meio de ensaios em permeâmetro de carga constante e carga variável, permitindo avaliar o comportamento hidráulico do material em condições de escoamento.

Resultados e Discussão

Os resultados das análises de lixiviação e solubilização indicaram que as amostras de escória e refratários foram classificadas como resíduos Classe II A – não perigosos, conforme os critérios estabelecidos pelas normas técnicas brasileiras. Essa classificação indica que os materiais não apresentam características de periculosidade e podem ser considerados aptos para aplicações controladas na construção civil.

Os ensaios granulométricos mostraram que tanto a escória quanto os resíduos refratários apresentam predominância de partículas finas, com grande parte da massa retida em peneiras com abertura inferior a 2 mm. Essa característica granulométrica pode favorecer sua utilização como material de preenchimento ou estabilização em camadas de pavimentação.

Nos ensaios de compactação Proctor Normal, os valores de massa específica aparente variaram entre aproximadamente 1,78 g/cm³ e 1,87 g/cm³ para a escória de fundição e cerca de 1,79 g/cm³ para o resíduo refratário. Esses resultados indicam capacidade moderada de compactação, compatível com materiais granulares utilizados em obras de infraestrutura.

Os ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) demonstraram que os resíduos apresentam capacidade de suporte inferior à de agregados naturais tradicionais, como brita ou cascalho. Entretanto, os valores obtidos indicam que o material pode ser utilizado em aplicações específicas, como camadas de reforço de subleito, desde que sejam adotadas condições adequadas de compactação e controle granulométrico.

Os ensaios de cisalhamento direto indicaram que a escória de fundição apresenta resistência ao cisalhamento sob diferentes níveis de tensão normal, demonstrando comportamento mecânico compatível com materiais utilizados em obras geotécnicas. Observou-se também aumento do teor de umidade após a realização do ensaio, evidenciando a influência das condições de saturação no comportamento do material.

Além dos aspectos técnicos, a utilização desses resíduos apresenta benefícios ambientais e econômicos relevantes. Considerando a geração anual estimada de aproximadamente 30 mil toneladas de escória e refratários na região de Joinville, sua aplicação na construção civil pode reduzir significativamente a disposição em aterros industriais e diminuir a necessidade de extração de agregados naturais.

Adicionalmente, a substituição parcial de agregados minerais por resíduos industriais pode contribuir para a redução de emissões de dióxido de carbono associadas à extração, processamento e transporte de matérias-primas naturais, reforçando o papel dessas soluções na promoção da economia circular e na mitigação de impactos ambientais.

Considerações Finais

Os resultados obtidos neste estudo indicam que os resíduos de escória de fundição e refratários apresentam potencial de utilização como agregados em camadas de reforço de subleito em obras de infraestrutura viária.

As análises ambientais demonstraram que os materiais podem ser classificados como resíduos não perigosos, enquanto os ensaios geotécnicos indicaram comportamento mecânico compatível com aplicações em engenharia civil, ainda que com desempenho inferior ao de agregados naturais em alguns parâmetros.

A utilização desses resíduos pode representar alternativa técnica, ambiental e economicamente viável, contribuindo para a redução da disposição em aterros industriais e para a valorização de subprodutos do setor metalúrgico.

Além disso, a existência de legislação estadual específica que regulamenta a utilização desses materiais fortalece a segurança jurídica para sua aplicação, incentivando práticas alinhadas aos princípios da economia circular e da gestão sustentável de resíduos.

Recomenda-se a continuidade de estudos voltados à avaliação do desempenho em longo prazo desses materiais em obras de pavimentação, bem como o desenvolvimento de diretrizes técnicas que permitam ampliar sua aplicação em diferentes contextos da construção civil.

Agradecimentos

Os autores do presente trabalho gostariam de registrar os seus agradecimentos às seguintes instituições pelo apoio recebido: Castertech Schroeder Ltda., Nova Era Soluções Ambientais, Universidade Federal de Santa Catarina, Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas (FT/UNICAMP).

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 7216/2001 Amostragem de Agregado** – **Método**. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT– ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Resíduos Sólidos – **Lixiviação** – NBR 10005/2004. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT– ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Resíduos Sólidos – **Solubilização** – NBR 10006/2004. Rio de Janeiro, 2004.

BARADARAN-NASIRI, A; NEMATZADEH, M. **The effect of elevated temperatures on the mechanical properties of concrete with fine recycled refractory brick aggregate and aluminate cement.** Construction and Building Materials, 2017.

CARNIN, Raquel Luísa Pereira; VIEIRA, José Carlos; STORTZ, Simone. **Uso de escória e refratário em reforço de subleito**. In: CONAF – Congresso Nacional de Fundição, 2024. Anais.

CECCATTO, D.M. **Avaliação da utilização de escória granulada de fundição (EGF) como substituição de parte do cimento em concreto- propriedades mecânicas.** 2003. Tese (Mestrado em engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS,2003.

FANG, H., et al. **Study of spent refractory waste recycling from metal manufacturers in Missouri.** Resources, Conservation and Recycling, 1999.

FUSINATO, Joni. **Estudo da Viabilidade Técnico-Ambiental para Incorporação da Escória Férrica na Pavimentação Asfáltica como Agregado Miúdo.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

LAMBE, T. William. **Soil Testing for Engineers**. New York: John Wiley & Sons, 1951.

LÚCIO, A. **Estrutura e Propriedades das Escórias**. In: Físico-química metalúrgica, 2ª. Parte. Belo Horizonte: UFMG, 1981, cap. 16, p. 555-559.

PEREIRA, Nuria; ÁLVAREZ, David; DÍAZ, Belén; ESTÉVEZ, Xian; FIGUEROA, Raúl; NOVOA, X. Ramon; PÉREZ, Carmen; PINTOS, Aranzazu. **Mechanical, microstructural and electrical characterization of Portland cement mortars with foundry slags as sand replacement.** *Journal of Building Engineering*, v. 100, 2025, 111786. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.111786

SANTOS, Maria de Lourdes. **Reutilização de resíduo SiO_2 como potencial na confecção de massa refratária de sílica.** Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais, Joinville, 2013.

SILVA, R. D. S. S. **Avaliação do potencial de reutilização de resíduos refratários em massas refratárias.** Trabalho de Diplomação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Novembro, 2011.

TIECHER, F. et al. **Avaliação do potencial de utilização da escória granulada de fundição em concreto autoadensável**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 73-88, jan./mar. 2019.

TORRENS, S. C. **Utilização de Resíduo Refratário Aluminoso como POTENCIAL na Substituição Parcial de Cimento na Confecção de Argamassas de Revestimento.** Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Centro de Ciências Tecnológicas – CCT. Joinville, 2022.

TRATAMENTO DE EFLUENTE DO TINGIMENTO COM CORANTE NATURAL DE URUCUM POR ELETROCOAGULAÇÃO

1 Quethelen Elizabeth Araujo Garcez Zimermann, 2Manuella Cristina Nuss de Oliveira, 2 Caio dos Santos Miranda Penteado, Ivonete Oliveira Barcellos 3*, Marcel Jefferson Gonçalves1,4*

1 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Regional de Blumenau (FURB), Blumenau, SC, Brasil., e-mail:qrodrigues@furb.com; 2 Departamento de Engenharia Química, Universidade Regional de Blumenau (FURB), Blumenau, SC, Brasil, e-mail: mcnoliveira@furb.br, cpenteado@furb.com; 3Universidade Regional de Blumenau (FURB), Departamento de Química, Blumenau, SC, Brasil., e-mail: iob@furb.br; 4Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Regional de Blumenau (FURB), Blumenau, SC, Brasil.; e-mail: marcelg@furb.br

Palavras-chave: Eletrocoagulação; Efluente têxtil; Corante de urucum;

Introdução

Os efluentes têxteis são uma constante preocupação em operações têxteis comerciais, especialmente em relação à conformidade com os requisitos de cor residual durante o lançamento dos efluentes tratados (Da Silva et al., 2024; Zaldivar-Díaz et al., 2023). O processamento têxtil compreende operações de pré-tratamento, tingimento, estamparia e acabamento, que consomem grandes quantidades de energia e água, gerando efluentes potencialmente contaminados (Zaldivar-Díaz et al., 2023).

Efluentes com concentrações de corantes que ultrapassem o limite de 75 $mgPt.L^{-1}$ em cursos d'água, decorrentes do lançamento de efluentes têxteis tratados, podem resultar em não conformidades ambientais (CONAMA 357:2005). Essas elevadas concentrações prejudicam a reoxigenação e a incidência de luz, afetando a atividade biológica aquática e o processo de fotossíntese em plantas e algas (Berradi et al., 2019). O tratamento convencional de efluentes faz uso de processos biológicos combinados com produtos químicos. Nesse contexto, a aplicação de técnicas eletroquímicas apresenta-se como uma alternativa sustentável para o tratamento desses efluentes, pois dispensa a adição de reagentes químicos, reduz a geração de lodo e os custos associados ao seu manejo, além de apresentar menores tempos de inicialização e contato (Criado et al., 2020).

A eletrocoagulação (EC) é uma técnica eficiente no tratamento de efluentes, promovendo a remoção de cor e outras impurezas presentes em efluentes têxteis (Da Silva et al., 2024). Essa tecnologia é caracterizada por elevada taxa de remoção de poluentes, equipamentos compactos, operação simples e baixos custos de capital e operação (Aguilar-Ascón et al., 2023). O processo envolve a formação de flocos de hidróxidos metálicos pela eletrodissolução de ânodos solúveis, geralmente de ferro ou alumínio (Aguilar-Ascón et al., 2023; Jasim et al., 2023). A EC compreende reações eletrolíticas nos eletrodos, formação de coagulantes, adsorção de poluentes e sua posterior remoção por sedimentação e flotação (Hassoune et al., 2024). Durante a eletrólise, ocorre a migração de íons sob a ação de um campo elétrico. Os íons positivos deslocam-se em direção ao cátodo, enquanto os negativos migram para o ânodo quando uma corrente elétrica é aplicada (Dubey et al., 2024; Jasim et al., 2023). A redução ocorre no cátodo e a oxidação no ânodo. O ânodo sofre corrosão, liberando íons metálicos, enquanto ocorre a formação de gás hidrogênio. As bolhas geradas promovem a flotação de partículas poluentes, facilitando sua remoção (Arora et al., 2018).

O processo de eletrocoagulação compreende três etapas principais: oxidação eletrolítica dos ânodos (eletrocoagulação), agregação e crescimento de flocos (eletrofloculação) e geração de microbolhas gasosas (eletroflotação) (Seth et al., 2023). Diversos estudos destacam parâmetros críticos para sua eficiência, como a faixa de pH ideal, que varia conforme o tipo de eletrodo utilizado e efluente processado (Khaled et al., 2019; Khandegar).

De modo geral, a faixa de pH recomendada para ânodos de alumínio situa-se entre 4 e 9. Nessas condições, formam-se espécies como $Al(OH)_3$, responsáveis pela floculação e remoção de poluentes (Mao; Zhao; Cotterill, 2023). Ghernaout et al. (2011) identificaram intervalos específicos de pH para diferentes eletrodos, evidenciando a importância desse parâmetro no desempenho do processo. Mouedhen et al. (2008) investigaram o uso de eletrodos de alumínio em uma ampla faixa de pH (2 a 12), destacando que a estabilidade das espécies formadas e a eficiência da precipitação dependem do controle adequado do pH. Além disso, variáveis operacionais como densidade de corrente, tempo de reação e material dos eletrodos influenciam na eficiência do tratamento (Arora et al., 2018). Bayar et al. (2011) observaram que o pH inicial influencia diretamente no processo, com melhores resultados em condições mais ácidas (pH 3,0). Em relação à densidade de corrente, valores entre 0,5 e 2,0 mA/cm^2 apresentaram elevada eficiência na remoção de DQO e turbidez.

No contexto da sustentabilidade, Criado et al. (2020) demonstraram a importância de reutilização da água tratada no tingimento, especialmente nas etapas de lavagem, contribuindo para a redução do consumo hídrico e aumento da viabilidade econômica do processo. Diante desse contexto, este estudo propõe a aplicação da eletrocoagulação como alternativa para o tratamento de efluentes têxteis contendo corante natural de urucum. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência do processo no tratamento do efluente de pior desempenho obtido no tingimento, visando à remoção de cor e à melhoria da qualidade do efluente final.

Material e Métodos

A coleta do banho residual de tingimento foi realizada nas condições de pH e concentração que apresentaram os piores resultados em termos de intensidade de cor (K/S) e solidez dos tecidos, ou seja, que gerariam maior concentração de corante

residual. Em seguida, foram conduzidos os ensaios de eletrocoagulação, com o objetivo de avaliar a eficiência do processo e a viabilidade de reutilização do efluente. O sistema utilizado para os ensaios de eletrocoagulação foi composto por um reator eletrolítico, eletrodos de alumínio, uma unidade retificadora de corrente, além de fios e terminais elétricos para as conexões.

O reator eletrolítico utilizado foi confeccionado em acrílico, com volume nominal de aproximadamente 2,5 L, altura útil de 135,0 mm e volume operacional de 2,0 L. Em 2,4 cm acima da base, o reator possui uma torneira para coleta de amostras, (Criado 2017). Essa configuração permite que, em condições normais, o lodo gerado durante a eletrocoagulação permaneça abaixo do nível de amostragem, evitando a contaminação do efluente clarificado com sólidos sedimentados.

Em cada ensaio, foram utilizados 2,0 L da solução residual de corante. O arranjo contou com seis placas de alumínio, com altura de 0,149 m (0,12 m submersos no líquido), largura de 0,125 m e espessura de 3,0 mm, dispostas em paralelo, equidistantes em 20 mm, resultando em área efetiva de 0,015 m² por placa. Assim, obteve-se uma área total de 0,09 m² considerando um lado de todas as placas, ou 0,18 m² considerando ambos os lados, correspondendo a uma densidade de área eletrolítica de 90 m²/m³ para 2 L de solução. Para converter a corrente alternada em corrente contínua e ajustar a intensidade aplicada, foi empregada uma unidade retificadora de corrente ICEL (modelo PS-1001), que permite regulagem de tensão e corrente nas faixas de 0 a 30 V e 0 a 10 A.

Para a determinação das condições ótimas, foi utilizado um planejamento experimental do tipo Box-Behnken (3^3), totalizando 15 ensaios, com inclusão de pontos axiais e repetições no ponto central. O objetivo foi identificar os níveis ideais das variáveis independentes que maximizam a resposta do sistema (remoção de cor). A condutividade foi ajustada com NaCl, enquanto o pH inicial e a concentração foram mantidos constantes. Em cada ensaio, foram medidas as absorbâncias inicial e final para cálculo da remoção de cor.

Resultados e Discussão:

A remoção de cor variou entre 65% e 88%, indicando boa eficiência da eletrocoagulação (Tabela 1). O aumento da corrente elétrica resultou em maiores remoções, devido à maior geração de espécies coagulantes. O tempo de tratamento também influenciou positivamente, porém com ganhos menores em tempos mais elevados. A condutividade apresentou comportamento não linear, com melhores resultados em valores intermediários a altos, destacando-se o ensaio com 1250 µS/cm, que atingiu a maior remoção (87,79%). Valores muito baixos ou elevados reduziram a eficiência. Os ensaios no ponto central apresentaram boa reprodutibilidade, confirmando a consistência dos dados.

Tabela 1 - Condições experimentais e remoção de cor (%) obtidas nos ensaios de eletrocoagulação.

Ensaios	Tempo (min)	Corrente (A)	Condutividade (µS/cm)	Remoção de cor %
1	8	3	1000	65,21
2	8	5	1000	74,88
3	14	3	1000	73,96
4	14	5	1000	77,88
5	11	3	750	79,72
6	11	5	750	79,72
7	11	3	1250	79,49
8	11	5	1250	86,18
9	8	4	750	78,34
10	14	4	750	80,65
11	8	4	1250	85,48
12	14	4	1250	87,79
13	11	4	1000	82,49
14	11	4	1000	82,95
15	11	4	1000	79,26
16	11	2	1000	80,88
17	11	6	1000	81,34
18	5	4	1000	65,21
19	17	4	1000	78,11
20	11	4	500	80,88
21	11	4	1500	75,81

Fonte: Autora, 2026.

Na Tabela 2 (ANOVA) observa-se que tempo, corrente e condutividade influenciam significativamente a remoção de cor ($p < 0,05$). A corrente elétrica foi o fator mais influente, seguida da condutividade, enquanto o tempo apresentou menor impacto. O modelo matemático apresentou bom ajuste ($R^2 = 0,8887$; R^2 ajustado = 0,8053), indicando que os fatores avaliados explicam a maior parte da variabilidade da resposta. A eficiência do processo depende principalmente da corrente e da condutividade, com menor contribuição do tempo (mas ainda relevante), nas faixas de valores estudados.

Tabela 2 - Resultados da análise de variância (ANOVA) para a remoção de cor (%), considerando os fatores tempo, corrente e condutividade.

Fator	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (gl)	Quadrado Médio (QM)	F	P
Tempo (min)	76.1023	2	38.05116	6.34087	0.022388
Corrente (A)	150.6313	2	75.31665	12.55065	0.003412
Condutividade (µS/cm)	141.0856	2	70.54282	11.75530	0.004155
Erro	48.0075	8	6.00094	-	-

Fonte: Autora, 2026

A Figura 1 indica que a remoção de cor aumenta até condições intermediárias dos fatores avaliados. O tempo apresentou melhora até 11 minutos, com leve redução em 14 minutos. A corrente elétrica elevou a eficiência até 4 A, com posterior estabilização. A condutividade exibiu comportamento não linear, com melhores resultados em 1250 µS/cm. A tabela ANOVA confirmou que todos os fatores são significativos ($p < 0,05$), com maior influência da corrente, seguida da condutividade, e do tempo. A significância dos termos quadráticos reforça a existência de condições ótimas. A máxima eficiência do processo é obtida em condições intermediárias de operação, com destaque para a corrente e a condutividade.

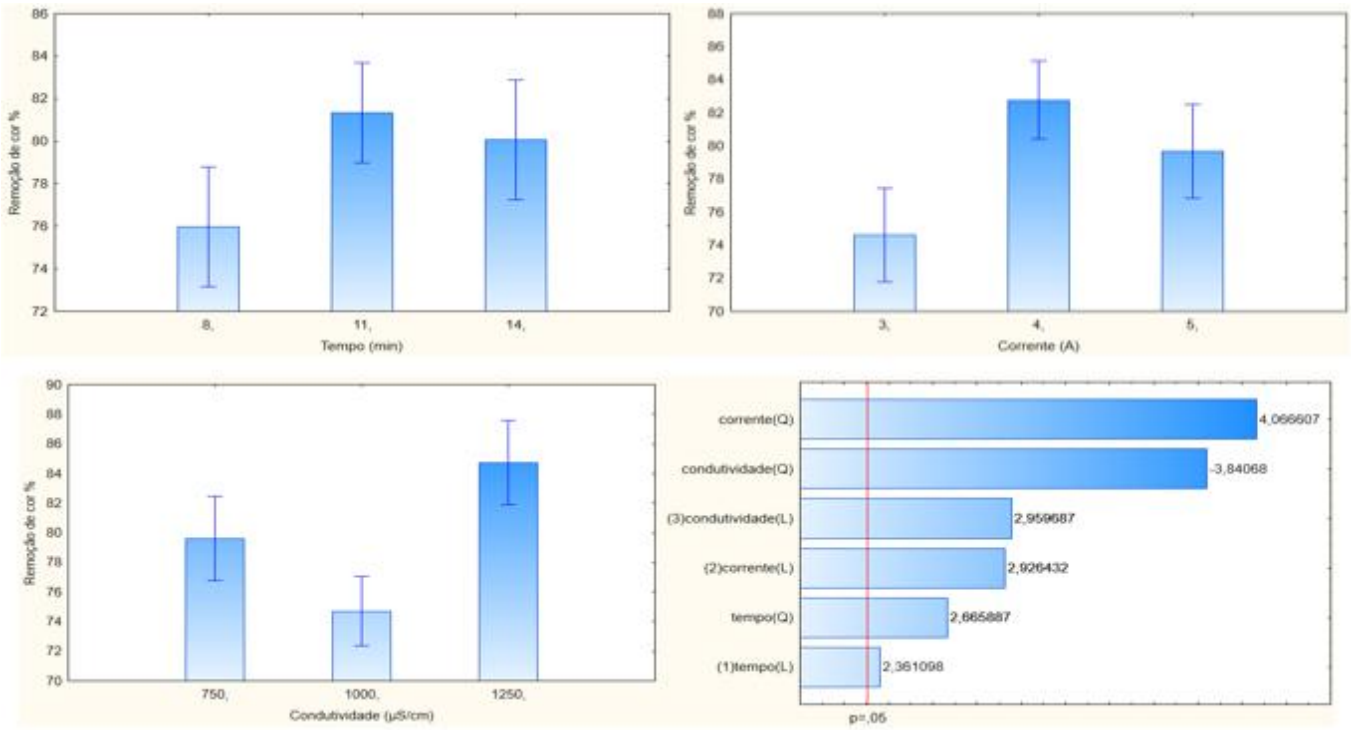


Figura 1 - Representação dos efeitos dos fatores operacionais na remoção de cor (%), com gráficos de tendência e análise de significância por meio do diagrama de Pareto.
Fonte: Autora, 2026.

As superfícies de resposta evidenciam comportamento não linear dos fatores, com máxima remoção de cor em condições intermediárias. A condutividade apresentou faixa ótima em valores mais elevados, enquanto a corrente mostrou aumento da eficiência até níveis intermediários, sendo potencializada pela condutividade. O tempo contribuiu até um limite, com tendência de estabilização em valores mais altos. Esses resultados estão em concordância com a ANOVA e o diagrama de Pareto, que indicaram a corrente e a condutividade como os fatores mais influentes, enquanto o tempo apresentou menor impacto relativo (Figura 2).

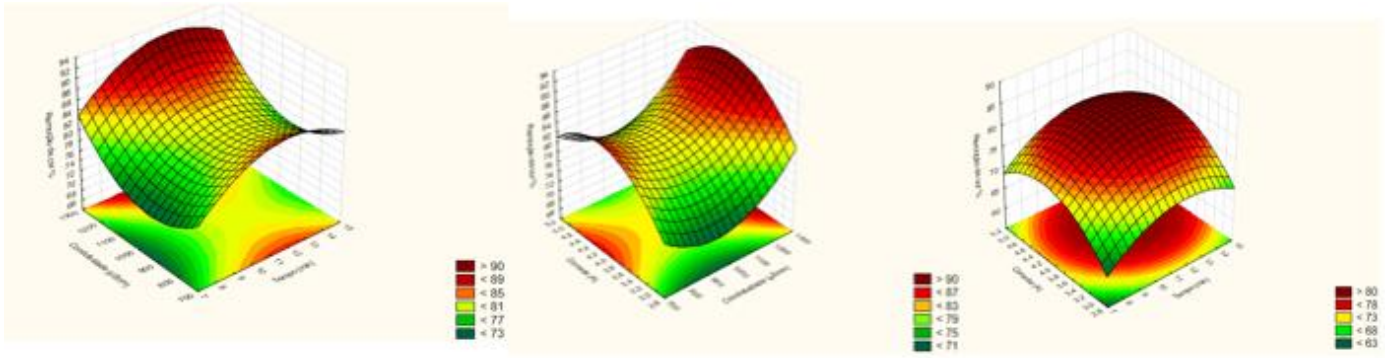


Figura 2 - Superfícies de resposta para a remoção de cor (%): (a) efeito da condutividade e do tempo; (b) efeito da corrente e da condutividade; (c) efeito da corrente e do tempo.
Fonte: Autora, 2026.

Considerações Finais

A eletrocoagulação mostrou-se eficiente no tratamento do efluente de tingimento com urucum, com remoções de cor entre 65% e 88%. A corrente elétrica e a condutividade foram os fatores mais influentes, seguido pelo tempo. O comportamento não linear indicou a existência de condições ótimas em níveis intermediários dos fatores. Os resultados da tabela ANOVA e das superfícies de resposta foram consistentes, confirmando a confiabilidade do modelo. Assim, a eletrocoagulação se apresenta como uma alternativa promissora para a remoção de cor e melhoria da qualidade de efluentes têxteis.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – código de financiamento 001.

Referências Bibliográficas

AGUILAR-ASCÓN, Edwar et al. Use of the sludge obtained from the electrocoagulation process of pumping waters of fishmeal factories for feeding *Tenebrio molitor* larvae. *Heliyon*, v. 9, n. 5, 2023.

ARORA, Amit et al. Treatment of waste water through electrocoagulation. *Pollution Research*, v. 37, n. 2, p. 394–403, 2018a.

BAYAR, Serkan et al. The effect of stirring speed and current density on removal efficiency of poultry slaughterhouse wastewater by electrocoagulation method. *Desalination*, v. 280, n. 1–3, p. 103–107, 2011.

BERRADI, Mohamed et al. Textile finishing dyes and their impact on aquatic environs. *Heliyon*, v. 5, n. 11, 2019.

CRIADO, Sergio Pérez et al. Optimization of electrocoagulation process for disperse and reactive dyes using the response surface method with reuse application. *Journal of Cleaner Production*, v. 275, 2020.

DA SILVA, Luiz Thiago Vasconcelos et al. Electrocoagulation cell for the production of hydrogen without carbon emission and simultaneous treatment of textile wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 64, p. 906–913, 2024.

DUBEY, Savita et al. Optimizing distillery effluent treatment through sono-electrocoagulation. *Total Environment Advances*, v. 9, 2024.

GHERNAOUT, D.; NACEUR, M. W.; GHERNAOUT, B. A review of electrocoagulation as a promising coagulation process. *Desalination and Water Treatment*, v. 28, p. 287–320, 2011.

HASSOUNE, Jamila et al. Hospital wastewater treatment using electrocoagulation. *Desalination and Water Treatment*, v. 317, 2024.

JASIM, Muhammad Aiyd et al. Studying the effect of reactor design on electrocoagulation treatment performance. *Heliyon*, v. 9, n. 7, 2023.

KHALED, Brahmi et al. Investigation of electrocoagulation reactor design parameters effect on cadmium removal. *Arabian Journal of Chemistry*, v. 12, n. 8, p. 1848–1859, 2019.

KHANDEGAR, V.; SAROHA, Anil K. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent: a review. *Journal of Environmental Management*, 2013.

MAO, Yi; ZHAO, Yaqian; COTTERILL, Sarah. Examining current and future applications of electrocoagulation. *Water*, 2023.

MOUEDHEN, G. et al. Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. *Journal of Hazardous Materials*, v. 150, n. 1, p. 124–135, 2008.

SETH, Kushal et al. Electrocoagulation of high-salinity produced water. *Current Opinion in Chemical Engineering*, v. 42, 2023.

ZALDIVAR-DÍAZ, Juan Marcelo et al. Electrocoagulation–precipitation process for denim wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, v. 51, 2023.

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DE PRODUÇÃO DE HIDROGÉIS DE ALGINATO DE SÓDIO CONTENDO LAMA VERMELHA

Maria Eduarda Pierami, Maria Lúcia Pereira Antunes, Jose Antônio da Silva Souza
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, e-mail: me.pierami@unesp.br ; Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, e-mail: pereira.antunes@unesp.br ; Instituto de Tecnologia da UFPA, e-mail: jass@ufpa.br

Palavras-chave: Hidrogel; Alginato de sódio; Lama Vermelha.

Introdução

A lama vermelha é o resíduo gerado no beneficiamento da bauxita para obtenção do alumínio, através do processo Bayer. O Brasil se destaca como, sendo o quinto maior produtor mundial de alumínio (ANM, 2025). De acordo com o Sumário Mineral (2025), a produção brasileira de bauxita beneficiada atingiu aproximadamente 31,8 Mt em 2024, correspondendo a cerca de 7,1% da produção mundial, sendo o estado do Pará responsável por 92,6% produção do Brasil. Apesar de sua relevância econômica, a cadeia produtiva do alumínio está associada a impactos ambientais significativos, principalmente devido à geração de seu resíduo. Estima-se que a produção de alumina gere entre 1,0 e 1,8 toneladas de lama vermelha por tonelada produzida, resultando em grandes volumes desse resíduo (WANG et al., 2021).

A lama vermelha é composta, em geral, por óxidos de ferro, titânio, silício e alumínio, podendo apresentar variações conforme a origem da bauxita (ANTUNES et al., 2012). Atualmente, sua disposição ocorre predominantemente em barragens, configurando um importante passivo ambiental. Mesmo com tratamentos para mitigação de impactos, ainda há riscos associados, como erosão eólica, escoamento superficial e lixiviação de soluções alcalinas (JONES; HAYNES, 2011; ANTUNES et al., 2021). Diante desse cenário, torna-se cada vez mais necessária a busca por alternativas sustentáveis para a gestão da lama vermelha, visando à redução de impactos ambientais e à agregação de valor a esse subproduto. Nesse contexto, o conceito de economia circular ganha destaque, ao propor a reinserção de resíduos em cadeias produtivas (FOSTER et al., 2016).

O alginato é um polissacarídeo natural extraído de algas marrons, caracterizado por sua biocompatibilidade e biodegradabilidade (PAULA, 2010). Além disso, apresenta elevada capacidade de encapsulamento, permitindo a incorporação de diferentes substâncias em sua matriz, com potencial para processos de adsorção e liberação controlada (BAIGORRIA; FRACETO, 2022). Nesse contexto, esta pesquisa propõe a produção de microesferas poliméricas de alginato de sódio incorporadas com lama vermelha, visando à valorização desse resíduo para aplicações em diferentes áreas, como agricultura e indústria. A encapsulação contribui, ainda, para uma forma alternativa de aproveitamento de resíduos de mineração, promovendo princípios da economia circular.

Material e Métodos

Materiais

As lama vermelha utilizadas neste trabalho foram obtidas da região norte do Brasil e serão denominadas como LVN. A amostra tem coloração avermelhada, essa característica física está relacionada à concentração de ferro do resíduo, podendo variar a depender da região (ANTUNES et al., 2012). A amostra utilizada se encontra seca, em forma de pó, por terem por um processo de secagem quando armazenada.

Hidrogel de Alginato de Sódio e encapsulamento do resíduo

Foram produzidas microesferas utilizando alginato de sódio na porcentagem de 4% (em massa de soluto/volume da solução). A solução de alginato de sódio foi preparada pela dissolução de 0,6 g em 15 mL de água destilada, sob agitação magnética por 24 h. As microesferas foram formadas por gelificação iônica, via gotejamento da solução de alginato em solução de $CaCl_2$ (Figura 1). As esferas permaneceram sob agitação por 30 min. Em seguida, foram separadas e lavadas com água destilada. Os hidrogéis (AG) foram armazenados em recipiente esterilizado submersos em água ultrapura. (BAIGORRIA et al., 2020).

O procedimento de encapsulamento da lama vermelha seguiu a mesma metodologia descrita para a produção das microesferas, sendo o material incorporado durante a etapa de preparo e agitação da solução de alginato. Foram avaliadas formulações contendo 100% e 50% de lama vermelha, definidas em relação à massa de alginato de sódio (razão m/m), sendo usado 0,6 g de lama vermelha adicionadas a mistura para formulação da amostra HLVN100%, e 0,3 g para a mostra HLVN50%.



Figura 01: Desenho esquemático de processo de produção dos hidrogéis
Fonte: Autoria própria (2026)

Caracterização

A amostra em pó de LVN foi caracterizada quanto ao seu pH e à condutividade e analisada sua estrutura por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR/ATR, Cary 630, Agilent Technologies), na faixa de 4000 a 500 cm^{-1}.

Os hidrogéis de alginato de sódio, com e sem encapsulamento de lama vermelha, foram caracterizados quanto ao pH e à condutividade elétrica. Para isso, 1 g de amostra foi disperso em 25 mL de água destilada, sob agitação por 24 h. As medições de pH foram realizadas com pHmetro e condutivímetro (soluções tampão pH 7,00 e 10,00 (COPELLO et al., 2014). A caracterização estrutural foi realizada por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR/ATR, Cary 630, Agilent Technologies), na faixa de 4000 a 500 cm^{-1}.

O ponto de carga zero (pHPCZ) do alginato de sódio foi determinado pelo método do ΔpH. O pH inicial das suspensões foi ajustado entre 2,0 e 10,0 utilizando soluções de HCl 0,1 mol L^{-1} e NaOH 0,1 mol L^{-1}.Após agitação por 24 h, o pH final foi medido em pHmetro de bancada previamente calibrado (soluções tampão pH 7,00 e 10,00). O pHPCZ foi determinado a partir da relação entre Δ_{pH} ($pH_{_final} - pH_{_inicial}$) e o pH inicial, conforme metodologia descrita por Copello (2014).

Resultados e Discussão

A partir dos resultados de pH das amostras, apresentados na tabela 1, é possível avaliar alta alcalinidade na amostra de lama vermelha em pó (LVN), e observasse que ao ser encapsulado no hidrogel de alginato (AG) de pH neutro, apresenta uma redução significativa em seu pH, com menor resultado sendo da amostra HLVN50% com pH (8,1 ± 0,8). O mesmo processo acontece com a condutividade elétrica que é alta na lama vermelha, e ao ser encapsulada apresenta uma significativa redução.

Tabela 01: Tabela de dados de pH e Condutividade das amostras de lama vermelha do Pará e hidrogéis de alginato e amostras de encapsulamento da lama vermelha

Dados de pH e condutividade dos hidrogéis		
Amostras	**pH**	**CE (mS)**
LVN	10,67 ± 0,03	4,6 ± 0,8
AG	6,6 ± 0,2	0,177 ± 0,006
HLVN100%	8,3 ± 0,7	0,067 ± 0,005
HLVN50%	8,1 ± 0,8	0,049 ± 0,007

Fonte: Autoria própria (2026)

O número médio de esferas de hidrogel produzidas foi de (288±18) e massa de aproximadamente (17,4±2,4) g. O desvio padrão de ambas as análises de rendimento reflete o processo ainda manual de confecção dos biopolímeros.

A Figura 02 mostra a curva com os dados obtidos a partir do experimento de ponto de carga zero feito com a microesfera de alginato (AG), para compreensão da capacidade de interação química do biopolímero. O valor de pH_pzc próximo à neutralidade (6,99) indica que o hidrogel apresenta comportamento ácido-base variável, podendo adquirir carga positiva ou negativa dependendo do pH do meio. Essa característica favorece sua aplicação como material adsorvente versátil, permitindo a interação tanto com espécies aniônicas quanto catiônicas em diferentes condições ambientais.

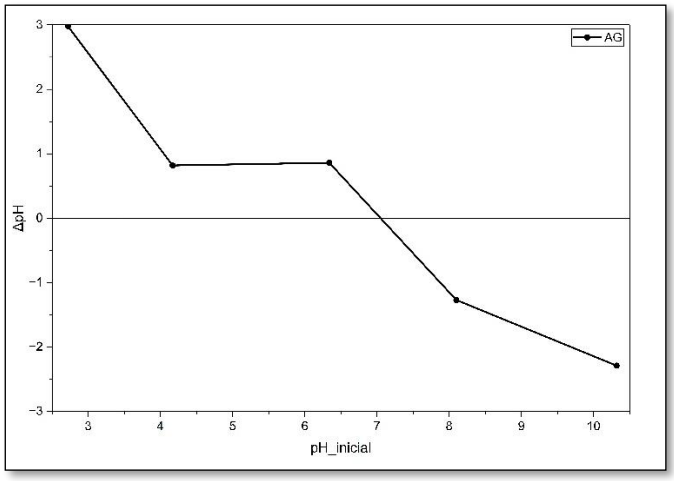


Figura 2: Gráfico de pH_{PCZ} do hidrogel de alginato de sódio AG
Fonte: Autoria própria (2026)

A análise por FTIR das amostras de lama vermelha está apresentada na Figura 3. Através dessa análise foi possível identificar os grupos funcionais orgânicos e inorgânicos e avaliar alterações estruturais decorrentes da sua incorporação ao alginato de sódio, um polímero de origem orgânica.

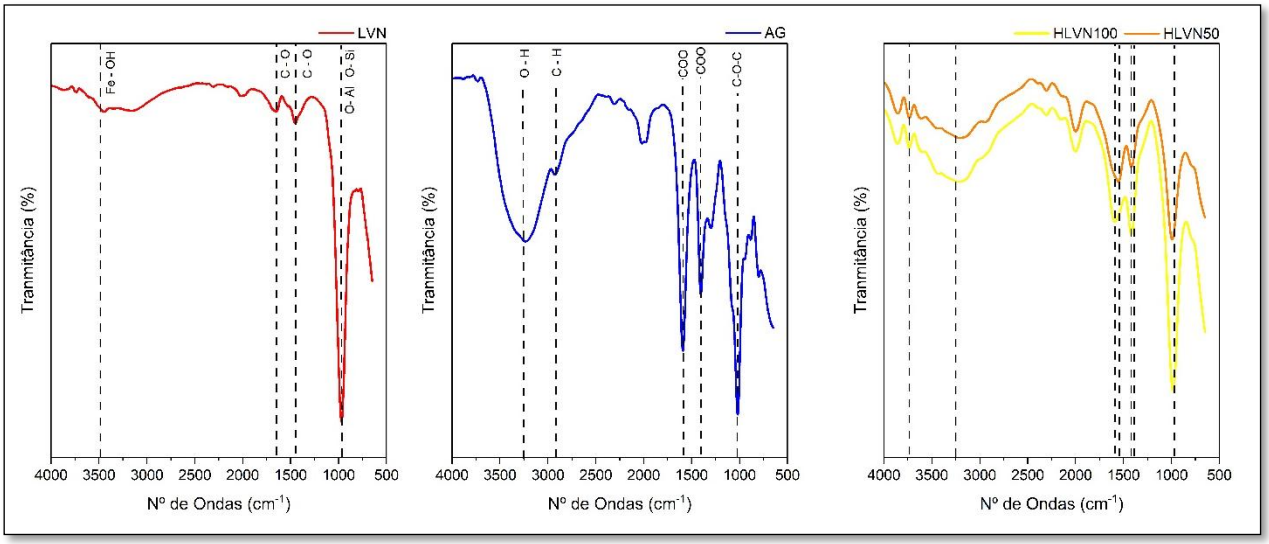


Figura 03: Gráficos de FTIR das amostras de LVN, AG, HLVN100 E HLVN50.
Fonte: Autoria própria (2026)

Considerando a amostra lama vermelha (LVN), observam-se bandas características na região próxima de 1000 cm^{-1}, aparecem absorções sobrepostas relacionadas à deformação angular das ligações Al–O e Si–O. Já na região intermediária, entre 1430 e 1640 cm^{-1}, destacam-se bandas associadas ao grupo C–O de carbonatos (CO_3^{2-}). Por fim, na região em torno de 3.500 cm^{-1} é atribuída ao estiramento vibracional de hidroxilas coordenadas à estrutura dos óxidos de ferro, como a presença de bandas de OH referentes a água adsorvida na superfície. (CHAGAS; RESENDE; GUERREIRO, 2019).

Em relação ao hidrogel de alginato de sódio, observa-se a manutenção das principais bandas características do material. A banda larga em torno de 3243 cm^{-1} é atribuída ao estiramento de O–H, cuja variação de intensidade indica diferentes graus de interação por ligações de hidrogênio. Entre 2926–3000 cm^{-1}, aparecem bandas de estiramento de C–H, evidenciando a integridade da cadeia polimérica. As absorções em 1592 e 1413 cm^{-1}, relacionadas ao grupo COO^-, apresentam variações de intensidade e pequenos deslocamentos, sugerindo mudanças no ambiente químico desses grupos. Na região de 1297–1021 cm^{-1}, as bandas de C–O e C–O–C estão bem definidas, confirmando a estrutura polissacarídica do alginato (FERNANDES et al., 2018)

Por fim, na análise do alginato de sódio incorporado com lama vermelha, verifica-se a preservação das principais características estruturais de ambos os materiais. As bandas típicas do alginato são mantidas, enquanto surgem contribuições associadas aos grupos inorgânicos da lama vermelha, como as vibrações de Fe–O, Al–O e Si–O. As variações observadas nas intensidades e pequenos deslocamentos das bandas, especialmente nas regiões associadas ao grupo COO^-, indicam interações entre os carboxilatos do alginato e os cátions presentes na lama vermelha. Essas alterações confirmam a formação do material

híbrido, evidenciando boa interação e adesão entre os componentes, sem comprometer a estrutura fundamental do alginato, que se mantém durante o processo de encapsulamento, apresentando apenas diferenças nos alongamentos em função das concentrações (CHAGAS et al., 2019)

Considerações Finais

Os resultados obtidos neste estudo demonstram a viabilidade do encapsulamento da lama vermelha em microesferas de alginato de sódio, com alta eficiência de encapsulação e boa estabilidade das esferas. A incorporação da lama vermelha no alginato promoveu uma redução significativa do pH e da condutividade das esferas. Assim como nas análises de FTIR que mostram uma boa incorporação entre alginato de sódio e a lama vermelha, fazendo com que ambas as substâncias não percam suas principais propriedades.

Essa funcionalidade obtida com a lama vermelha obtendo-se esferas de alginato apresentam potencial para facilitar processos como a utilização de minerais contidos nesse resíduo para diversas abrindo novas perspectivas para a valorização deste resíduo industrial. Novas pesquisas são necessárias para investigar a influência de diferentes variáveis do processo de encapsulamento nas propriedades das esferas e explorar possíveis usos desse novo material.

Agradecimentos

Agradeço a Coordenação de Iniciação Científica e Tecnológica - PROEp/UNESP pela bolsa PIBIC. Ao Laboratório NATEL/UNESP (Núcleo de Automação e Tecnologias Limpa) e ao Laboratório de Nanotecnologia Ambiental/UNESP.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. *Anuário Mineral Brasileiro 2025*. Brasília: ANM, 2025. p. 5–9.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. *Sumário Mineral 2025 (ano base 2024)*. Brasília: ANM, 2025. Alumínio, p. 1–2.

ANTUNES, M. L. P. et al. Red mud from Brazil: thermal behavior and physical properties. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 51, n. 2, p. 775–777, 2012.

ANTUNES, Maria Lucia Pereira; CONCEIÇÃO, Fabiano Tomazini; NAVARRO, Guillermo Rafael Beltran; FERNANDES, Alexandre Martins; DURRANT, Steven Frederick. Use of red mud activated at different temperatures as a low cost adsorbent of reactive dye. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 26, n. 5, p. 805–807, set./out. 2021.

BAIGORRIA, Estefanía; CANO, Leonardo A.; SANCHEZ, Laura M.; ALVAREZ, Vera A.; OLLIER, Romina P. Bentonite-composite polyvinyl alcohol/alginate hydrogel beads: preparation, characterization and their use as arsenic removal devices. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, v. 14, p. 100364, 2020.

BAIGORRIA, Estefanía; FRACETO, Leonardo F. Low-cost biosorbent hybrid hydrogels for paraquat remediation of water. Sorocaba: Universidade Estadual Paulista (UNESP); Mar del Plata: CONICET; Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP), 2022.

CHAGAS, G. M.; RESENDE, E. C.; GUERREIRO, M. C. Tratamento da lama vermelha com CO_2 e ácido acético para aplicação em sistemas tipo Fenton e fotocatálise. *Revista Matéria*, v. 24, n. 3, 2019.

COPELLO, G.; VILLANUEVA, M. E.; GONZÁLEZ, J. A.; LÓPEZ EGÜES, S.; DIAZ TEOS, L. E. An improved alternative for chitosan beads cross-linking: a comparative adsorption study. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 131, 2014.

FERNANDES, R. S.; MOURA, M. R.; GLENN, G. M.; AOUADA, F. A. Thermal, microstructural, and spectroscopic analysis of Ca^{2+} alginate/clay nanocomposite hydrogel beads. *Journal of Molecular Liquids*, v. 273, p. 327–336, 2018.

FOSTER, Allan; ROBERTO, Samanta Souza; IGARI, Alexandre Toshiro. Economia circular e resíduos sólidos: uma revisão sistemática sobre a eficiência ambiental e econômica. In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE (ENGEMA), 2016, São Paulo. Anais... São Paulo: ENGEMA, 2016. ISSN: 2359-1048

JONES, B. E. H.; HAYNES, R. J. Bauxite processing residue: a critical review of its formation, properties, storage and revegetation. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v. 41, n. 3, p. 271-315, 2011.

WANG, Mengfan; LIU, Xiaoming. Applications of red mud as an environmental remediation material: A review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 408, p. 124420, 2021.

DESIGN AND APPLICATION OF A UVC-LED PHOTOREACTOR FOR THE DEGRADATION OF ORGANIC COMPOUNDS BY ADVANCED OXIDATION PROCESSES (AOP)

1 EderKevinArangoEscalante, 2 FabianoBanhi, 3 RenatoFalcãoDantas,4 EneltonFagnani
1 Unicamp, e254319@dac.unicamp.br; 2 VeRSisTecnologiaLtda,fabiano.banhi@versis.com.br; 3 Unicamp, renatofalcaod@ft.unicamp.br... , 4 Unicamp,enelton@ft.unicamp.br;

Keywords: Minamata Convention on Mercury; photoperoxidation; wastewater treatment.

Introduction

Water is an essential resource for all forms of life and has been fundamental to the development of civilization. However, rapid population growth reveals accessibility issues in terms of water potability, as well as the discharge of increasingly complex effluents. At the same time, the climate crisis is altering the hydrological cycle, leading to unfeasible water continuity effects, which force prioritization of water for human consumption. This measure, in turn, impacts the availability of water for irrigation, highlighting the vulnerability of populations reliant on subsistence agriculture (Vatanpour et al., 2026).

Today, significant concentrations of potentially toxic substances have been released into the environment, with a focus on contaminants of emerging concern (CECs), which are resistant to conventional wastewater treatment plants (WWTPs). For these reasons, various technologies are dedicated to sanitizing wastewater with the aim of recovering these resources through environmentally friendly approaches (Zhang et al., 2026). Advanced oxidation processes (AOPs) are considered a significant advancement, capable of rapidly destroying many types of contaminants due to their fast reaction rates and mineralization. In situ degradation of organic compounds is possible through activation methods and the generation of highly oxidizing species (Rakhi et al., 2024), with an emphasis on light-driven processes such as photoperoxidation (UVC/H_2O_2). Germicidal lamps are considered an excellent source of UV radiation for degrading toxic elements. However, they pose health and environmental risks due to the release of mercury after their lifespan. The Minamata Convention, to which Brazil is a signatory, recommends restrictions on mercury use (Zhao et al., 2024).

Therefore, there is a demand for new engineering of UVC-LED photoreactors. This shift is driven by their numerous benefits, most notably their eco-friendly nature, versatility, ease of application, simplified operation, compact design, and low energy consumption. These advantages form the foundation for the development and objectives of this research.

Methylene blue dye ($C_{16}H_{18}ClN_3S$) is an aromatic and heterocyclic organic compound, cationic, with a molecular weight of 319.85 g/mol. Its structure, detailed in Figure 1, belongs to the phenothiazine group. This basic, water-soluble dye is widely used in various sectors such as textile dyeing, paper manufacturing, paint production, and staining cells, tissues, and food (Lwin & Yarovaya, 2024). Due to its non-biodegradability properties, it is ideal as a model contaminant for simulating wastewater and is used to test effectiveness in photoreactors (Chen et al., 2022; Nunes et al., 2021; Malvestiti et al., 2021; Fagnani et al., 2013).

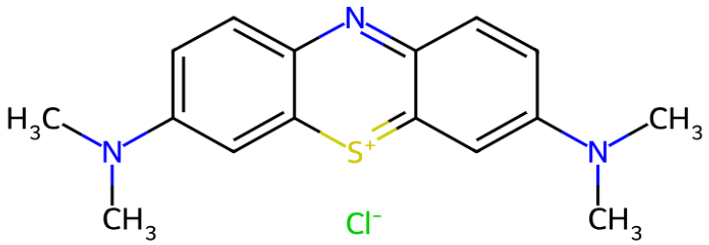


Figure 1: Chemical structure of the studied methylene blue.

Future results will enable the development of improved photoreactors, addressing practical solutions for wastewater treatment, especially concerning the return of water in favorable conditions and its subsequent reuse.

Materials and methods

Chemicals

Methylene blue (16.73 mg/L), hydrogen peroxide (H_2O_2) 30% solution.

UV-C LED Photoreactor

For the study system, a photoreactor with a 400 mL cylindrical structure, manufactured in partnership with Versis Tecnologia Ltda., was used. This photoreactor has an emission band in the UVC region and is constructed with versatile quartz material, with a nominal electric power of 90 mW. The system can be configured to operate with three, six, or nine UVC LEDs. To prevent overheating, the system is equipped with heat sinks.

Experimental Procedure

The experimental protocol is shown in Figure 2. Methylene blue (MB) was added under intense mixing provided by a magnetic stirrer. In the next step, H_2O_2 was added, and the LEDs were activated to initiate the photochemical process. Monitoring was performed every 15 minutes for up to 90 minutes, with the withdrawal of 3 mL aliquots for UV–Vis spectrophotometric scanning and measurements at 665 nm for quantification.

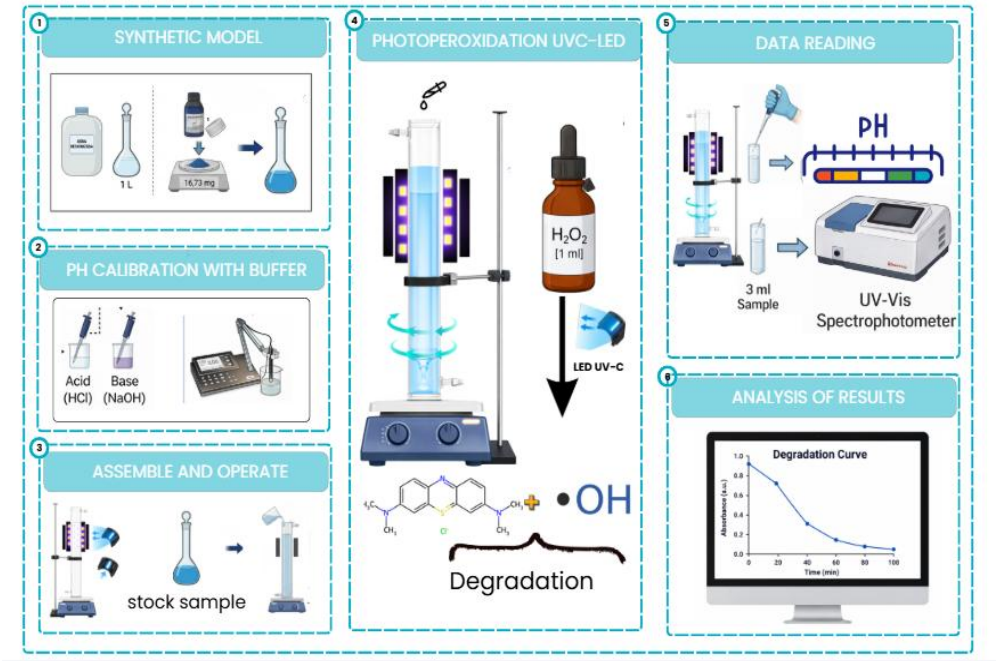


Figure 2: Experimental procedure.

Analytical Methods:

Analytical curve of MB was prepared and monitored using the spectrophotometric method. The samples were analyzed in the visible absorbance region, with a scanning range from 200 to 750 nm. The region that allows the visualization of absorbance is at 665 nm. The equipment used was from the Environmental Chemistry Laboratory at Unicamp

Results and discussion

Degradation Spectra of Methylene Blue

Figure 3 shows the results of the degradation of the model contaminant methylene blue, which occurred through the interaction between the light emitted by the LEDs and hydrogen peroxide.

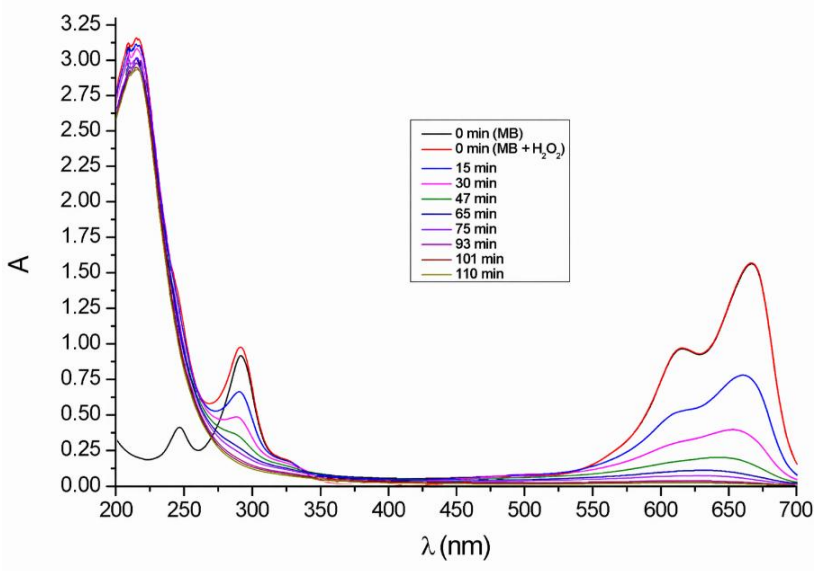


Figure 3: Methylene blue degradation spectrum.

In the kinetic curves, recorded at 15-minute intervals, it can be seen that the main phase change occurs starting with the first sampling. The black dots represent the experimental data within the kinetic curve. Overall, these results show the concentration of methylene blue.

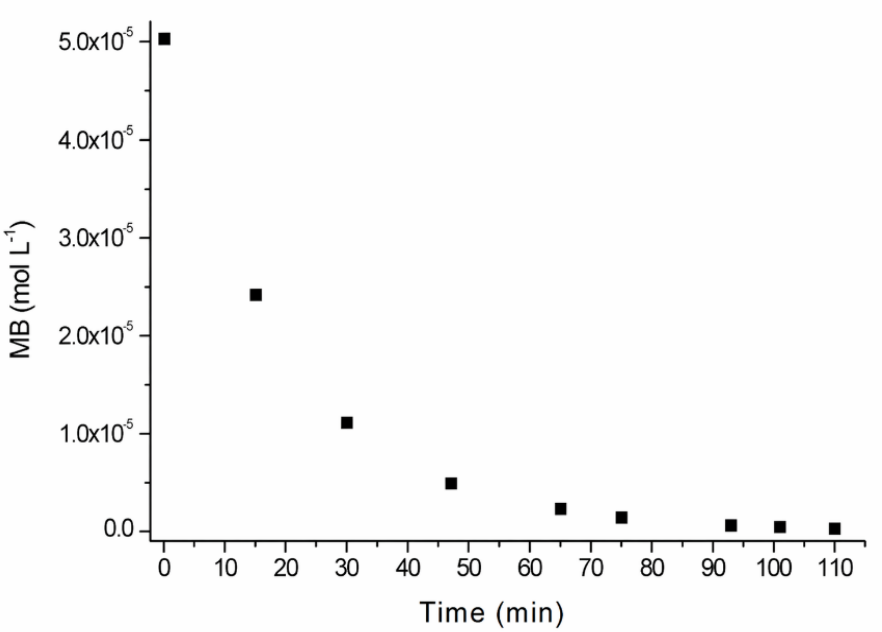


Figure 4: Decrease in molar concentration of methylene blue as a function of irradiation time.

There are several factors that can influence the kinetics of advanced oxidation processes (AOPs), with the number of LEDs being a key determinant of the photoreactor's performance. A smaller number of light sources results in lower irradiance and a less uniform distribution of radiation across the contaminant, as shown in Figure 5. In this graph, the blue line (3 LEDs) shows the slowest degradation, reaching a normalized concentration (Cf/C_0) of only about 0.1 after 105 minutes. In contrast, when using 6 LEDs (red line), a notable increase in reaction rate is observed. Finally, the best performance is achieved with 9 LEDs (black line), where the oxidative process occurs at the fastest rate, achieving virtually complete degradation of methylene blue before 75 minutes. These results confirm that the availability of photons promotes greater radical formation, causing the rate constants to increase proportionally with the number of LED units used.

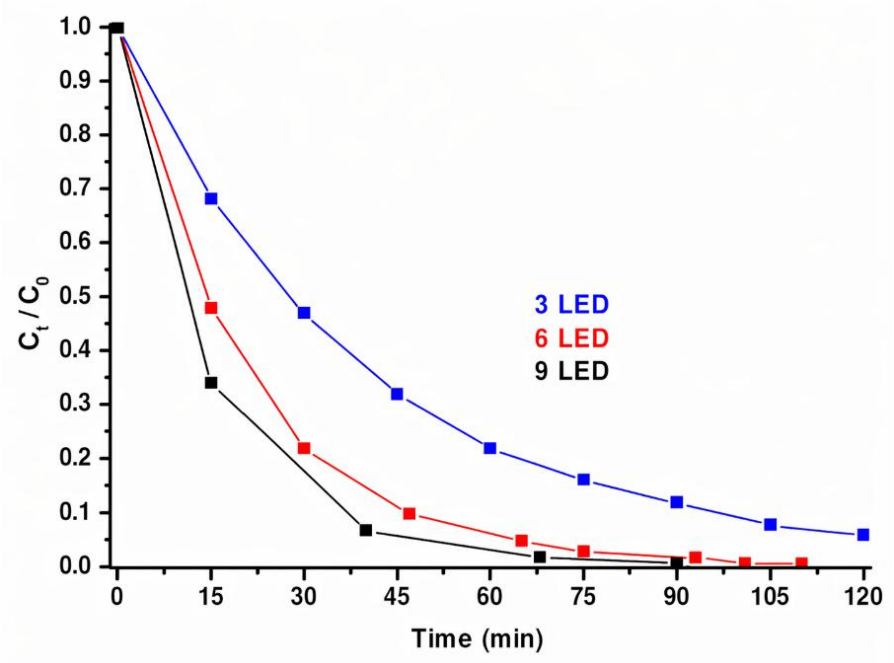


Figure 5: Comparison between the degradation rates of methylene blue, using normalized concentration (Cf/C_0) as a function of time, varying the number of UV LEDs.

Conclusions

The application of the reactor module using UV-C LED induction demonstrates the degradation of the molecular model, evidenced by a change in color. This suggests that it is suitable for degrading real effluents as a substitute for mercury-based systems.

Acknowledgements

GOTAS researchgroup, CAPES (Financial code 001) FAPESP N° 2024/23386-6; VeRSis Technology Ltda, PPGT FT UNICAMP.

References

ATANPOUR, Vahid et al. Integration of advanced oxidation processes (AOPs) and membrane bioreactors (MBRs) for wastewater treatment: a review. Separation and Purification Technology, p. 137411, 2026.

CHEN, M.; SHEN, Y.; XU, L.; XIANG, G.; NI, Z. Methylene blue dye: toxicity and potential elimination technology from wastewater. Results in Engineering, v. 16, p. 100678, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100678
.

FAGNANI, E.; GUADAGNINI, R. A.; SILVA, G. A.; GUIMARÃES, J. R. Degradação de cafeína e azul de metileno por processos oxidativos avançados (POA). Holos Environment, v. 13, n. 1, p. 85–97, 2013. DOI: https://doi.org/10.14295/holos.v13i1.5775

LWIN, H. M.; YAROVAYA, O. V. Photocatalytic degradation of methylene blue dye using H_2O_2 on ceramic membrane supported by vanadium-containing layer. In: Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, Part F3514, 2024, p. 203–215. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-64423-8_18

MALVESTITI, J. A.; FAGNANI, E.; SIMÃO, D.; DANTAS, R. F. Optimization of UV/H_2O_2 ozone wastewater treatment by the experimental design methodology. Environmental Technology, v. 40, n. 15, p. 1910–1922, 2019. DOI: https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1432698

NUNES, W. B.; DANTAS, R. F.; FAGNANI, E. Ferroin in dyes degradation by Fenton-like process: a chemical waste recycling perspective. Water Science & Technology, v. 84, n. 5, p. 1217–1227, 2021. DOI: https://doi.org/10.2166/wst.2021.311

RAKHI, P. K.; MISHRA, K.; SCARIA, J.; SURESH KUMAR, M.; NIDHEESH, P. V. Advanced oxidation processes. In: Advances in Science, Technology and Innovation, Part F2460, 2024, p. 107–116. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-48228-1_8

ZHANG, Ming et al. Advanced oxidation processes of persulfate coupled with sequencing batch reactor activated sludge process (AOPs-SBR): biodegradability and toxicity analysis of degradation intermediates. Separation and Purification Technology, v. 354, p. 128921, 2025.

ZHAO, Min et al. Kinetic modeling and mechanisms of para-halogenated phenols degradation by UV222/H_2O_2. Journal of Cleaner Production, v. 434, p. 140255, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140255.

INCORPORAÇÃO DE ÁCIDO FOSFÓRICO PARA A PREPARAÇÃO DE FILMES DE COBERTURA BIODEGRADÁVEIS

1 Rutten Kécio Soares de Brito Porto, 2 Maria Clara Galdino de Souza, 3 Thayuane Sthefani Silvestre Leão, 4 Nathaly Nascentes de Almeida, 5 Paulo Cesar de Almeida Luz e 6 Camila Silva Brey Gil

1 Universidade Federal de Lavras (UFLA), e-mail: rutten.porto@estudante.ufla.br; 2 Universidade Federal de Lavras (UFLA), e-mail: galdinodesouzamariaclara74@gmail.com; 3 Universidade Federal de Lavras (UFLA), e-mail: thayuane.leao1@estudante.ufla.br; 4 Universidade Federal de Lavras (UFLA), e-mail: nathaly.almeida@estudante.ufla.br; 5 Universidade Federal de Lavras (UFLA), e-mail: paulo.luz1@estudante.ufla.br e 6 Universidade Federal de Lavras (UFLA), e-mail: camila.breygil@ufla.br

Palavras-chave: Biodegradação; Acetato de celulose; Filmes mulching.

Introdução

A agricultura moderna enfrenta o desafio de aumentar a produtividade de forma sustentável, reduzindo os impactos ambientais associados ao uso intensivo de insumos e materiais não renováveis. A utilização de filmes mulching na agricultura constitui uma prática amplamente consolidada devido à sua elevada eficiência no manejo do solo e na otimização do desenvolvimento das culturas (Ramos et al., 2024). O filme de *mulching* é uma cobertura usada para proteger o solo, conservar a umidade e reduzir o uso de água, herbicidas e fertilizantes (Huang et al., 2024). Entretanto, a maior parte desses materiais é produzida a partir de polímeros convencionais, principalmente polietileno, que apresentam baixa capacidade de degradação no ambiente (Hayes, 2021). Consequentemente, os resíduos desses filmes persistem no solo por longos períodos, acumulando-se nas áreas de cultivo e alterando suas propriedades físicas, químicas e biológicas, resultando em impactos ambientais (Xu et al., 2026).

Diante dessas limitações, torna-se necessário o desenvolvimento de alternativas biodegradáveis capazes de oferecer os mesmos benefícios agronômicos dos filmes tradicionais, mas que apresentem maior capacidade de degradação. Nesse contexto, polímeros biodegradáveis surgem como alternativas promissoras para substituir os filmes plásticos convencionais, uma vez que podem ser degradados no ambiente, reduzindo os impactos ambientais e a necessidade de remoção do material do campo (Venachi et al.,2026). Além disso, a incorporação de cargas ou aditivos naturais a essas matrizes poliméricas pode conferir funcionalidades adicionais aos materiais, ampliando seu potencial de aplicação na agricultura sustentável (Fayyazbakhsh et al., 2025). Paralelamente, o acetato de celulose destaca-se por sua origem renovável, apresentando boa processabilidade, transparência, propriedades mecânicas adequadas e potencial de biodegradação em condições ambientais controladas (Tan et al., 2023). Dessa forma, a incorporação de compostos de interesse agrícola em matrizes poliméricas-biodegradáveis, como o acetato de celulose, representa uma abordagem inovadora para o desenvolvimento de sistemas multifuncionais.

A utilização de filmes poliméricos capazes de atuar simultaneamente como *mulching* e fonte controlada de agentes ativos, como nutrientes, pode contribuir para o aumento da eficiência do uso de fertilizantes, reduzindo perdas por lixiviação e promovendo uma nutrição mais eficiente das culturas. O fósforo por exemplo, é um macronutriente essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, participando de processos metabólicos fundamentais, como a transferência de energia, a fotossíntese e a formação de ácidos nucleicos (Paz-ares et al., 2022). Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver e caracterizar filmes de acetato de celulose incorporados com ácido fosfórico, visando sua aplicação como *mulching* agrícola e sua potencial atuação como fonte de fósforo.

Material e Métodos

O experimento foi conduzido na Universidade Federal de Lavras (UFLA) no Laboratório de Processos de Materiais. Os filmes biodegradáveis para aplicação como *mulching* agrícola foram produzidos pelo método de *casting*, utilizando acetato de celulose como matriz polimérica, sob diferentes composições (100, 98, 95, 92 e 90% m/m), dissolvido em acetona (40 mL) sob agitação magnética. Diferentes concentrações de ácido fosfórico (0, 2, 5, 8 e 10% m/m) foram incorporadas às formulações (Tabela 1).

Após completa homogeneização, as soluções foram vertidas em placas de petri com diâmetros de 15 cm e mantidas em temperatura ambiente para evaporação do solvente e formação dos filmes. Posteriormente, os materiais foram removidos e cortados em dimensões padronizadas (10 × 1 cm) para as análises.

A caracterização mecânica foi realizada por ensaios de tração, enquanto as propriedades térmicas foram avaliadas por análise termogravimétrica (TGA). Os ensaios de permeabilidade ao vapor de água (WVP) foram determinados conforme a ASTM E96, utilizando células com sílica gel e ambiente com umidade controlada. A variação de massa foi empregada para o cálculo da WVP ($g \cdot mm/Pa \cdot dia \cdot m^2$).

A biodegradação foi avaliada por meio do ensaio de degradação em solo, no qual as amostras foram inicialmente secas, pesadas e posteriormente enterradas por 65 dias. Após esse período, os filmes foram retirados, limpos, secos e novamente pesados, sendo a perda de massa e o aspecto visual utilizados como indicadores de degradação. Os dados foram submetidos à análise estatística ($P < 0,05$) utilizando o *software* PAST (Hammer; Harper; Ryan, 2001).

Resultados e Discussão

Ensaios de Tração

Os ensaios de tração (Tabela 2) indicaram que a incorporação de ácido fosfórico aos filmes de acetato de celulose resultou em redução da resistência mecânica, para teores acima de 2 % m/m. Resultados semelhantes foram observados por Ranjan et al. (2026), que a incorporação de aditivos em matrizes de acetato de celulose reduz sistematicamente a resistência mecânica para a faixa de 10-35 MPa, visando o ganho de ductilidade. No entanto, não foram observadas alterações significativas na capacidade de deformação dos filmes, evidenciando a manutenção da ductilidade do material, independentemente da concentração do aditivo. Segundo Zhou et al. (2024), o aditivo altera a resistência máxima, porém sem comprometer a viabilidade de manuseio e a flexibilidade necessária para a aplicação do filme. Os filmes T1 e T2 apresentaram maior resistência, comparando com os demais tratamentos.

Tabela 2: Resultados do ensaio de tração.

Tratamentos	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)
T1	46,1 ± 7,5 a	5,1 ± 1,4 a
T2	38,7 ± 5,1 a	7,0 ± 2,1 a
T3	25,3 ± 5,2 b	6,3 ± 1,3 a
T4	28,2 ± 9,0 b	4,6 ± 2,0 a
T5	10,8 ± 1,5 c	8,3 ± 3,6 a

*** Letras iguais na coluna, não difere estatisticamente entre si (p<0,05).**

Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise térmica (Figura 1) demonstrou que a adição de ácido fosfórico promoveu a redução da estabilidade térmica dos filmes. Apesar disso, as temperaturas de degradação permaneceram superiores à faixa de temperatura prevista para a aplicação agrícola, indicando que os filmes não apresentam degradação térmica nas condições de uso esperadas. Zhang et al. (2022) relataram que modificações químicas na matriz polimérica podem alterar os mecanismos de degradação, aumentando a suscetibilidade das cadeias, reduzindo a estabilidade térmica, sem inviabilizar a aplicação dos filmes em condições de campo.

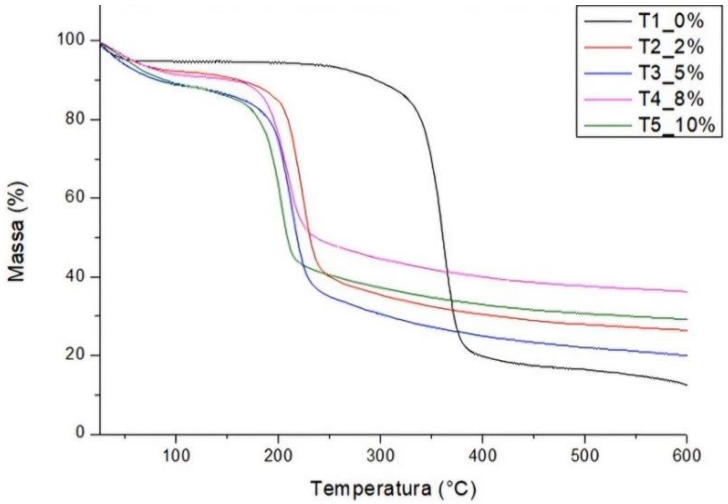


Figura 1: Gráfico de análise térmica.
Fonte: Autor (2026)

Permeabilidade e Biodegradação

Os ensaios de permeabilidade ao vapor de água (WVP), apresentados na Tabela 3, revelaram que os filmes biodegradáveis apresentaram valores de WVP superiores ao do filme comercial. O filme comercial apresentou valor de (1,23 ± 0,16) × 10^{-4} g·mm/Pa·dia·m², enquanto os filmes de acetato de celulose, com e sem ácido fosfórico, apresentaram valores da ordem de 10^{-3} g·mm/Pa·dia·m². Este comportamento é coerente com o que vem sendo observado na literatura, onde filmes biodegradáveis apresentam maior permeabilidades que filmes convencionais como os de polietileno (Rezende et al., 2025; Gadaleta et al., 2023). Não foram observadas diferenças significativas entre as formulações contendo diferentes concentrações de ácido fosfórico.

Tabela 3: Resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de água e ensaios biodegradação.

Amostra	WVP (g.mm/pa.dia.m^2)	% perda de massa após 65 dias
Filme comercial	(1,23 ± 0,16) X 10^{-4} a	-
T1	(5,16 ± 0,10) X 10^{-3} b	5,4 ± 2,5 a
T2	(4,76 ± 0,57) X 10^{-3} b	32,1 ± 9,2 b
T3	(4,88 ± 0,42) X 10^{-3} b	29,1 ± 14,7 b
T4	(4,11 ± 0,25) X 10^{-3} b	33,7 ± 6,2 b
T5	(4,58 ± 0,55) X 10^{-3} b	39,8 ± 5,4 b

*** Letras iguais na coluna, não difere estatisticamente entre si (p<0,05).**

Os resultados do ensaio de degradação dos filmes, apresentados na Tabela 3, evidenciam que, após 65 dias de ensaio, todos os filmes contendo ácido fosfórico passaram a apresentar valores de perda de massa estatisticamente semelhantes, indicando que, nesse ponto, a quantidade de ácido adicionado não resultou em diferenças significativas na biodegradação. Esse comportamento pode ser explicado pela lixiviação do ácido ao longo do tempo, reduzindo sua atuação catalítica no processo (Gadaleta et al., 2023). Ainda assim, todos os tratamentos com ácido mantiveram maiores índices de degradação quando comparados ao filme sem ácido (T1), que continuou estatisticamente distinto dos demais, evidenciando que a presença do ácido favorece a biodegradação. Esse efeito está associado à desacetilação química da matriz, que reduz o grau de substituição e aumenta a suscetibilidade ao ataque microbiano (Yamashita; Endo, 2005; Prabhaharan et al., 2024). Além da perda de massa, o potencial de biodegradação dos filmes pôde ser observado através do seu aspecto visual (Figura 2B). Visualmente, os filmes degradados (Figura 2B) apresentaram coloração amarelada e manchas escuras em comparação aos filmes iniciais (Figura 2A), indicando degradação superficial típica da ação microbiana em solo, conforme observado em estudos recentes com materiais à base de acetato de celulose (Mušič et al., 2023). Os filmes sem ácido fosfórico permaneceram com o aspecto visual inalterado.

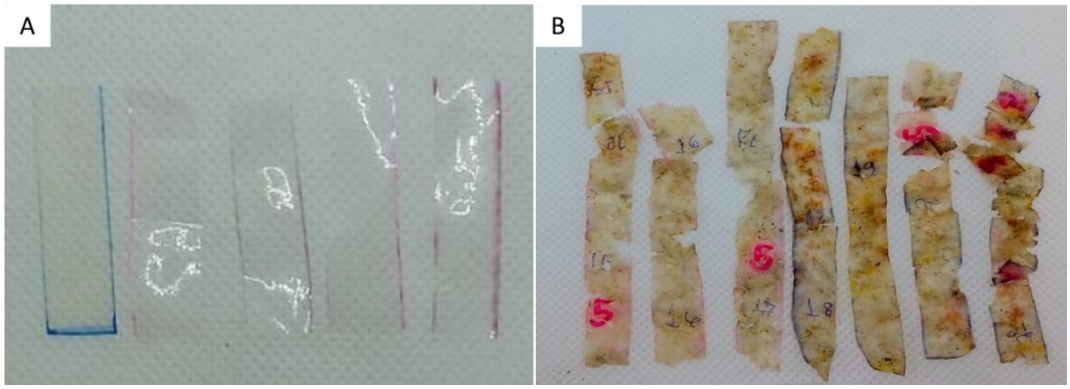


Figura 2. Aspectos visuais dos filmes (A) antes do processo de degradação e (B) após 65 enterrados no solo.
Fonte: Autor (2026)

Considerações Finais

A incorporação de ácido fosfórico reduziu a resistência mecânica e a estabilidade térmica dos filmes, porém sem comprometer a ductilidade e a viabilidade de uso em campo. Além disso, a influência positiva do aditivo na biodegradação do acetato de celulose posiciona esses materiais como uma alternativa sustentável e eficaz para mitigar a poluição por microplásticos no ambiente agrícola.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer à FAPEMIG, Capes, CNPq e à Universidade Federal de Lavras pelo apoio recebido.

Referências

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E96/E96M-16: Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.

FAYYAZBAKHSH, A. et al. Eco-friendly additives for biodegradable polyesters: recent progress in performance optimization and environmental impact reduction. ***Sustainable Materials and Technologies***, v. 44, e01395, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01395

GADALETA, G.; DE GISI, S.; CHONG, Z. K.; et al. Degradation of thermoplastic cellulose acetate-based bioplastics by full-scale experimentation of industrial anaerobic digestion and composting. ***Chemical Engineering Journal***, v. 462, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142301

HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. **Palaeontologia Electronica**, v. 4, n. 1, p. 1–9, 2001.

HAYES, D. G. Enhanced end-of-life performance for biodegradable plastic mulch films through improving standards and addressing research gaps. ***Current Opinion in Chemical Engineering***, v. 33, p. 100695, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100695

HUANG, T. T. et al. Effects of plastic film mulching on yield, water use efficiency, and nitrogen use efficiency of different crops in China: a meta-analysis. ***Field Crops Research***, v. 312, p. 109407, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109407

MUŠIČ, S. et al. Environmental degradation of cellulose acetate materials: surface and structural changes. ***Polymers***, v. 15, n. 12, p. 2751, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/polym15122751

PAZ-ARES, J. et al. Plant adaptation to low phosphorus availability: core signaling, crosstalks, and applied implications. ***Molecular Plant***, v. 15, n. 1, p. 104–124, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.12.005

RAMOS, T. B.; DAROUICH, H; PEREIRA, L. S. Mulching effects on soil evaporation, crop evapotranspiration and crop coefficients: a review aimed at improved irrigation management. ***Irrigation Science***, v. 42, n. 3, p. 525–539, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s00271-024-00924-8

RANJAN, R; KANT, C; DHAR, P. Multifunctional cellulose phosphate-based food packaging films from biomass: structure–function relationship and environmental assessment studies. ***Sustainable Food Technology***, [S.l.], v. 4, p. 646–660, 2026. DOI: https://doi.org/10.1039/D5FB00355E

REZENDE, G. M. et al. Citronella Oil Incorporated into Active Mulching Films for Insect Control in Strawberry Crop. ***ACS Agricultural Science & Technology***, v. 5, p. 2166–2175, 2025. DOI: https://doi.org/10.1021/acsagscitech.5c00451
TAN, J. et al. Degradation characteristics of cellulose acetate in different aqueous conditions. ***Polymers***, v. 15, n. 23, p. 4505, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/polym15234505

VENACHI, N. et al. Review on aging of biodegradable polymers: experimentais approaches and emerging role of machine and deep learning. ***Journal of Polymers and the Environment***, v. 34, p. 58, 2026. DOI: https://doi.org/10.1007/s10924-025-03761-8

XU, T. et al. Long-term plastic mulching exacerbates the co-limitation of carbon and phosphorus in farmland by altering physicochemical properties and microbial interactions. ***Frontiers in Microbiology***, v. 16, p. 1694370, 2026. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1694370

YAMASHITA, Yoichiro; ENDO, Takeshi. Biodegradation behavior of acid-containing cellulose acetate film in soil. ***Journal of Applied Polymer Science***, v. 98, p. 466–473, 2005. DOI: https://doi.org/10.1002/app.21998

ZHANG, Z.; CAO, H.; QUAN, Y.; MA, R.; PENTZER, E. B.; GREEN, M. J.; WANG, Q. Thermal stability and flammability studies of MXene–organic hybrid polystyrene nanocomposites. ***Polymers***, v. 14, n. 6, p. 1213, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/polym14061213

ZHOU, Y. et al. Developing high performance biodegradable film based on crosslinking of cellulose acetate and tannin using caprolactone. ***International Journal of Biological Macromolecules***, v. 262, p. 130067, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130067.

APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE VINÍCOLAS PARA PRODUÇÃO DE NANOBIOCARVÃO APLICADO APLICAÇÃO NA REMOÇÃO DE PB(II) EM SOLUÇÃO AQUOSA

1 Gustavo Henrique Guimarães Coutinho, 2 Samir Hipólito dos Santos, 3 Honnara Santos Granja, 4 José Antônio Nascimento Melo, 5 Cícero Inácio da Silva Filho, 6 Silvânio Silvério Lopes da Costa, 7 Carlos Alexandre Borges Garcia, 8 Adnívia Santos Costa Monteiro

1 Universidade Federal de Sergipe - UFS, e-mail: gustavo.henr2003@gmail.com; 2 Universidade Federal de Sergipe - UFS, e-mail: samirhipolito@gmail.com; 3 Universidade Federal de Sergipe - UFS, e-mail: ghonnara@gmail.com; 4 Universidade Federal de Sergipe - UFS, e-mail: Janto.quimica@gmail.com; 5 Universidade Federal de Sergipe - UFS, e-mail: silva.cicero.filho@gmail.com; 6 Universidade Federal de Sergipe - UFS, e-mail: silvanioslc@gmail.com; 7 Universidade Federal de Sergipe - UFS, e-mail: carlosabgarcia@gmail.com; 8 Universidade Federal de Sergipe - UFS, e-mail: adnivia@academico.ufs.br

Palavras-chave: Adsorção; Chumbo; Economia Circular

Introdução

A contaminação hídrica por metais potencialmente tóxicos (MPTs) é um desafio crítico devido à persistência, bioacumulação e toxicidade desses elementos. Diante da intensificação industrial, surge o desenvolvimento de tecnologias de remediação sustentáveis alinhadas à bioeconomia circular e aos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS). Entre as estratégias emergentes, destaca-se o uso do nanobiocarvão, um material carbonáceo obtido por meio da pirólise de biomassa seguida de moagem em moinho de bolas (ELBEHIRY et al., 2022). Devido à sua estrutura porosa e à presença de grupos funcionais superficiais, tais como carboxilas, hidroxilas e fenóis, o nanobiocarvão apresenta elevada capacidade de adsorção de íons metálicos em solução aquosa (XU et al., 2013). Além disso, o aproveitamento de resíduos agrícolas, como sementes de uva, na produção desse material agrega valor a subprodutos abundantes e subutilizados, contribuindo para a mitigação de impactos ambientais. Estima-se que esses resíduos representam cerca de 60% do total processado, correspondendo a aproximadamente 160 mil toneladas (CHEN et al., 2020; GRANJA et al., 2025).

O objetivo principal deste estudo foi produzir nanobiocarvão a partir da biomassa de semente de uva, por meio da moagem em moinho de bolas do biocarvão previamente obtido por pirólise a 350°C e 400 °C por 60 minutos, visando compreender as possíveis alterações em suas propriedades físico-químicas decorrentes do processo de moagem, bem como seu desempenho na remoção de Pb(II) em solução aquosa.

Metodologia

Produção do nanobiocarvão

Os materiais foram preparados de acordo com o descrito no fluxograma abaixo:

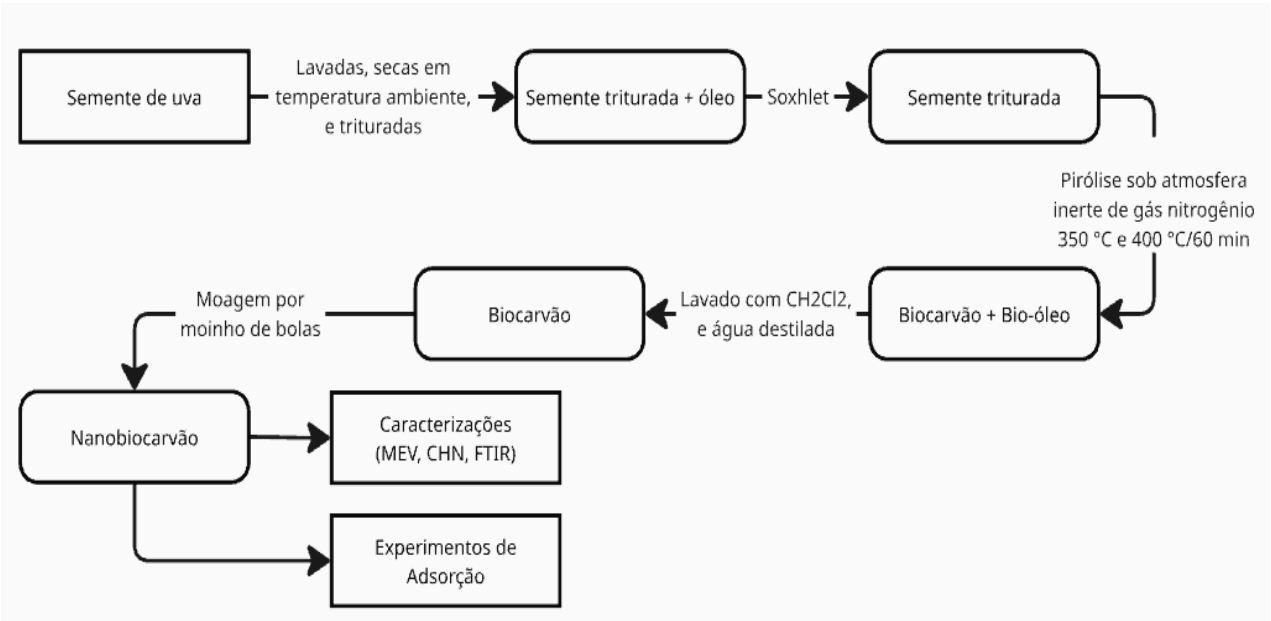


Figura 1: Fluxograma de preparo e obtenção de nanobiocarvão a partir das sementes de uva.

Análise elementar (CHN)

A composição elementar dos biocarvões após a moagem, nomeados de NBSU350 e NBSU400, foi determinada no equipamento CHN628, no Centro de Laboratórios de Química Multiusuários (CLQM) da Universidade Federal de Sergipe (UFS), conduzidas sob atmosfera de hélio (99,995%) e oxigênio (99,99%), empregando temperaturas de 950 °C no forno primário e 850 °C no after burner. A calibração do equipamento foi realizada com padrão de EDTA (41,0% C, 5,5% H e 9,5% N) considerando massas na faixa de 10 a 200 mg. Para cada determinação, aproximadamente 50 mg de amostra foram analisados.

Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Os aspectos morfológicos dos biocarvões e nanobiocarvões foram observados por um microscópio eletrônico de varredura (MEV) com o acoplamento de Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia (EDS) da marca TESCAN, modelo VEGA 3 LMS. Instalado na UFS e disponibilizado pelo Laboratório de Microestruturas e Propriedades Mecânicas (LAMP). As amostras foram colocadas em porta amostra de alumínio sobre fita de carbono e metalizadas com uma camada fina de prata.

Análise de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

Os grupos funcionais presentes nos materiais foram investigados pela técnica de espectroscopia de infravermelho com transformada de *Fourier* (FTIR). As análises foram realizadas no espectrômetro da *Anton Paar Lyza* 7000, operando no modo de Refletância Total Atenuada (ATR) com cristal de diamante. Os espectros foram coletados diretamente sobre as amostras sólidas na faixa de 400 a 4000 cm^{-1}, utilizando uma resolução de 4 cm^{-1} e um acúmulo de 30 varreduras para a obtenção de sinais com boa relação sinal-ruído.

Ensaios de adsorção

Os experimentos foram executados acrescentando 0,2 g de NBSU350 e NBSU400 em 250 mL de solução de Pb^{2+} (3 mg L^{-1}) preparada a partir do padrão *Scharlau* (1000 mg L^{-1}) com pH ajustado de 3,5 e 5,0. As amostras foram agitadas a 175 rpm em uma incubadora de bancada refrigerada e coletadas em tempos específicos (0 a 1440 min), filtradas e analisadas por espectroscopia de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP OES). A capacidade de adsorção (Q) foi calculada a partir da Equação 1. (Zhang et al., 2012). O modelo de linguagem ChatGPT foi utilizado para a revisão gramatical e aprimoramento textual deste trabalho.

$$Q = \frac{C1-C2}{V} \quad \textbf{(1)}$$

Resultados

As micrografias adquiridas por MEV apresentadas na Figura 2 evidenciam que a moagem em moinho de bolas foi eficiente na modificação do biocarvão, corroborando com estudos anteriores que mostraram, que esse procedimento quebra os grãos do biocarvão em partículas ultrafinas (nanobiocarvão). Além de, aumentar a área superficial dos biocarvões com a redução do tamanho, a modificação morfológica aumenta significativamente o potencial de adsorção desse material. As amostras não moídas (A e B) apresentam estruturas mais organizadas e preservadas, com poros bem definidos, enquanto o nanobiocarvão (C e D) exibe morfologia mais fragmentada, com redução do tamanho de partícula e formação de agregados. Essas alterações foram mais evidentes nos biocarvões produzidos na temperatura mais elevada de NBSU400, o que pode ser atribuído à maior porosidade e fragilidade estrutural desses materiais, resultantes da liberação de compostos voláteis durante a pirólise, comportamento confirmado pela análise elementar (Figura 2E) que evidenciam aumento do teor de carbono e redução de hidrogênio e oxigênio, indicando maior grau de carbonização e aromatização da estrutura em comparação à biomassa original de semente de uva. Adicionalmente, verifica-se a diminuição dos teores de hidrogênio e oxigênio com o aumento da temperatura de pirólise (Keiluweit et al., 2010; Jin et al., 2020; Granja, 2024).

Por outro lado, os espectros de infravermelho (Figura 3) não evidenciaram alterações significativas nas posições ou intensidades das bandas após a moagem, indicando que os principais grupos funcionais da superfície foram preservados. As bandas observadas, atribuídas a grupos hidroxila (–OH) e estruturas aromáticas (C=C), sítios mais prováveis de ocorrer a ligação com espécies metálicas, mantiveram-se similares entre as amostras. Esses resultados sugerem que o processo de moagem promove predominantemente modificações físicas, sem alterações químicas relevantes na estrutura do material.

Os resultados da aplicação dos nanobiocarvões para a adsorção de Pb(II) em solução aquosa são apresentados na Figura 3. O nanobiocarvão apresentou elevada capacidade de adsorção de Pb(II), ($Qe \approx 4{,}4$ mg g^{-1}) com rápida cinética e equilíbrio atingido entre 300-500 minutos. O desempenho foi fortemente influenciado pelo pH e pela temperatura de pirólise, sendo observada maior eficiência em pH 3,5 em ambos os materiais NBSU300 e NBSU400. Esses resultados indicam que não é só a área superficial que importa, a química superficial e o tipo de interações entre o material e o metal são fundamentais para entender o processo de adsorção, e serão investigados nos próximos trabalhos.

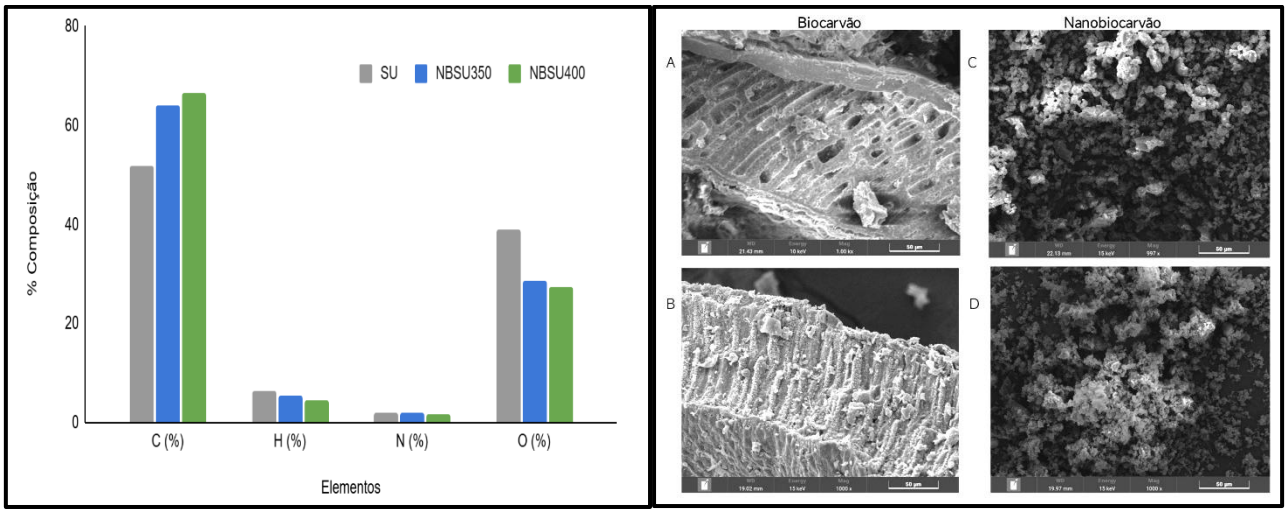


Figura 2: Micrografias das amostras antes da moagem BSU350 (A), BSU400 (B) e após a moagem NBSU350 (C) e NBSU400 (D), em magnificação de aproximadamente 1000 vezes e da composição elementar (Imagem E).

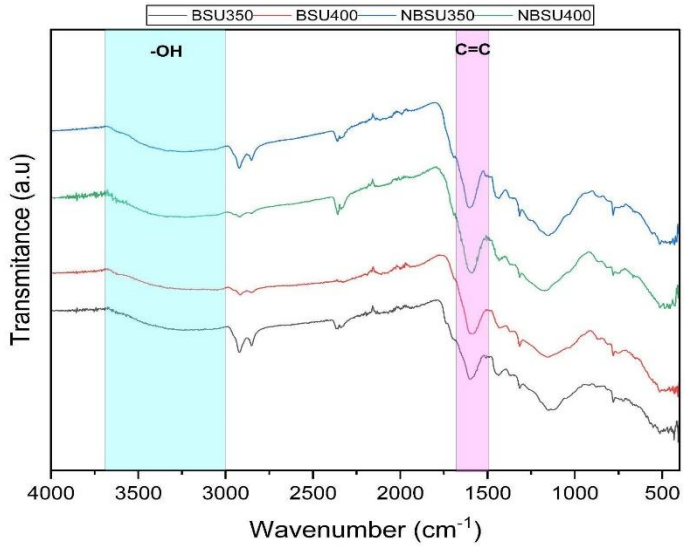


Figura 3: Espectro de absorção no infravermelho obtidos por FTIR das amostras de biocarvão (BSU350 e BSU400) e nanobiocarvão (NBSU350 e NBSU400).

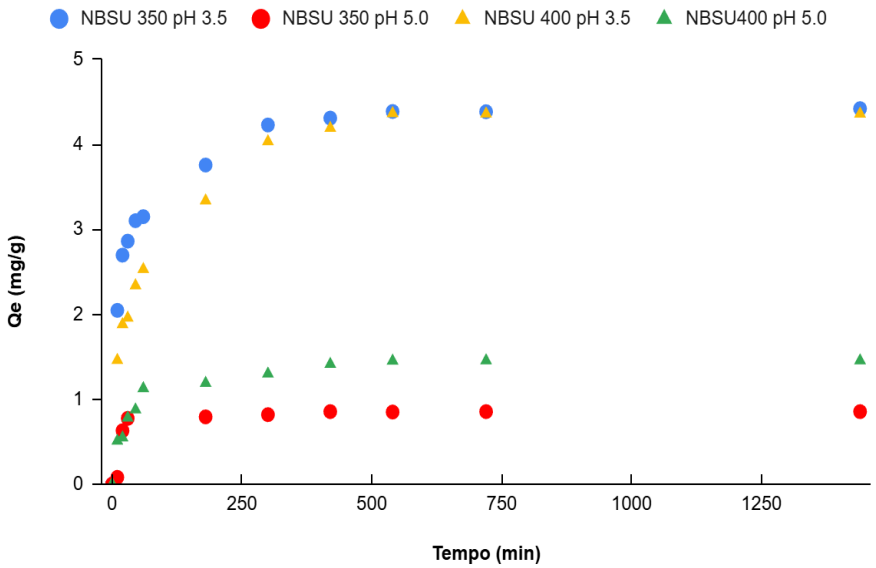


Figura 4: Cinética de adsorção de Pb(II) em função do tempo para nanobiocarvões obtidos a partir de sementes de uva pirolisadas a 350 °C e 400 °C, avaliados em pH 3,5 e 5,0.

Conclusão

O nanobiocarvão produzido a partir da moagem do biocarvão convencional apresentou elevada capacidade de adsorção e melhor desempenho em pH 3,5. A moagem promoveu principalmente modificações físicas, enquanto a temperatura de pirólise influenciou. Os resultados indicam que o nanobiocarvão de semente de uva é uma alternativa promissora para a remoção de metais potencialmente tóxicos, como o chumbo, em soluções aquosas. Além disso, também possui benefícios ambientais e socioeconômicos com o reaproveitamento de resíduos das vinícolas e o alinhamento aos ODS 6 (Água Potável e Saneamento) e 12 (Consumo e Produção Responsável).

Agradecimentos

Ao Centro de Laboratórios de Química Multiusuários (CLQM), ao Laboratório de Análises Cromatográficas (LAC), ao Laboratório de Corrosão e Nanotecnologia (LCNT/NUPEG) e ao Laboratório de Tecnologia e Monitoramento Ambiental (LTMA) da UFS, pelo suporte técnico, científico e pela disponibilização de toda a infraestrutura necessária para a realização dos experimentos e análises deste trabalho. Aos órgãos de fomento à pesquisa, CNPq, CAPES e FAPITEC/SE.

Referências Bibliográficas

CHEN, Y.; WANG, JIAYU; ZIXIN; XIAOQ, P.; XIAOFANG, X.; CHENG, P. (2020). “Effective Utilization of Food Wastes: Bioactivity of Grape Seed Extraction and Its Application in Food Industry”. Journal of Functional Foods, v. 73, pp. 104113.

ELBEHIRY, FATHY; DARWEESH, MARWA; AL-ANANY, FATHIA S.; KHALIFA, ASMAA M.; ALMASHAD, ALIAA A.; EL-RAMADY, HASSAN; EL-BANNA, ANTAR; RAJPUT, VISHNU D.; JATAV, HANUMAN SINGH; ELBASIOUNY, HEBA. (2022). “Using Biochar and Nanobiochar of Water Hyacinth and Black Tea Waste in Metals Removal from Aqueous Solutions”. Sustainability, v. 14, n. 16, pp. 10118.

GRANJA, HONNARA S.; SILVA, JONATAS DE OLIVEIRA S.; ANDRADE, YASMINE B.; FARRAPEIRA, RAFAEL O.; SUSSUCHI, ELIANA M.; FREITAS, LISIANE S. (2025). “Emerging Carbonaceous Material Based on Residual Grape Seed Applied in Selective and Sensitive Electrochemical Detection of Fenamiphos”. Talanta, v. 281, pp. 126784.

XU, Xiaoyun *et al.* Removal of Cu, Zn, and Cd from aqueous solutions by the dairy manure-derived biochar. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 20, n. 1, p. 358–368, jan. 2013.

Zhang, Peng, Bing Xue, Le Jiao, Xingying Meng, Lianying Zhang, Beixing Li, and Hongwen Sun. 2022. “Preparation of Ball-Milled Phosphorus-Loaded Biochar and Its Highly Effective Remediation for Cd- and Pb-Contaminated Alkaline Soil.” Science of The Total Environment 813 (March):152648.https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152648.

REVISÃO DA LITERATURA SOBRE O USO DE SOLVENTES VERDES EM MÉTODOS DE EXTRAÇÃO PARA ISOLAMENTO DE PESTICIDAS ORGANOFOSFORADOS EM ÁGUA

Caren Andreidy Matos Aroucha, Natilene Mesquita Brito, Rafaely Ximenes de Sousa Furtado e Fernanda Cassiano dos Santos Rodrigues.

Universidade Estadual do Maranhão-UEMA, e-mail:carenaroucha@gmail.com; Instituto Federal do Maranhão-IFMA, e-mail: natilene.brito@ifma.edu.br, Universidade Federal do Maranhão-UFMA, e-mail:rafaelyximenes@hotmail.com Universidade Estadual do Maranhão-UEMA, e-mail:fernanda.cassiano345@gmail.com

Palavras-chave: Matriz aquosa; química verde; solventes sustentáveis.

Introdução

De acordo com informações obtidas por meio da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), 97,5% da água disponível mundialmente é salgada, não sendo considerada adequada ao consumo direto ou para irrigação de plantas. Dos 2,5% de água doce, a maior parte encontra-se concentrada nas geleiras (69%) e águas subterrâneas (30%), restando, portanto, apenas 1% nos rios (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2022).

Além do problema relacionado à escassez de água doce, há a preocupação com sua qualidade. Isso porque, diariamente, uma quantidade significativa de compostos orgânicos atinge os corpos d'água causando sua contaminação. Essas substâncias são provenientes de resíduos de produtos de uso doméstico, industrial, farmacêutico, de cuidados pessoais e agrícolas, que, em geral, são persistentes no ambiente, bioacumuláveis e interferentes endócrinos (Saxena, 2025).

Os pesticidas, embora tenham contribuído significativamente para o aumento da produção agrícola, constituem um dos principais contaminantes dos corpos d'água. Isso ocorre porque podem atingir o ambiente aquático por meio de processos como lixiviação, escoamento superficial e descarte inadequado (Chen; Selvinsimpson, 2022). Os pesticidas podem ser classificados quanto à sua origem, natureza química e organismo-alvo, abrangendo diferentes classes como organofosforados, carbamatos, piretróides e triazóis (Santos *et a*l., 2020). Nesse cenário, os pesticidas organofosforados merecem destaque devido à sua elevada toxicidade, associada principalmente à inibição da enzima acetilcolinesterase. Embora apresentem menor persistência ambiental em comparação a outras classes, sua ampla utilização favorece sua presença em matrizes aquáticas, representando riscos à saúde humana e aos organismos aquáticos (Kaur *et al*., 2023).

Diante disso, torna-se fundamental o aprimoramento de métodos analíticos capazes de detectar e quantificar esses contaminantes em níveis cada vez mais baixos (ng/L a µg/L), garantindo maior confiabilidade no monitoramento da qualidade da água. O preparo de amostras é uma das etapas mais importantes do desenvolvimento de um método analítico, pois consiste em isolar e concentrar os analitos presentes na matriz aquosa, minimizando interferências e aumentando a sensibilidade analítica (Amorim, 2019). Todavia, uma das principais preocupações atuais é que os métodos de preparo de amostras atendam os princípios da química verde sem impactar negativamente em aspectos importantes da metodologia como exatidão, precisão e sensibilidade (Santos *et al.,* 2024). Vale destacar que a Química Verde é um ramo da química analítica que leva em conta fatores que visam reduzir ou eliminar os efeitos negativos de poluentes, tanto nos reagentes quanto nos analitos, além de considerar o consumo de energia relacionado ao uso de instrumentos. Essa abordagem baseia-se em princípios que orientam a prática química com foco na qualidade de vida e na preservação ambiental (Prado, 2003).

Nesse contexto, diversos estudos têm empregado solventes considerados mais sustentáveis, como solventes eutéticos profundos (DES, do inglês, deep eutetic solvents) e líquidos iônicos no preparo de amostras. Os DES são de fácil obtenção e baixo custo, e, além disso, podem ser usados na análise de uma ampla gama de compostos (Li et al., 2018). Eles consistem em uma mistura de dois compostos, sendo que um deles é caracterizado como aceitador de ligação de hidrogênio (HBA, do inglês, hydrogen bond acceptor) e o outro como aceitador de ligação de hidrogênio (HBD, do inglês, hydrogen bond donor) (De Andrade; Monteiro; Merib, 2022). Os DES tem sido usado em diferentes métodos de extração para determinação de organofosforados em água de rio (Liu et al., 2022), água de chuva, lago e poço (Liu et al., 2015), água de torneira e de lago (Slominski et al., 2025) apresentando resultados satisfatórios. No que diz respeito aos líquidos iônicos, eles também têm sido usados para extrair organofosforados em água empregando diferentes técnicas de extração, conforme pode ser visto nos trabalhos desenvolvidos por He *et al.* (2009), Cacho *et al.* (2018) e Rashidi Nodeh *et al.* (2017).

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre o uso desses solventes verdes no preparo de amostras para a determinação de pesticidas organofosforados em água, visando evidenciar suas potencialidades, limitações e contribuições para o desenvolvimento de métodos analíticos mais sustentáveis.

Material e Métodos

Trata-se de uma revisão bibliográfica sistemática realizada nas bases de dados *Web of Science* e *Scopus*, focando na identificação e análise de métodos de extração de pesticidas organofosforados em matrizes aquosas. A escolha dessas plataformas justifica-se pela sua amplitude e rigor na indexação de publicações científicas de alto impacto, garantindo a qualidade e confiabilidade dos artigos selecionados. A estratégia de busca foi estruturada no uso de três descritores obrigatórios que deveriam

aparecer nos títulos dos artigos: "organophosphorus", "water" e "extraction", com o objetivo de refinar a busca, assegurando que os artigos recuperados tivessem enfoque direto na extração de compostos organofosforados de matrizes aquosas, evitando recuperações irrelevantes ou tangenciais ao tema principal. A seguir, conduziram-se buscas individualizadas no campo de tópicos (topic) das plataformas para cada uma das categorias de solventes investigadas, a saber: deep eutectic solvents, ionic liquids, methanol e acetonitrile, respectivamente. A escolha dessa abordagem permitiu mapear a ocorrência e distribuição de estudos para cada tipo de solvente, identificando tendências, lacunas e oportunidades de pesquisa no campo. O metanol e a acetonitrila foram incluídos na revisão como representantes dos solventes orgânicos convencionais amplamente usados em extração de pesticidas organofosforados. Essa inclusão permite uma análise comparativa entre as metodologias clássicas e as emergentes, fornecendo perspectivas sobre a evolução das práticas de extração, a eficiência relativa dos diferentes solventes, e a expansão no uso dos solventes verdes no contexto da extração dos pesticidas organofosforados em água.

Resultados e Discussão

A análise comparativa do número total de publicações indexadas no *Web of Science* e *Scopus* entre 1996 e 2026 (Figura 1) evidencia uma distribuição quantitativa distinta entre as metodologias de extração investigadas, refletindo não apenas a consolidação das técnicas, mas também as tendências de pesquisa no campo da análise de pesticidas organofosforados em matrizes aquosas. Os dados revelam uma predominância de estudos com ILs (21 publicações, *Web of Science*), seguido pelo metanol (12 publicações, *Web of Science*), acetonitrila (9 publicações, *Web of Science*) e DES (5 publicações, *Web of Science*).

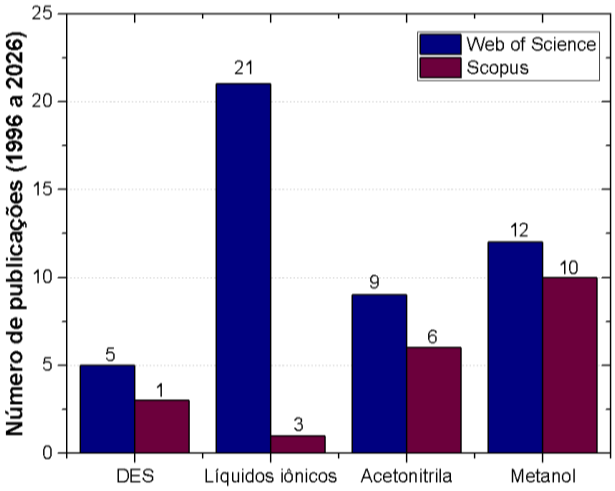


Figura 1 – Número de publicações total (1996 a 2026) indexadas no *Web of Science* e *Scopus* usando as palavras-chaves no título da busca: *Organophosphorus, water* e *extraction* e variando apenas o tipo de solvente extrator (solventes eutéticos profundos (DES), líquidos iônicos, acetonitrila e metanol).
Fonte: *Web of Science* e *Scopus* (1996 - 2026)

A prevalência de publicações envolvendo ILs em relação aos demais solventes estudados é particularmente significativa e reflete o fortalecimento desta tecnologia como ferramenta de escolha para extração de compostos organofosforados. Isso pode ser atribuído a versatilidade química dos ILs permitindo a extração de diferentes compostos químicos. Na Química Analítica, diversas técnicas de microextração têm sido adaptadas para uso com ILS, em particular, as técnicas de microextração líquido-líquido dispersiva (DLLME, do inglês, liquid dispersive liquid–liquid microextraction) (Cacho *et al*., 2018).

A quantidade relativamente baixa de publicações envolvendo DES, apenas 5 artigos no *Web of Science* e 1 no *Scopus*, constitui um achado promissor. Os DES, apesar de suas propriedades potencialmente atrativas (biodegradabilidade, síntese a partir de precursores naturais, toxicidade reduzida) (Slominski *et al*., 2025), ainda não alcançaram aplicação generalizada para extração de pesticidas organofosforados. É importante destacar que o DES, diferentemente dos ILs, só começou a chamar atenção da comunidade científica por volta dos anos de 2010, como pode ser visto na Figura 2b, enquanto os ILs têm sido estudados desde a década de 90 (Figura 2a). Outro fator que pode ter contribuído são as questões práticas como a viscosidade elevada de muitos DES dificultando processos de transferência de massa, e a necessidade de otimização da extração para cada classe de compostos alvo (Slominski *et al*., 2025).

O metanol (12 publicações, *Web of Science*) e a acetonitrila (9 publicações, *Web of Science*) continuam ocupando posições relevantes no panorama de extração de organofosforados, demonstrando que apesar do surgimento de alternativas verdes, os solventes orgânicos clássicos mantêm sua importância na prática analítica. Esta constatação não é surpreendente, pois estes solventes oferecem várias vantagens consolidadas: amplo histórico de uso, propriedades físico-químicas bem caracterizadas, compatibilidade garantida com instrumentação analítica padrão, custos relativamente reduzidos e disponibilidade comercial irrestrita.

Uma observação bastante relevante, e que pode ser vista na Figura 1, diz respeito às diferenças entre o número de publicações recuperadas no *Web of Science* versus *Scopus* para cada categoria de solvente. As discrepâncias mais pronunciadas

ocorrem em ILs (21 vs. 3), seguido por metanol (12 vs. 10) e DES (5 vs. 1). Estas diferenças refletem variações na cobertura de periódicos, indexação de artigos e critérios de relevância entre as duas plataformas. O predomínio do *Web of Science* em praticamente todas as categorias pode estar relacionado a critérios de qualidade mais rigorosos ou à maior cobertura de revistas de impacto elevado nesta plataforma, particularmente para trabalhos mais recentes em tópicos emergentes como química verde. Este aspecto metodológico reforça a importância de conduzir buscas em múltiplas plataformas simultaneamente, como realizado nesta revisão.

A Tabela 1 fornece uma perspectiva complementar aos dados bibliográficos obtidos na Figura 1, permitindo avaliar não apenas a frequência de investigação de cada tipo de solvente, mas também a eficácia prática das metodologias desenvolvidas.

Solventes	Tipo de matriz	Preparo da amostra	Detecção	Recuperação(%)	Limite de detecção	Autor
Solventes eutéticos profundos	águas subterrâneas	UA-LLME	GC-PFPD	70-94	0,01 µg/L	Fosu et al.; 2015
	águas superficiais	UA-LLME	GC-PFPD	80,93- 113,12	0,05-0,3 µg/L	Arviso, Jenessa ; 2024
Líquidos iônicos	águas residuais	AA-LLME	HPCL-UV	92-95	0,34-3,3µg/L	Jocic et al.;2024
	águas superficiais/ águas residuais	AA-LLME	GC-ECD	92-96	0,32-3,0µg/L	Shi et al.; 2016
Acetonitrila	águas superficiais	HF-LPME	HPCL-UV	90,-96,3	0,09-0,12µg/L	Perre; 2015
	águas residuais	HF-LPME	HPCL-UV	85,5-97,6	0,71-1,55µg/L	Celano et al.; 2014
Metanol	águas residuais	UA-LLME	HPCL-UV	83,5-98,0	0,16-0,81µg/L	Nguyen et al.;2025
	águas superficiais	HF-LPME	HPCL-UV	90-95,2	0,06-0,14µg/L	Habedank; 2020

Tabela 1 – Desempenho analítico de metodologias de extração de organofosforados em água: Análise comparativa de solventes eutéticos profundos, líquidos iônicos, acetonitrila e metanol.
Fonte: *Web of Science* e *Scopus* (1996 - 2026)

Conforme pode ser visto na Tabela 1, os DES possuem boa faixa de recuperação (70 a 110%), se destacando com os menores limites de detecção, dentre os resultados. Estes resultados são particularmente relevantes pois indicam que, apesar da representatividade limitada dos DES na literatura científica (5 publicações no Web of Science, Figura 1), os estudos disponíveis demonstram eficiência analítica comparável ou superior aos demais solventes investigados, embora os trabalhos publicados sejam ainda poucos para uma generalização conclusiva.

Os ILs apresentam na tabela recuperações consistentemente elevadas na faixa de 92-96%, independentemente do tipo de matriz aquosa (águas residuárias ou águas superficiais). A consistência desta faixa de recuperação em diferentes estudos, envolvendo diferentes matrizes e autores, corrobora os 21 artigos reportados no *Web of Science*, sugerindo que ILs realmente consolidaram-se como metodologia estabelecida com desempenho analítico reprodutível. No entanto, os limites de detecção alcançados com ILs (0,32-3,0 µg/L) são moderadamente superiores aos reportados para DES.

A acetonitrila apresenta recuperações na faixa de 85,5-97,6% com limites de detecção situados entre 0,09 a 1,53 µg/L. O metanol, por sua vez, demonstra recuperações de 83 a 98,0% e limites de detecção na faixa 0,06 a 0,14 µg/L. Ambos os solventes clássicos apresentam desempenho analítico robusto e comparável aos solventes verdes, justificando sua continuidade de uso como metodologias de referência.

Considerações Finais

Os líquidos iônicos são os solventes mais usados em métodos de extração para o isolamento de pesticidas organofosforados em água, seguido dos solventes clássicos (acetonitrila e metanol). Os solventes eutéticos profundos apesar de serem ambientalmente amigáveis e econômicos, possuem representatividade limitada, apenas cinco publicações, indicando uma lacuna significativa no conhecimento científico que constitui uma oportunidade importante para futuras investigações, tanto para a qualidade dos recursos hídricos quanto para o desenvolvimento de práticas analíticas mais sustentáveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio técnico e científico da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior (CAPES, Código de Financiamento 001), da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), através do Convênio CAPES/UNESP Nº. 951420/2023, e ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua da Universidade Estadual do Maranhão.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA E SANEAMENTO BÁSICO. 2022. **Água no mundo**. Disponível em: < https://www.gov.br/ana/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/cooperacao-internacional/agua-no-mundo#:~:text=Estima%2Dse%20que%2097%2C5,%25%20encontra%2Dse%20nos%20rios>. Acesso em 25 de Abril 2026.

AMORIM, Antônia Fádia Valentim de. **Métodos cromatográficos**. Fortaleza: Universidade Estadual do Ceará (UECE), 2019. Disponível em: https://educapes.capes.gov.br/handle/capes/559763. Acesso em: 20 de Abril 2026

ARVISO, Jenessa A. **Water quality assessment of the Cocopah Tribal Lands**. 2024. Dissertação (Mestrado) – Northern Arizona University, 2024. Disponível em: ProQuest Dissertations & Theses (ID 31764845).

CACHO, J. I.; CAMPILLO, N.; VIÑAS, P.; HERNÁNDEZ-CÓRDOBA, M. In situ ionic liquid dispersive liquid-liquid microextraction coupled to gas chromatography-mass spectrometry for the determination of organophosphorus pesticides. **Journal of Chromatography** A, v. 1559, p. 95-101, 2018.

CELANO, R.; RODRÍGUEZ, I.; CELA, R.; RASTRELLI, L.; PICCINELLI, A. L. Quantification and screening of organophosphorus compounds in sludge by liquid chromatography coupled to mass spectrometry with a quadrupole time-of-flight analyzer. **Talanta**, v. 118, p. 312–320, 15 jan. 2014.

CHEN, Y.; SELVINSIMPSON, S. Chapter 3 - Fate and assessment of pesticide in aquatic ecosystem. In: SINGH, P.;SINGH, S., et al (Ed.). **Pesticides in the Natural Environment: Elsevier**, 2022. p.51-63. ISBN 978-0-323-90489-6.

DE ANDRADE, D. C.; MONTEIRO, S. A.; MERIB, J. A review on recent applications of deep eutectic solvents in microextraction techniques for the analysis of biological matrices. **Advances in Sample Preparation**, v. 1, p. 100007, 2022.

DE PERRE, C.; WHITING, S. A.; LYDY, M. J. A simultaneous extraction method for organophosphate, pyrethroid, and neonicotinoid insecticides in aqueous samples. **Analytical Methods**, v. 7, n. 24, p. 10427–10435, 2015.

FOSU-MENSAH, B. Y.; OKOFFO, E. D.; DARKO, G.; GORDON, C. Organophosphorus pesticide residues in soils and drinking water sources from cocoa producing areas in Ghana. **Environmental Systems Research**, v. 5, 2016.

HABEDANK, F.; FELDHUSEN, F.; SCHULZ-BULL, D.; KANWISCHER, M. Analysis of organophosphate pesticides in surface waters: comparison of method optimization approaches. **Journal of Chemometrics**, 2020.

HE, L.; LUO, X.; XIE, H.; WANG, C.; JIANG, X.; LU, K. Ionic liquid-based dispersive liquid–liquid microextraction followed high-performance liquid chromatography for the determination of organophosphorus pesticides in water sample. **Analytica Chimica Acta**, v. 655, n. 1, p. 52-59, 2009.

JOCIĆ, A.; MARIĆ, S.; TEKIĆ, D.; LAZAREVIĆ-PAŠTI, T.; MUŠOVIĆ, J.; FILIPOVIĆ TRIČKOVIĆ, J.; DIMITRIJEVIĆ, A. Complete removal of organophosphate pesticides from wastewater using a sustainable two-phase aqueous strategy based on ionic liquid. **Journal of Water Process Engineering**, v. 64, 105621, 2024.

KAUR, S.; CHOWDHARY, S.; KUMAR, D.; BHATTACHARYYA, R.; BANERJEE, D. Organophosphorus and carbamate pesticides: Molecular toxicology and laboratory testing. **Clinica Chimica Acta**, v. 551, p. 117584, 2023.

LIU, Y.; HE, M.; CHEN, B.; HU, B. Solidification of floating organic drop microextraction combined with gas chromatography-flame photometric detection for the analysis of organophosphorus pesticides in water samples. **Analytical Methods**, v. 7, n. 15, p. 6182-6189, 2015.

LIU, X.; XIONG, L.; LI, D.; CHEN, C.; CAO, Q. Monitoring and exposure assessment of organophosphorus flame retardants in source and drinking water, Nanjing, China. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, n. 2, p. 119, 2019.

LIU, Q.; LI, Z.; WEI, L.; CHEN, X.; XU, Y.; ZHAO, J. Fast dispersive liquid–liquid microextraction of pesticides in water based on a thermo-switchable deep eutectic solvent. **Environmental Chemistry Letters**, v. 20, n. 4, p. 2271-2276, 2022.

NGUYEN, M. K.; AHN, J.; HAN, T. G.; TUNG, N. K. T.; LEE, J.; KANG, J. S.; KIM, H. M. Determination of organophosphorus flame retardants in bottled drinking water by solid-phase extraction and gas chromatography-mass spectrometry. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 141, 107322, 2025.

PRADO, A. G. S. Química verde: os desafios da química do novo milênio. ***Química Nova***, v. 26, n. 5, p. 738–744, 2003.

RASHIDI NODEH, H.; WAN IBRAHIM, W. A.; KAMBOH, M. A.; SANAGI, M. M. New magnetic graphene-based inorganic–organic sol-gel hybrid nanocomposite for simultaneous analysis of polar and non-polar organophosphorus pesticides from water samples using solid-phase extraction. **Chemosphere**, v. 166, p. 21-30, 2017.

SANTOS, L. P.; MAGALHÃES, B. E. A.; PEREIRA, M. G.; SANTANA, D. A. A química verde na determinação analítica de defensivos agrícolas em alimentos: um levantamento bibliográfico. In: **Química: ensino, conceitos e fundamentos.** v.2, p. 14–26, 2020.

SAXENA, V. Water quality, air pollution, and climate change: Investigating the environmental impacts of industrialization and urbanization. **Water, Air, & Soil Pollution,** v. 236, n. 2, p. 73, 2025

SHI, F.; LIU, J.; LIANG, K.; LIU, R. Ionic liquids based on tris(pentafluoroethyl) trifluorophosphate as advantageous coatings for solid-phase microextraction in the extraction of organophosphorus esters from environmental waters. **Journal of Chromatography A**, v. 1447, p. 9–16, 2016.

SLOMINSKI, W. H.; BOZ DOS SANTOS, V.; XAVIER, F. R.; GARIANI, R. A.; MARTENDAL, E. Application of deep eutectic solvents for the simultaneous determination of organophosphorus and pyrethroid pesticides in aqueous matrices and the assessment of its level of whiteness. **Journal of Chromatography A**, v. 1745, p. 465770, 2025.

INTERFERÊNCIA DO BIOFILME NA CARACTERIZAÇÃO DE MICROPLÁSTICOS EM WETLANDS CONSTRUÍDAS: UMA REVISÃO DE DESAFIOS E MÉTODOS

1 Vanessa Lima de Souza, 2 Ana Karla Vieira Santos, 3 Fernando Sérgio Okimoto, 4 Rosane Freire Boina

1 Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, e-mail: vl.souza@unesp.br; 2 Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, e-mail: ak.santos@unesp.br; 3 Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, e-mail:fs.okimoto@unesp.br; 4 Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, e-mail:rosane.freire@unesp.br

Palavras-chave: Poluentes persistentes; Plastisfera; Zonas úmidas.

Introdução

Os microplásticos (MPs), geralmente definidos como detritos plásticos menores que 5mm (Arthur *et al*., 2009; Moore, 2008), são partículas introduzidas de maneira direta ou indireta no ambiente, na forma de fibras, pellets, e microesferas provenientes de cosméticos (primários), e/ou são o resultado da fragmentação do plástico por ação de uma série de fatores, como radiação UV, degradação biológica por parte de microrganismos, degradação química e abrasão mecânica (secundários) (Cheung; Fok, 2017; Fendall; Sewell, 2009; Moore, 2008). Devido à escassez de grupos funcionais hidrolisáveis no MPs, eles apresentam resistência aos processos de degradação microbiana e fotolítica. Tal resistência dificulta sua decomposição, permitindo que persistam em ambientes aquáticos por longos períodos (Sun *et al.*, 2019) representando uma ameaça significativa para diversos ecossistemas por efeito da bioacumulação na cadeia alimentar afetando, potencialmente, a saúde humana (Li *et al.*, 2023; Pal *et al.*, 2025).

A fim, de remediar a disseminação de MPs no meio, as Wetlands Construídas (WCs) tem se destacado como uma tecnologia promissora em razão a sua ecocompatibilidade, baixo custo e alta eficiência para diversos contaminantes, em especial sólidos suspensos (Vymazal, 2019; Xu *et al.*, 2023). Assim, para fins de controle e tratamento de águas residuais poluídas por MPs, as Wetlands Construídas apresentam resultados com taxa de remoção entre 81,6% e 100% (Cabrera *et al.*, 2023; Chen, Yuling *et al.*, 2021; Wang, Qintong *et al.*, 2020; Wei *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2022).

No entanto, devido a textura da superfície e hidrofobicidade dos MPs proporcionam condições ideais para formação de biofilme (plastisfera), um acúmulo viscoso de microrganismos interativos e resistentes na superfície (Bowley *et al.*, 2021; Yang, Yuyi *et al.*, 2020) dentro das WCs, assim mascarando a verdadeira eficiência do sistema e dificultando a análise laboratorial.

O presente texto objetivou analisar como a presença do biofilme gerado em wetlands construídas aplicadas a remoção de microplásticos interfere nos métodos atuais de caracterização, a fim de delinear o estado do conhecimento atual e identificar as principais lacunas de conhecimento que necessitam de investigação futura.

Metodologia

Foi realizada uma busca bibliográfica de artigos em que WC foram aplicadas na remoção de MPs, em bases de pesquisa consagradas, tais como *Science Direct, Scielo, SpringerLink, Scopus, Web of Science, Google Scholar*, entre outras passíveis de acesso pelo Portal de Periódicos da CAPES. Para tal, foi adotado palavras-chaves específicas, tais como: *Constructed Wetlands, Microplastics, Biofilm, Methodology, Pre-treatment,* adotando como critério o período de publicação dos últimos 5 a 10 anos, focados em comportamento de MPs em Wetlands e formação de biofilme.

Resultados e Discussão

Em ambientes pelágicos e bentônicos, as superfícies são propícias à colonização por microrganismos que formam os chamados biofilmes. Tais biofilmes, são um conjunto de células microbianas associadas às superfícies, envoltas em suas substâncias poliméricas extracelulares secretadas (Deng *et al.*, 2024). A rizosfera das macrófitas em sistemas de wetlands, possuem uma complexa região aeróbica e anaeróbica, assim atua como um reator biológico onde enzimas extracelulares promovem a cisão de polímeros em fragmentos de cadeia curta (Chen, *et al.*, 2019; Zhang, *et al.*, 2021). Uma vez reduzidos a pequenas moléculas, esses compostos são absorvidos pelas células microbianas e metabolizados. A rota de degradação final é dependente do potencial redox do meio: processos oxidativos levam à formação de CO_2 e H_2O, ao passo que a via anaeróbica resulta na geração de metano, ácidos orgânicos e NH_4^+, contribuindo diretamente para o incremento da biomassa do sistema (Rillig; Ingraffia; De Souza Machado, 2017; Zhang *et al.*, 2023).

A formação de biofilme pode alterar as propriedades físico-químicas e a capacidade de sorção de poluentes do MPs (Wang; Guo; Xue, 2021) e especialmente aumentando a hidrofilicidade (Tu *et al.*, 2020). A formação de biofilme nos microplásticos e sua abundância, são influenciadas diretamente pelas condições da água como temperatura, salinidade e a quantidade de nutrientes disponíveis (Oberbeckmann; Kreikemeyer; Labrenz, 2018). Além disso, a densidade de cada plástico define sua posição no sistema: polímeros mais leves flutuam na superfície, enquanto os mais densos afundam, o que muda o tipo de microorganismo que irá colonizá-los (Amaral-Zettler *et al.*, 2021). Essa cobertura biológica também causa mudanças rápidas

nas características físicas e químicas do material. Estudos mostram que o biofilme pode aumentar a cristalinidade do polietileno, reduzir a rigidez do polipropileno e alterar a resistência do poliestireno (McGivney *et al.*, 2020), indicando que a interação com os microrganismos acelera o desgaste desses plásticos dentro das wetlands. Assim, os plásticos tornam-se vetores reativos e sujeitos a bioincrustação, em vez de materiais inertes.

Considerando que essas alterações físico-químicas e o acúmulo de biomassa modificam as propriedades originais dos polímeros, surge um desafio crítico para a etapa de análise laboratorial. Se o biofilme não for removido adequadamente antes da pesagem ou da identificação por infravermelho (FTIR) ou outras, os resultados de eficiência das wetlands podem ser mascarados pelo peso da matéria orgânica ou pela interferência nos sinais espectrais.

Métodos de análises de remoção de microplásticos em wetlands construídas, comumente aplicam quantificação em peso da amostra por pesagem analítica, a opacidade da solução por turbidez, tamanho das partículas por análise de imagem, tipo de polímero por FTIR e a presença de biofilmes por microscopia, a fim de determinar a eficiência de remoção do sistema (Cabrera *et al*., 2023; Chen *et al*, 2021; Wei *et al*, 2020; Zhou *et al*, 2022).

Estudos como de Zhang, *et al* (2023), utilizam a Espectroscopia Transformada de Fourier no Infravermelho (FTIR) e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), como métodos de caracterização em experimentos de remoção de microplásticos em WCs, porém tais análises identificaram as características morfológicas e químicas do material, demonstrando as alterações físico-química ocorridas no sistema (Renner; Schmidt; Schram, 2017).

Na caracterização via FTIR fundamenta-se no uso de amplos bancos de dados espectrais de polímeros (Hummel, 1997). Através de algoritmos de busca, o sistema calcula um índice de similaridade, conhecido como Índice de Qualidade de Acerto (*Hit Quality Index*), que gera uma lista das substâncias com maior probabilidade de correspondência para a amostra analisada (Smith, 2011). Na prática, os espectros de polímeros desconhecidos são validados por meio da comparação direta com esses espectros de referência conhecidos. Contudo, a qualidade dos dados espectrais pode ser insuficiente para assegurar correspondências precisas, resultando em Índices de Qualidade de Acerto abaixo do limiar de 0,7 nas bibliotecas de referência (Yang, Dongqi *et al.*, 2015). Nesses casos, o método complementar recomendado uma análise visual entre os gráficos para averiguar se há correspondências das amostras. Com o desenvolvimento do biofilme no material torna a análise ainda mais imprecisa.

Procedimentos de limpeza complexos e demorados, como também digestão enzimática podem ser um método plausível a ser aplicado para remover a plastisfera. No entanto, tais e demais métodos não podem implicar em uma alteração artificial na composição da amostra, com o risco de perda de informações importantes ou mesmo de danificar as partículas de microplástico.

Considerações Finais

A revisão dos estudos atuais demonstra que o biofilme formado nos microplásticos dentro de Wetlands Construídas é um elemento crítico que altera a dinâmica dessas partículas e desafia os protocolos de análise convencionais. Ficou evidente que a presença da plastisfera interfere diretamente na confiabilidade dos resultados laboratoriais, uma vez que o acúmulo de biomassa e as alterações físico-químicas dos polímeros podem mascarar tanto a pesagem analítica quanto a identificação precisa via FTIR. Dessa forma, conclui-se que as métricas de eficiência de remoção das wetlands precisam ser interpretadas com cautela quando não há um pré-tratamento rigoroso para a remoção da matéria orgânica aderida. Para pesquisas futuras, torna-se essencial a investigação e padronização de métodos de limpeza que garantam a integridade das partículas plásticas, permitindo que a caracterização dos polímeros seja realizada sem as interferências biológicas que atualmente limitam o estado do conhecimento na área.

Referências Bibliográficas

AMARAL-ZETTLER, Linda A.; ZETTLER, Erik R.; MINCER, Tracy J.; KLAASSEN, Michiel A.; GALLAGER, Scott M. Biofouling impacts on polyethylene density and sinking in coastal waters: A macro/micro tipping point? **Water Research**, [*S. l.*], v. 201, p. 117289, 1 ago. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117289.

BOWLEY, Jake; BAKER-AUSTIN, Craig; PORTER, Adam; HARTNELL, Rachel; LEWIS, Ceri. Oceanic Hitchhikers – Assessing Pathogen Risks from Marine Microplastic. **Trends in Microbiology**, [*S. l.*], v. 29, n. 2, p. 107–116, 1 fev. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tim.2020.06.011.

CABRERA, Darío Calzadilla; WANG, Qintong; MARTÍN, Miguel; RAJADEL, Nuria Oliver; ROUSSEAU, Diederik P. L.; HERNÁNDEZ-CRESPO, Carmen. Microplastics occurrence and fate in full-scale treatment wetlands. **Water Research**, [*S. l.*], v. 240, p. 120106, 15 jul. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120106.

CHEN, Xianchuan; XIONG, Xiong; JIANG, Xiaoming; SHI, Huahong; WU, Chenxi. Sinking of floating plastic debris caused by biofilm development in a freshwater lake. **Chemosphere**, [*S. l.*], v. 222, p. 856–864, 1 maio 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.015.

CHEN, Yuling; LI, Tiancui; HU, Hongjuan; AO, Hongyi; XIONG, Xiong; SHI, Huahong; WU, Chenxi. Transport and fate of microplastics in constructed wetlands: A microcosm study. **Journal of Hazardous Materials**, [*S. l.*], v. 415, p. 125615, 5 ago. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125615.

CHEUNG, Pui Kwan; FOK, Lincoln. Characterisation of plastic microbeads in facial scrubs and their estimated emissions in Mainland China. **Water Research**, [*S. l.*], v. 122, p. 53–61, 1 out. 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.05.053.

DENG, Wenbo; WANG, Yajing; WANG, Zihan; LIU, Jinxian; WANG, Jian; LIU, Wenjuan. Effects of photoaging on structure and characteristics of biofilms on microplastic in soil: Biomass and microbial community. **Journal of Hazardous Materials**, [*S. l.*], v. 467, p. 133726, abr. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133726.

FENDALL, Lisa S.; SEWELL, Mary A. Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers. **Marine Pollution Bulletin**, [*S. l.*], v. 58, n. 8, p. 1225–1228, 1 ago. 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.04.025.

HUMMEL, Dietrich O. Polymers, additives, surfactants and their mixtures: Computer-based search with special ftir libraries. **Macromolecular Symposia**, [*S. l.*], v. 119, n. 1, p. 65–77, 1997. Disponível em: https://doi.org/10.1002/masy.19971190107.

LI, Xuemei; BAO, Liangwen; WEI, Yuan; ZHAO, Wensi; WANG, Fanfan; LIU, Xuesong; SU, Hailei; ZHANG, Ruiqing. Occurrence, Bioaccumulation, and Risk Assessment of Microplastics in the Aquatic Environment: A Review. **Water**, [*S. l.*], v. 15, n. 9, p. 1768, jan. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/w15091768.

MCGIVNEY, Eric; CEDERHOLM, Linnea; BARTH, Andreas; HAKKARAINEN, Minna; HAMACHER-BARTH, Evelyne; OGONOWSKI, Martin; GOROKHOVA, Elena. Rapid Physicochemical Changes in Microplastic Induced by Biofilm Formation. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, [*S. l.*], v. 8, 20 mar. 2020. DOI: https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00205. Disponível em: https://www.frontiersin.org/journals/bioengineering-and-biotechnology/articles/10.3389/fbioe.2020.00205/full. Acesso em: 15 abr. 2026.

MOORE, Charles James. Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat. **Environmental Research**, [*S. l.*], v. 108, n. 2, p. 131–139, 1 out. 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.07.025.

OBERBECKMANN, Sonja; KREIKEMEYER, Bernd; LABRENZ, Matthias. Environmental Factors Support the Formation of Specific Bacterial Assemblages on Microplastics. **Frontiers in Microbiology**, [*S. l.*], v. 8, 19 jan. 2018. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02709. Disponível em: https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2017.02709/full. Acesso em: 15 abr. 2026.

PAL, Divya; PRABHAKAR, Roshan; BARUA, Visva Bharati; ZEKKER, Ivar; BURLAKOVS, Juris; KRAUKLIS, Andrejs; HOGLAND, William; VINCEVICA-GAILE, Zane. Microplastics in aquatic systems: A comprehensive review of its distribution, environmental interactions, and health risks. **Environmental Science and Pollution Research**, [*S. l.*], v. 32, n. 1, p. 56–88, 1 jan. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11356-024-35741-1.

RENNER, Gerrit; SCHMIDT, Torsten C.; SCHRAM, Jürgen. A New Chemometric Approach for Automatic Identification of Microplastics from Environmental Compartments Based on FT-IR Spectroscopy. **Analytical Chemistry**, [*S. l.*], v. 89, n. 22, p. 12045–12053, 21 nov. 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b02472.

RILLIG, Matthias C.; INGRAFFIA, Rosolino; DE SOUZA MACHADO, Anderson A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. **Frontiers in Plant Science**, [*S. l.*], v. 8, p. 1805, 18 out. 2017. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805.

SUN, Jing; DAI, Xiaohu; WANG, Qilin; VAN LOOSDRECHT, Mark C. M.; NI, Bing-Jie. Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal. **Water Research**, [*S. l.*], v. 152, p. 21–37, 1 abr. 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.050.

TU, Chen; CHEN, Tao; ZHOU, Qian; LIU, Ying; WEI, Jing; WANIEK, Joanna J.; LUO, Yongming. Biofilm formation and its influences on the properties of microplastics as affected by exposure time and depth in the seawater. **Science of The Total Environment**, [*S. l.*], v. 734, p. 139237, set. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139237.

VYMAZAL, Jan. Is removal of organics and suspended solids in horizontal sub-surface flow constructed wetlands sustainable for twenty and more years? **Chemical Engineering Journal**, [*S. l.*], v. 378, p. 122117, 15 dez. 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122117.

WANG, Jianlong; GUO, Xuan; XUE, Jianming. Biofilm-Developed Microplastics As Vectors of Pollutants in Aquatic Environments. **Environmental Science & Technology**, [*S. l.*], v. 55, n. 19, p. 12780–12790, 5 out. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04466.

WANG, Qintong; HERNÁNDEZ-CRESPO, Carmen; SANTONI, Marcello; VAN HULLE, Stijn; ROUSSEAU, Diederik P. L. Horizontal subsurface flow constructed wetlands as tertiary treatment: Can they be an efficient barrier for microplastics pollution? **Science of The Total Environment**, [*S. l.*], v. 721, p. 137785, 15 jun. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137785.

WEI, Su; LUO, Hongtu; ZOU, Jinte; CHEN, Jianmeng; PAN, Xiangliang; ROUSSEAU, Diederik P. L.; LI, Jun. Characteristics and removal of microplastics in rural domestic wastewater treatment facilities of China. **Science of The Total Environment**, [*S. l.*], v. 739, p. 139935, 15 out. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139935.

XU, Wenxue; YANG, Baoshan; WANG, Hui; ZHANG, Liandong; DONG, Jinhao; LIU, Changchun. Simultaneous removal of antibiotics and nitrogen by microbial fuel cell-constructed wetlands: Microbial response and carbon–nitrogen metabolism pathways. **Science of The Total Environment**, [*S. l.*], v. 893, p. 164855, 1 out. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164855.

YANG, Dongqi; SHI, Huahong; LI, Lan; LI, Jiana; JABEEN, Khalida; KOLANDHASAMY, Prabhu. Microplastic Pollution in Table Salts from China. **Environmental Science & Technology**, [*S. l.*], v. 49, n. 22, p. 13622–13627, 17 nov. 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03163.

YANG, Yuyi; LIU, Wenzhi; ZHANG, Zulin; GROSSART, Hans-Peter; GADD, Geoffrey Michael. Microplastics provide new microbial niches in aquatic environments. **Applied Microbiology and Biotechnology**, [*S. l.*], v. 104, n. 15, p. 6501–6511, 1 ago. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00253-020-10704-x.

ZHANG, Jian; SHAO, Yuanyuan; LI, Zhao; HAN, Guolan; JING, Xinxin; WANG, Ning; XU, Jingtao; CHEN, Gao. Characteristics analysis of plastisphere biofilm and effect of aging products on nitrogen metabolizing flora in microcosm wetlands experiment. **Journal of Hazardous Materials**, [*S. l.*], v. 452, p. 131336, 15 jun. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131336.

ZHANG, Kai; HAMIDIAN, Amir Hossein; TUBIĆ, Aleksandra; ZHANG, Yu; FANG, James K. H.; WU, Chenxi; LAM, Paul K. S. Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review. **Environmental Pollution**, [*S. l.*], v. 274, p. 116554, 1 abr. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116554.

ZHOU, Xu; ZHAO, Yingxin; PANG, Guowei; JIA, Xulong; SONG, Yanxing; GUO, Aiyun; WANG, Anshuai; ZHANG, Shuai; JI, Min. Microplastic abundance, characteristics and removal in large-scale multi-stage constructed wetlands for effluent polishing in northern China. **Chemical Engineering Journal**, [*S. l.*], v. 430, p. 132752, 15 fev. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132752.

USO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X PARA DETERMINAÇÃO DE MICRONUTRIENTES

1 Everton Estevão Alves do Nascimento, 2 Simone Aparecida da Silva Lins, 3 Clístenes Williams Araújo do Nascimento.

1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: everton.estevao@ufrpe.br; 2 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: simone.slins@ufrpe.br; 3 Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: clistenes.nascimento@ufrpe.br

Palavras-chave: Calibração; Sensor proximal; Método não destrutivo.

Introdução

A avaliação da fertilidade do solo é fundamental para orientar manejos de adubação mais eficientes e sustentáveis. A disponibilidade de nutrientes, especialmente dos micronutrientes, influencia diretamente a produtividade das culturas, pois esses elementos atuam como reguladores de processos fisiológicos e cofatores enzimáticos (Gupta *et al*., 2008). Embora requeridos em pequenas quantidades, os micronutrientes apresentam uma faixa ótima bastante estreita: tanto deficiências quanto excessos podem comprometer o desenvolvimento das plantas, provocando desequilíbrios metabólicos ou efeitos tóxicos (Andrade *et al*., 2021). Por esse motivo, a determinação de seus teores no solo deve ser precisa e criteriosa.

No Brasil, a quantificação da fração prontamente disponível desses elementos é realizada por métodos tradicionais de química úmida com soluções extratoras, como Mehlich-1 ou DTPA, seguida de análise por métodos espectroscópicos (Andrade et al., 2021). Apesar de essenciais e amplamente utilizada, essas técnicas são onerosas por demandar tempo, equipe qualificada e utilização de reagentes que aumentam os custos analíticos e consequentemente de produção, além e gerarem resíduos químicos (Silva *et al*., 2021).

Nesse cenário, a espectrometria por fluorescência de raios X portátil (FRXp) surge como uma alternativa promissora. O equipamento permite a determinação multielementar em diferentes tipos de matriz, apresentando aplicações em diversos campos de pesquisa (Silva et al., 2021; Lemière, 2022). Na ciência do solo, tem demonstram utilidade em atividades como a previsão da fertilidade, a avaliação de micronutrientes em tecidos vegetais e fertilizantes, mapeamento de classes de solos, investigação de plantas hiperacumuladoras de metais, entre outros (Andrade *et al*., 2020, 2021; Lima *et al*., 2024). Suas principais vantagens incluem rapidez, precisão, baixo custo e o caráter não destrutivo, ou seja, de baixo impacto ambiental atendendo à crescente demanda por métodos analíticos mais eficientes e ambientalmente sustentáveis (Lima *et al*., 2024).

Entretanto, para que a FRXp forneça estimativas confiáveis da disponibilidade de micronutrientes no solo, é indispensável calibrar e validar o método por meio da comparação/correlação com as medições totais do FRXp com a fração disponível extraída (Mehlich-1) e determinadas por ICP-OES.

Metodologia

As amostras de solos foram obtidas no banco de solos do Grupo de Pesquisa em Química Ambiental de Solos (GQAS), fruto de levantamento de solos em grande escala nos estados de Pernambuco, Bahia, Paraíba e Rio Grande do Norte, em profundidades superficiais (0-20 cm) e subsuperficiais (20-40 cm), perfazendo um total de 938 amostras de solos com alta variabilidade geopedológica, correspondendo a coletas em áreas urbanas e agrícola. Os solos encontravam-se previamente secos ao ar livre (TFSA), destorroados e uniformizadas granulometricamente (#2 mm) conforme protocolos para análise de solos (Teixeira, 2017). Esse tamanho de partícula foi usado para as determinações dos teores totais realizados por FRXp e de teores disponíveis realizados por ICP-OES.

Análise de multielementar em FRXp

A análise por FRX foi realizada de acordo, com os protocolos estabelecidos pelo método 6200 (USEPA, 2007), com um FRXp com espectrômetro de dispersão de energia (EDXRF), modelo S1 Titan 800 Bruker® equipado com um Rh (4W, 6 – 50 KeV e 5 – 200 μA) e um detector integrado de deriva de silício (SDD) com janela de grafeno e resolução < 145 eV. O equipamento foi operado no modo de aplicação para análise de solo usando dois feixes de operação sequencial de 30 s cada, de modo que uma varredura completa foi concluída em 60 s. Os solos foram acondicionados em copos de amostras específicos para FRXp e revestidos com MYLAR® FILM-SCP de 3,6 μm. A faixa de detecção elementar do equipamento é estabelecida entre Mg e U e foi utilizada para obter a composição elementar dos elementos (mg kg^{-1}) Fe, Mn, Zn e Cu. Para fins de controle de qualidade analítica das análises no FRXp, os materiais de referência SRM 2710a (Montana Soil) e SRM 2709a (San Joaquim Soil) com os teores multielementar certificados pelo NIST (National Institute of Standards and Technology) foram incluídos nas análises.

Para a determinação dos micronutrientes disponíveis por espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), foram adotados parâmetros específicos de leitura visando garantir a precisão e a reprodutibilidade das análises. As amostras de solo foram previamente submetidas a extração com solução Mehlich-1, realizada de acordo com a metodologia adaptada de Teixeira et al. (2017). As condições operacionais do equipamento foram padronizadas para de acordo com as características da matriz analisada, assegurando a confiabilidade dos resultados obtidos.

O conjunto dos dados foi submetido à estatística descritiva (média, mediana, mínimo, máximo e desvio padrão). A normalidade dos dados foi verificada pelo teste Shapiro-Wilk ($p < 0,05$), a raiz quadrada foi realizada nos dados. A correlação de Spearman ($p < 0,05$) foi realizada para os valores determinados por ICP-OES e FRXp. Todo procedimento estatístico foi realizado utilizando o software R.

Resultados e discussão

Parâmetros de qualidade das análises

O método de leitura dos micronutrientes por ICP-OES, apresentou os coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,999 para todos os micronutrientes avaliados, indicando elevada linearidade das curvas de calibração e, consequentemente, confiabilidade nos resultados analíticos. Através dos materiais de referência o método da FRXp foi validado, obtendo-se os percentuais de recuperação dos elementos Cu, Mn, Fe e Zn situando-se na faixa de 92,3% a 104% para o NIST 2709a e de 92% a 114% para o NIST 2710a. Tais valores estão dentro da faixa aceitável (80 a 120 %) para análises de solos por técnicas como Fluorescência de Raios-X por energia dispersiva (FRXp), demonstrando alta exatidão e confiabilidade do método utilizado.

Micronutrientes disponíveis em ICP-OES e totais em FRXp

Como o esperado, os teores totais obtidos por FRXp superam em ordens de grandeza os disponíveis por Mehlich-1/ICP-OES, com médias e máximos muito elevados e forte assimetria, média bem maior que a mediana. Isso indica populações com outliers de alta concentração e reforça que o FRXp captura o estoque mineral do elemento (silicatos, óxidos, fases menos reativas), ao passo que a extração ácida mede frações trocáveis/solúveis e parte das especificamente adsorvidas. Em solos tropicais intemperizados, a dissociação entre estoque e disponibilidade ocorre, pois pH, matéria orgânica, textura/argila e a abundância e cristalinidade dos óxidos de Fe e Mn modulam a dessorção e a complexação de Cu e Zn, reduzindo o que o Mehlich-1 remove mesmo quando o total é alto.

Tabela 1 - Teores de micronutrientes disponíveis (ICP-OES) e totais (FRXp) em mg kg^{-1}.

Amostra	Média	Mínimo	Máximo	Mediana	Desvio Padrão
Fe ICP	113,94	0,595	1880,865	62,35	155,8
Fe FRXp	30846,83	844	129925,5	26172,5	21216,0
Mn ICP	52,80	0,12	757,2	19,77	90,9
Mn FRXp	345,91	16,5	2876,5	208,5	389,2
Cu ICP	1,74	0,02	30,18	0,7	3,1
Cu FRXp	30,62	6,5	329,5	23,5	23,6
Zn ICP	16,87	0,06	5333	2,08	218,8
Zn FRXp	86,00	8	1737	62	119,8

A amplitude dos dados, refletida pela diferença entre valores mínimos e máximos, indica alta variabilidade entre as amostras tendo em vista que são amostras de solos com distintas origem, históricos de manejo, mineralogia e condições de intemperismo, fatores que influenciam tanto a disponibilidade quanto o teor total dos micronutrientes. A alta variabilidade das amostras é essencial para correlação dos dados obtidos entre os métodos distintos por fornecer uma de distribuída homogênea.

As medianas mais baixas em relação às médias, sobretudo para Fe e Mn, sugerem distribuições assimétricas com presença de valores extremos elevados, decorrente da inclusão de solos ultramáficos nos estudos, que são solos com maior teor de óxidos de ferro e manganês.

Correlação dos teores disponíveis (FRXp) e totais (ICP-OES)

As correlações de Spearman (Figura 1) entre o mesmo elemento medido por ICP-OES e FRXp são fracas para Fe 0,05, Cu 0,3 e Zn 0,27 e moderada para Mn 0,48.

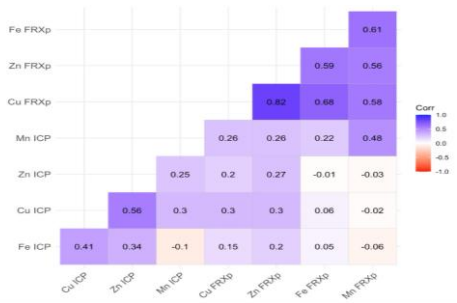


Figura 1. Matriz de correlação de Spearman.
Fonte: Autor

Os resultados indicam que modelos univariados, total x disponível, tem baixo poder preditivo para Fe, Cu e Zn, com Mn despontando como o caso mais promissor. A baixa correspondência entre métodos distintos para o mesmo elemento não permitiu relacionar diretamente o teor total medido pela FRXp ao teor disponível de micronutrientes extraídos por Mehlich-1 e determinados por ICP-OES. No entanto, estudos mais amplos realizados no grupo com abordagem multivariada que incorporam covariáveis do solo como pH, carbono orgânico e teor de argila estão sendo desenvolvidos e indicam resultados promissores que serão futuramente publicados.

Considerações finais

Embora os resultados indiquem baixa correlação entre os teores totais medidos no FRXp e o teor disponível extraído com Mehlich-1 lido em ICP-OES, a calibração da FRXp para fins de recomendação agronômica deve recorrer a abordagens multivariadas que incorporem, além dos sinais multielementares do FRXp, covariáveis do solo como, pH, carbono orgânico e teor de argila, entre outros, para que assim possa estabelecer uma correlação mais forte para a predição dos micronutrientes disponíveis.

Referências

Andrade, R., Faria, W. M., Silva, S. H. G., Chakraborty, S., Weindorf, D. C., Mesquita, L. F., Curi, N. Prediction of soil fertility via portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry and soil texture in the Brazilian Coastal Plains. **Geoderma**, [*s.l.*], v. 357, p. 113960, jan. 2020. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.113960. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113960. Acesso em: 20 jan. 2020.

Andrade, R., Silva, S. H. G., Weindorf, D. C., Chakraborty, S., Faria, W. M., Guilherme, L. R. G., Curi, N. Micronutrients prediction via pXRF spectrometry in Brazil: Influence of weathering degree. **Geoderma Regional**, [*s.l.*], v. 27, p. e00431, dez. 2021. DOI: 10.1016/j.geodrs.2021.e00431. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00431. Acesso em: 18 mar. 2025.

Gupta, U.C., Wu, K., Liang, S., 2008. Micronutrients in soils, crops and livestock. **Earth Science Frontiers**, [s.l.], v. 15, p. 110-125, set. 2008. DOI: 10.1016/S1872-5791(09)60003-8. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S1872-5791(09)60003-8. Acesso em: 20 jan. 2025.

Lima, L. H. V., Silva F. B. V., Echevarria G., Nascimento, C. W. A. The use of a portable X-ray fluorescence spectrometer for measuring nickel in plants: sample preparation and validation. **Springer Nature**, [*s.l.*], v. 196, 540, 11 mai. 2024. DOI: 10.1007/s10661-024-12706-y. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352009421000766?via%3Dihub. Acesso em: 20 jan. 2025.

Lemière, B. (2022). A review of pXRF (field portable X-ray fluorescence) applications for applied geochemistry. **Journal of Geochemical Exploration**, *188*, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.02.006

Silva, S. H. G., Ribeiro, B. T., Guerra, M. B. B., Carvalho H. W. P., Lopes, G., Carvalho, G. S., Guilherme, L. R. G., Resende, M., Mancini, M., Curi, N., Rafael R. B. A., Cardelli V., Cocco, S,. Corti, G., Chakraborty, S., Lig, B., & Weindorfh, D. C. pXRF in tropical soils: Methodology, applications, achievements and challenges. **Advances in Agronomy**, [*s.l.*], v. 167, p. 1–62, 2021. DOI: 10.1016/bs.agron.2020.12.001. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S006521132030105X. Acesso em: 30 fev. 2025.

Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. **Manual de métodos de análise do solo**, 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF. Embrapa, p. 573, 2017. Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/]infoteca/handle/doc/1085209. Acesso em: 15 mar. 2025.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **SW-846 Test Method 6200**: Field Portable X-Ray Fluorescence Spectrometry for the Determination of Elemental Concentrations in Soil and Sediment. [*s.l.*]. fev. 2017. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/6200.pdf. Acesso em: 15 mar. 2025.

APLICAÇÃO DE SOLVENTES VERDES NA PRODUÇÃO DE MEMBRANAS DE PLA APLICADAS EM DESTILAÇÃO POR MEMBRANAS A VÁCUO

1Júlia de Sousa Miguel, 2Alessandro Rogério Paulazzi, 3Guilherme de Sousa Serafim, 4Cintia Marangoni
1 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: juliasousamig@gmail.com; 2 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: a.paulazzi@posgrad.ufsc.br; 3 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: guilhermeserafim32@gmail.com; 4 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: cintia.marangoni@ufsc.br

Palavras-chave: Cyrene, corante têxtil, ácido polilático.

Introdução

A destilação por membrana a vácuo (DMV) é uma técnica de separação que combina os efeitos de processos impulsionados por membranas e processos impulsionados termicamente. As membranas utilizadas necessitam características específicas, como alta porosidade e superfície hidrofóbicas, que permite apenas o vapor passar por seus poros (Gobran et al., 2026). O processo de DM oferece vantagens distintas em comparação com processos tradicionais de separação por membranas, como Microfiltração, Ultrafiltração e Nanolfiltração. Entre as vantagens, destaca-se a alta rejeição de solutos e baixas pressões operacionais (Zhang et al., 2026). Nos últimos anos, têm havido um crescente interesse em reduzir os impactos ambientais associados a essas membranas, incluindo a substituição de polímeros e solventes por alternativas menos prejudiciais ao meio ambiente. Nesse contexto, destaca-se o uso de materiais biodegradáveis, como o ácido polilático (PLA): uma resina termoplástica alifática renovável produzida a partir de amido de milho e cana de açúcar, que tem sido aplicado em diversas áreas, incluindo a indústria de alimentos, medicina, têxteis e produção de membranas (Tan et al., 2026). No entanto, a produção de membranas de PLA ainda depende de solventes de alto impacto ambiental, como N,N- dimetilacetamida (DMAc), N,N -dimetilformamida (DMF) e N-metil-2-pirrolidona (NMP), devido as suas toxicidades elevadas. Como alternativa, o Cyrene (CYR) apresenta propriedades semelhantes às dos solventes orgânicos convencionais, além de ser biodegradável. O CYR é um solvente aprótico dipolar potencialmente menos prejudicial à saúde humana do que os solventes derivados do petróleo, estes tradicionalmente empregados na fabricação de membranas. Além disso, tem compatibilidade termodinâmica comparativamente baixa com os não solventes aplicados na técnica de inversão de fazes induzida por não solventes (NIPS) convencionais, e produz soluções binárias e multicomponentes altamente viscosas, frequentemente associadas à inibição da iniciação e crescimento de macrovazios em membranas assimétricas (Bridge et al., 2024). Assim, este testudo propôs produzir membranas de PLA pela NIPS, utilizando o solvente CYR. As membranas foram caracterizadas quanto à espessura, ângulo de contato, pressão de entrada de líquido (LEP). Por fim, as membranas foram aplicadas em destilação por membranas a vácuo para avaliar o fluxo de vapor pela membrana, utilizando água e corante preto ácido (PA).

Material e Métodos

Materiais

O poliácido lático (PLA) utilizado na produção da membrana foi adquirido da empresa Filabot. A polivinilpirrolidona k 30 (PVP), que foi utilizada como copolímero formador de poros, foi adquirido da empresa Sigma-Aldrich. O solvente N,N-dimetilacetamida P.A./ACS F (DMAc) e o solvente Cyrene, utilizados para dissolução do polímero, foram adquiridos da empresa Neon e Sigma-Aldrich, respectivamente. Ademais, o corante preto ácido (PA) (Trimacid), aplicado nos experimentos de DMV, foi adquirido da TMX.

Síntese das membranas de PLA

A síntese das membranas de PLA ocorreu pelo método NIPS. O PLA em diferentes concentrações (8 e 18%, m/m) e o agente porogênico PVP (1% m/m) foram dissolvidos nos solventes DMAc ou CYR, conforme apresentado na Tabela 1. As soluções foram aquecidas suavemente (70 ºC) e agitadas durante 24 h, para assegurar a dissolução completa dos polímeros no solvente. Após esse período, as soluções foram desgaseificadas, utilizando uma estufa a vácuo à temperatura de 70 ºC, sob pressão reduzida por 1 h. Então, as soluções foram espalhadas com auxílio de um bastão de vidro sobre uma placa de vidro, com as bordas seladas com espaçadores de 0,36 mm de espessura. Imediatamente após o espalhamento, as placas de vidro com as soluções foram submersas em banho de coagulação com água destilada em temperatura ambiente. Após 24 h, as placas com as membranas foram retiradas do banho de coagulação e lavada com água destilada, para remover qualquer resquício de solvente e, em seguida, coberta com outra placa de vidro para evitar deformação durante a secagem. As membranas formadas foram secas naturalmente em condições ambientes (~20 ºC), por mais 24 h. As membranas foram nomeadas PLA 8% - CYR, PLA 18% - CYR e PLA 18% - DMAC, respectivamente.

Tabela 1. Concentração de reagentes utilizados na produção das membranas de PLA

Membranas	Polimero (%)	Agente porogênico (%)	Solvente (%)
PLA 8% - CYR	8	1	CYR (91)
PLA 18% - CYR	18	1	CYR (81)
PLA 18% - DMAc	8	1	DMAc (81)

Caracterização das membranas

A espessura das membranas formadas foi determinada por meio de dez medições em locais aleatórios das membranas, utilizando um paquímetro digital (MTX 316119). A hidrofobicidade foi avaliada medindo o ângulo de contato superficial, onde foram realizadas medições em triplicata, utilizando um goniômetro (Ramé-Hart, 250) em conjunto com o *software* de imagem DROPimage. As medidas foram realizadas com água destilada e o volume da gota utilizado para cada medida foi de 5 µL. A pressão de entrada de líquido (LEP) foi mensurada utilizando um compressor de ar, para pressurizar líquido contra a superfície da membrana, e a pressão necessária para a primeira gota transpassar a membrana foi definida como a LEP. A análise de fluxo em DMV foi realizada utilizando uma unidade de DM, onde a vazão de alimentação foi de 1,5 L/min, a temperatura de aquecimento foi de 50 °C e a pressão negativa aplicada no permeado foi de -750 mmHg, e foi mensurado o fluxo de água destilada e de solução de corante PA (30 mg/L).

Resultados e Discussão

Os resultados de espessura e LEP estão apresentados na Tabela 1. A análise de espessura indicou que a membrana contendo 18% de PLA, produzida com o solvente CYR, apresentou maior espessura (0,57 ± 0,12) em comparação com a produzida com DMAc (0,27 ± 0,01), devido a maior viscosidade da solução produzida com CYR, o que influenciou no espalhamento e na formação da estrutura da membrana. Este resultado afetou diretamente a pressão de entrada de líquido (LEP), apresentando resultados superior a 6 bar para CYR (limite de pressão do equipamento) e 2,8 bar para a membrana produzida 18% de PLA em solvente DMAc. Estes resultados impossibilitam a aplicação da membrana produzida com CYR em DMV. Devido a estes resultados, uma membrana com menor concentração de PLA (8%) foi produzida. Os resultados para análise de espessura mostraram uma membrana menos espessa e com LEP apropriado para aplicação no processo DMV.

Membranas	LEP (bar)	Espessura (mm)
PLA 8% - CYR	2,4	0,16 ± 0,01
PLA 18% - CYR	> 6	0,57 ± 0,12
PLA 18% - DMAc	2,8	0,27 ± 0,01

A hidrofobicidade das membranas foi mensurada através da leitura do ângulo de contato com a água, utilizando goniômetro, e os resultados estão apresentados na Figura 1. Os resultados indicam que uma menor concentração de PLA aumentou o ângulo de contato, deixando hidrofóbica a membrana formada com o solvente CYR. Além disso, a membrana PLA 8% - CYR apresentou o maior ângulo de contato entre todas as membranas produzidas.

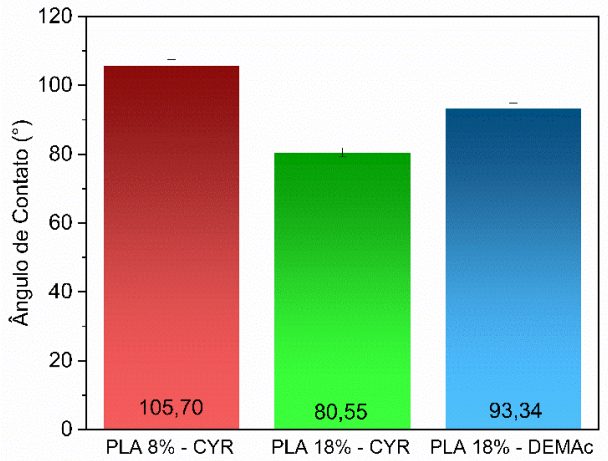


Figura 1. Angulo de contato da água nas membranas de PLA produzidas com diferentes solventes

Devido a elevada espessura, não foi possível realizar testes de fluxo para 18% de CYR. Os resultados de análise DMV são apresentadas na Figura 2. A membrana PLA18% - DMAc apresentou fluxo de 11,73 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ para água e um valor menor quando utilizada solução PA (7,20 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$), devido ao processo de fouling. Em comparação a membrana produzida com o solvente CYR, apresentou fluxo maior elevado para as duas soluções, com valores de fluxo de 17,32 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ em água e 12,54 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ para solução PA, indicando que as membranas produzidas com CYR tem potencial para aplicação em DMV e que o solvente pode ser um substituto viável para os solventes tradicionais, como o DMAc na produção de membranas de PLA.

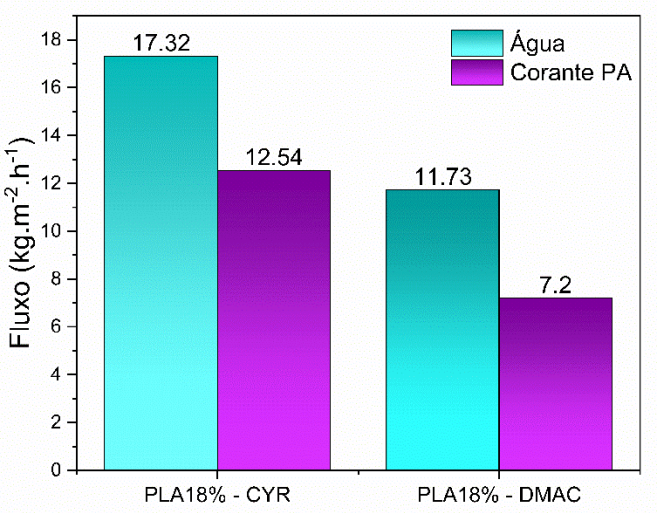


Figura 3. Fluxo de permeado ao final das 4 horas de processo DMV para água e corante PA.

Considerações Finais

Neste estudo, o solvente Cyrene foi analisado na formação de membranas de PLA, utilizando como agente formador de poros o PVP, aplicando a técnica NIPS para produção das membranas. A membrana formada com 18 % de PLA em solvente Cyrene demonstrou ser inapropriada a aplicação no processo de DMV, em comparação com membrana de PLA, produzida com solvente DMAc. Apesar disto, a aplicação de concentrações adequadas de PLA demonstraram resultados promissores. A concentração de 8% de PLA apresentou alta hidrofobicidade, com ângulo de contato superior a 90° e fluxo de permeado atingindo 17,32 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, superior aos 11,73 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ apresentados pela membrana produzida com o solvente DMAc. Quando aplicado a DMV em solução corante PA, a membrana produzida com CYR apresentou fluxo de 12,54 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, inferior aos resultados encontrados com água, devido ao fouling. Com estes resultados, pode-se afirmar que com concentração aprimoradas de PLA, o solvente CYR apresenta uma alternativa viável para rotas de produção mais sustentáveis e ambientalmente amigáveis.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro, bem como a Central de Análises do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos (EQA), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), por disponibilizar espaço e equipamentos para as caracterizações.

Referências Bibliográficas

Bridge, A. T., Wamble, N. P., Santoso, M. S., Brennecke, J. F., & Freeman, B. D. (2024). Defect-free asymmetric Matrimid® gas separation membranes using dihydrolevoglucosenone (CyreneTM) as a greener polar aprotic solvent than traditional solvents. Journal of Membrane Science, 691, 122221. https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2023.122221

Gobran, A. S., Rabie, M., Mohammed, A. H., & Maghrabie, H. M. (2026). Technologies, materials, applications, and challenges of membrane distillation: a comprehensive review. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 158, 1–56. https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2025.11.007

Tan, J., Cui, L., Xie, Z., He, Y., Dai, W., Xie, K., & Liu, Y. (2026). A comprehensive review of PLA porous membrane: The role of crystallization in structure design and application performance. Chemical Engineering Journal, 537, 176327. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2026.176327

Zhang, C., Lin, Y., Lu, G., Yuan, B., Chen, P., Farid, M. U., Lee, V. P. H., Shang, W., Li, W., & An, A. K. (2026). Surface patterning in membrane distillation: Fabrication, mechanism, and performance enhancement. Separation and Purification Technology, 394, 137561. https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2026.137561.

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE GARRAFAS PET 600 ML PREENCHIDAS COM AREIA PARA O USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

1 Ana Sueling Alves Diniz, 2 Marcio Yukihiro Kohatsu, 3 Mayke Santos de Oliveira, 4 Thainan Tammy Tameirão, 5 Ângela Terumy Fushita

1 Universidade Federal do ABC, e-mail: ana.sueling@ufabc.edu.br; 2 Universidade de São Paulo, e-mail: mykohatsu@usp.com; 3 Universidade Federal do ABC, e-mail: Mayke.oliveira@ufabc.edu.br; 4 Universidade Federal do ABC, e-mail: thainantt@outlook.com; 5 Universidade Federal do ABC, e-mail: angela.fushita@ufabc.edu.br;

Palavras-chave: Garrafas PET, Resistência à compressão, Construção sustentável

Introdução

A gestão de resíduos sólidos urbanos tornou-se um desafio crítico. Conforme aponta D'Almeida (2010), o plástico representa cerca de 10% a 15% do peso total do lixo urbano, porém ocupa até 50% do volume nos aterros sanitários devido à sua baixa densidade. Dentro desta categoria, o PET (Polietileno Tereftalato) destaca-se pela sua onipresença em embalagens de bebidas. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET, 2021), o Brasil recicla cerca de 55% do PET consumido, mas o restante ainda é descartado de forma inadequada, gerando impactos severos como a poluição de mares e a formação de microplásticos.

A utilização de recipientes de vidro ou plástico na construção civil remonta a experiências históricas de reaproveitamento. Moraes (2007) cita que a primeira "casa de garrafas" foi registrada em 1902 por William Peck, nos Estados Unidos, utilizando garrafas de vidro. Mais recentemente, como descreve Mansur (2014), o uso de garrafas PET preenchidas com terra ou areia ganhou força em projetos sociais em países como Honduras e Nigéria, onde o arquiteto Andreas Froese promoveu a técnica como uma solução para o déficit habitacional e a escassez de materiais convencionais

Para que a garrafa PET funcione como um elemento de alvenaria, ela precisa ser preenchida com um material que lhe confira estabilidade. A escolha da areia como preenchimento deve observar critérios técnicos. Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), o agregado miúdo é definido pela sua distribuição granulométrica. O trabalho de Diniz (2023) fundamenta-se na premissa de que a resistência do conjunto depende do "empacotamento" desses grãos dentro da garrafa: quanto menor o índice de vazios entre os grãos de areia, melhor será a distribuição das tensões aplicadas sobre a superfície plástica, conforme discutido por Bauer (2014) ao tratar das propriedades dos agregados.

A justificativa para o uso dessa técnica também repousa nos pilares da sustentabilidade. John (2000) afirma que a construção civil deve buscar a redução da "energia incorporada" nos materiais. Ao utilizar uma garrafa descartada, elimina-se a energia necessária para a queima de tijolos cerâmicos ou a produção de cimento para blocos de concreto. Como reforça Faria (2014), a aplicação dessas tecnologias alternativas em Habitações de Interesse Social (HIS) permite que a própria comunidade participe da construção, promovendo a educação ambiental e a redução direta do custo da moradia.

O objetivo principal desta pesquisa foi determinar a resistência à compressão de garrafas PET de 600 ml quando preenchidas com diferentes granulometrias de areia (fina, média e grossa). A problemática central reside na ausência de parâmetros normatizados no Brasil para esse método construtivo, o que gera incertezas sobre a estabilidade das edificações que utilizam essa técnica. Além da resistência individual, o estudo propôs-se a avaliar a interação entre o plástico das garrafas e a argamassa de assentamento.

Material e Métodos,

A seleção dos materiais buscou simular insumos acessíveis no mercado da construção civil e resíduos sólidos comuns.

Foram utilizadas 30 unidades de garrafas de Polietileno Tereftalato (PET) com volume de 600 ml, todas de um mesmo fabricante para assegurar a padronização da geometria e da espessura do plástico. Utilizou-se areia natural proveniente de lojas de material de construção, localizadas em Santo André, comercializadas como areia fina, média e grossa. Conforme as diretrizes da NBR 17054 (ABNT, 2022), as areias passaram por um processo de peneiramento para determinar sua composição. As amostras foram secas em estufa para eliminar a umidade que poderia falsear o peso e a fluidez do material. Utilizou-se uma série de peneiras padronizadas para separar as frações granulométricas. Foram determinados o Diâmetro Máximo (Dmáx) e o Módulo de Finura (MF), fundamentais para entender o empacotamento dos grãos dentro das garrafas. O processo de preenchimento das garrafas foi realizado de forma manual e sistemática. As 30 garrafas foram divididas em três grupos iguais (10 para areia fina, 10 para média e 10 para grossa). O preenchimento foi feito em camadas, com vibração e compactação manual para reduzir ao máximo o índice de vazios, seguindo a lógica de Bauer (2014) sobre a densidade dos agregados. As garrafas foram devidamente tampadas para evitar a perda de material durante o manuseio e o ensaio. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos, utilizando uma prensa hidráulica com capacidade para 100 toneladas. As garrafas foram ensaiadas na posição horizontal, simulando como seriam assentadas em uma parede de vedação. A carga foi aplicada de forma contínua até o ponto de ruptura do plástico ou deformação plástica total, registrando-se a força máxima suportada em quilonêutons (kN). A resistência à compressão foi calculada dividindo a força máxima pela área de projeção da garrafa, resultando em valores expressos em Megapascais (MPa)



Figura 01: Montagem de prensa hidráulica para teste de resistência em compreensão nas amostras.
Fonte: Autores.

Resultados e Discussão

Os ensaios de peneiramento, realizados sob as diretrizes da NBR 17054 (ABNT, 2022), permitiram classificar as areias quanto ao seu tamanho e distribuição: a) Areia Fina: Apresentou a menor porcentagem de vazios, o que favorece um preenchimento mais denso e uniforme dentro da garrafa PET; b) Areia Média e Grossa: Embora comercializadas como tais, a análise granulométrica revelou que a "areia grossa" possuía uma predominância de cerca de 75% a 76% de areia média em sua composição.

De acordo com Bauer (2014), a distribuição granulométrica é o fator que mais influencia a resistência de um material granular, pois grãos menores ocupam os espaços entre os maiores, aumentando a área de contato interna e a estabilidade do conjunto.

Os testes na prensa hidráulica revelaram uma disparidade significativa de desempenho baseada no substrato utilizado:

Tabela 01: Resistências médias encontradas.

Tipo de Areia	Resistência Média (MPa)
Areia Fina	**1,17 MPa**
Areia Média	1,05 MPa
Areia Grossa	0,82 MPa

Fonte: Os autores.

A superioridade da areia fina (1,17 MPa) confirma que o melhor "empacotamento" dos grãos reduz a deformação plástica do PET sob carga. Ao comparar esses dados com a NBR 15270-1 (ABNT, 2017), observa-se que nenhum dos grupos atingiu a resistência mínima de 1,50 MPa exigida para blocos de vedação.

Diniz (2023) aponta uma divergência notável em relação a estudos estrangeiros, como os de Mansur (2014), que relatam resistências superiores a 8 MPa para garrafas preenchidas com terra. Esta diferença pode ser atribuída a: 1) Espessura do Plástico: Variações na gramatura do PET entre fabricantes de diferentes países. 2) Grau de Compactação: Diferenças entre a compactação manual e o uso de métodos mecânicos ou solo-cimento. 3) Volume da Garrafa: A geometria da garrafa de 600 ml pode ser menos eficiente na distribuição de tensões do que garrafas maiores.

Considerações Finais

A pesquisa permitiu concluir que, embora o uso de garrafas PET preenchidas com areia seja uma alternativa sustentável de baixo custo, sua aplicação como elemento de alvenaria de vedação no Brasil ainda enfrenta obstáculos técnicos significativos. O estudo confirmou que a granulometria do material de preenchimento é o fator determinante para a resistência mecânica, sendo que a areia fina apresentou o melhor desempenho (1,17 MPa) devido ao seu maior grau de compactação e menor índice de vazios. Nenhum dos grupos testados atingiu a resistência mínima de 1,50 MPa exigida pela NBR 15270-1 (ABNT, 2017) para blocos de vedação, o que indica que, sob as condições do ensaio, o material não oferece a segurança estrutural necessária para substituir tijolos convencionais sem adaptações. A discrepância entre os resultados obtidos (máximo de 1,17 MPa) e a literatura internacional (que relata até 8 MPa) sugere que variáveis como a espessura do plástico das garrafas brasileiras e o método de compactação manual influenciam drasticamente o resultado final. Para que essa tecnologia possa ser validada e aplicada com segurança, recomenda-se que novas pesquisas explorem: 1)Materiais de Preenchimento Densos: Testar substratos com partículas ainda menores, como o silte e a argila, ou a adição de solo-cimento para elevar a rigidez interna. 2) Variação de Volume: Avaliar o desempenho de garrafas de 1,5L e 2,0L, que possuem geometrias diferentes e podem oferecer respostas mecânicas distintas.

Em suma, a reutilização de garrafas PET na construção civil permanece como uma promessa valiosa para a construção sustentável e a redução de resíduos, desde que acompanhada por soluções de engenharia que compensem a baixa aderência do material e garantam o cumprimento dos requisitos mínimos de segurança das normas brasileiras.

Referências Bibliográficas.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15270-1: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET (ABIPET). 12º Censo da Reciclagem de PET no Brasil. São Paulo: ABIPET, 2021.

BAUER, L. A. F. Materiais de Construção. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

D'ALMEIDA, M. L. O. Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. 3. ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2010.

DINIZ, A. S. A. Propriedades mecânicas de garrafas PET 600 ml preenchidas com areia para o uso na construção civil. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Potiguar, Natal, 2023.

FARIA, R. Habitação de interesse social: sustentabilidade e tecnologias alternativas. São Paulo: Editora Blucher, 2014.

JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

MANSUR, G. L. Uso de garrafas PET na construção civil. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

MORAES, S. T. Reutilização de garrafas PET como alternativa construtiva. Rio de Janeiro: UFRJ, 2007.

ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE DO USO DO TIJOLO ECOLÓGICO NA CONSTRUÇÃO CIVIL SOB OS ASPECTOS AMBIENTAIS, ECONÔMICOS E SOCIAIS NO CONTEXTO DO RIO GRANDE DO NORTE

1 Beatriz Nayara Bezerra de Araujo, 2 José Douglas dos Santos Siqueira Silva, 3 Sinara Martins Camelo
1 Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia Do Rio Grande Do Norte - Campus São Gonçalo Do Amarante, e-mail: beatriz.nayara@escolar.ifrn.edu.br; 2 Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia Do Rio Grande Do Norte - Campus São Gonçalo Do Amarante, e-mail: jose.douglas@ifrn.edu.br; 3 Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia Do Rio Grande Do Norte - Campus São Gonçalo Do Amarante, e-mail: sinara.martins@ifrn.edu.br

Palavras-chave: Tijolo ecológico; construção sustentável; sustentabilidade na construção.

Introdução

A construção civil desempenha um papel essencial no desenvolvimento econômico, sobretudo pela sua contribuição na geração de emprego e renda. Entretanto, esse setor também se destaca como um dos maiores responsáveis pelo consumo de recursos naturais e pela geração de impactos ambientais significativos, especialmente no que se refere à emissão de poluentes e à produção de resíduos sólidos (SANTOS et al., 2021). Além disso, o crescimento urbano e a intensificação das atividades construtivas ampliam a pressão sobre os recursos naturais, reforçando a necessidade de adoção de práticas mais sustentáveis.

Diante desse cenário, torna-se necessário repensar os métodos construtivos tradicionais, buscando alternativas que conciliem eficiência produtiva e responsabilidade ambiental. A incorporação de tecnologias construtivas sustentáveis surge como estratégia relevante para a mitigação dos impactos ambientais do setor (JOHN, 2000).

Nesse contexto, o tijolo ecológico apresenta-se como uma alternativa promissora. Produzido a partir da mistura de solo, cimento e água, sem a necessidade de queima, esse material reduz significativamente o consumo energético e as emissões de gases poluentes associadas à sua fabricação (OLIVEIRA, 2020). Além disso, seu sistema construtivo favorece a racionalização do uso de materiais, contribuindo para a diminuição de desperdícios.

Apesar dos benefícios apontados, a adoção do tijolo ecológico ainda enfrenta desafios, especialmente quando analisada em contextos regionais específicos. No estado do Rio Grande do Norte, fatores como condições climáticas, disponibilidade de matéria-prima e características do mercado da construção civil influenciam diretamente sua aplicabilidade. Dessa forma, este estudo tem como objetivo analisar a sustentabilidade do uso do tijolo ecológico sob os aspectos ambiental, econômico e social, considerando a realidade regional.

Material e Métodos

A pesquisa caracteriza-se como aplicada, por buscar gerar conhecimentos com potencial de aplicação prática na construção civil. Quanto aos objetivos, apresenta caráter exploratório, visando ampliar a compreensão sobre o uso do tijolo ecológico no contexto do Rio Grande do Norte. A abordagem adotada é qualitativa, baseada na análise e interpretação de informações teóricas.

Os procedimentos metodológicos consistiram na realização de revisão bibliográfica e análise documental, conforme orientações de Gil (2008) e Prodanov e Freitas (2013). Foram selecionados artigos científicos, livros, normas técnicas e documentos oficiais relacionados ao tema, considerando critérios de relevância, atualidade e confiabilidade.

A análise dos dados foi estruturada com base nos três pilares da sustentabilidade: ambiental, econômico e social. Posteriormente, realizou-se uma interpretação crítica das informações, buscando relacionar os achados da literatura com as particularidades do estado do Rio Grande do Norte.

Resultados e Discussão

A análise dos estudos selecionados evidencia que o tijolo ecológico apresenta contribuições relevantes nos três pilares da sustentabilidade. No aspecto ambiental, destaca-se a redução das emissões de gases poluentes e do consumo energético, uma vez que sua produção dispensa o processo de queima, característica apontada como fundamental para a mitigação dos impactos ambientais da construção civil (JOHN, 2000; OLIVEIRA, 2020). Além disso, observa-se menor geração de resíduos e menor demanda por recursos naturais, contribuindo para práticas construtivas mais sustentáveis.

Outro ponto relevante refere-se à eficiência construtiva. O sistema de encaixe dos tijolos ecológicos reduz a necessidade de argamassa e favorece maior precisão na execução das obras, o que impacta diretamente na diminuição de desperdícios e na otimização dos processos construtivos.

No aspecto econômico, os estudos indicam potencial de redução de custos, especialmente quando há produção local do material. A diminuição de gastos com transporte, aliada à economia de insumos e à maior agilidade na execução das obras, contribui para a viabilidade do sistema construtivo (OLIVEIRA, 2020). Ademais, a racionalização do processo construtivo tende a proporcionar maior controle e previsibilidade dos custos.

Sob a perspectiva social, verifica-se que a utilização do tijolo ecológico pode favorecer a geração de emprego e renda em nível local, além de ampliar o acesso à moradia por meio da redução dos custos construtivos, aspecto relevante em regiões com déficit habitacional (NAGALLI, 2022).

A Tabela 01 apresenta uma síntese dos principais benefícios e limitações associados ao uso do tijolo ecológico nos três pilares da sustentabilidade, permitindo uma visualização integrada dos aspectos analisados.

Tabela 01: Síntese dos principais impactos do uso do tijolo ecológico nos pilares da sustentabilidade.

Pilar da Sustentabilidade	Principais Benefícios	Principais Limitações
Ambiental	Redução de emissões de gases poluentes; menor consumo energético; diminuição de resíduos	Dependência da qualidade do solo; necessidade de controle técnico na produção
Econômico	Redução de custos com transporte e materiais; menor uso de argamassa; maior rapidez construtiva	Investimento inicial em equipamentos; variação de custos conforme região
Social	Geração de emprego local; ampliação do acesso à moradia; tecnologias acessíveis	Necessidade de capacitação da mão de obra; baixa aceitação no mercado

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Conforme evidenciado, os benefícios do tijolo ecológico são consistentes nos três pilares da sustentabilidade, embora existam limitações que condicionam sua aplicação em determinados contextos.

A fim de aprofundar a análise, a Tabela 02 apresenta uma comparação direta entre o tijolo ecológico e o tijolo convencional, destacando diferenças relevantes em termos de processo produtivo, desempenho e impactos ambientais.

Tabela 02: Comparação entre o tijolo ecológico e o tijolo convencional.

Critério	Tijolo Ecológico	Tijolo Convencional
Processo de produção	Sem queima	Com queima em fornos
Consumo energético	Baixo	Elevado
Emissão de poluentes	Reduzida	Alta
Uso de argamassa	Menor	Maior
Geração de resíduos	Menor	Maior
Tempo de execução	Mais rápido	Mais lento
Custo total da obra	Potencialmente menor	Variável
Mão de obra	Requer capacitação	Tradicional

Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base em OLIVEIRA (2020) e JOHN (2000).

A comparação apresentada evidencia que o tijolo ecológico possui vantagens significativas em relação ao modelo convencional, sobretudo nos aspectos ambientais e construtivos. No entanto, sua adoção ainda depende de fatores técnicos, econômicos e culturais, que influenciam sua aceitação no mercado.

Apesar dos resultados positivos, a literatura também aponta limitações importantes para sua difusão. Entre os principais entraves, destacam-se a resistência do mercado, a carência de conhecimento técnico e a necessidade de capacitação da mão de obra. No contexto do Rio Grande do Norte, fatores como disponibilidade de solo adequado, condições climáticas e logística de produção influenciam diretamente a viabilidade de aplicação do material.

Dessa forma, os resultados indicam que, embora o tijolo ecológico apresente elevado potencial sustentável, sua consolidação depende da superação de barreiras técnicas e culturais, bem como da adequação às condições regionais.

Considerações Finais

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o tijolo ecológico constitui uma alternativa viável para a promoção da sustentabilidade na construção civil, apresentando benefícios ambientais, econômicos e sociais consistentes. A análise desenvolvida, sintetizada na Tabela 01 e aprofundada na comparação apresentada na Tabela 02, evidencia que esse sistema construtivo se destaca principalmente pela redução dos impactos ambientais, pela maior eficiência no uso de recursos e pelo potencial de diminuição de custos ao longo do processo construtivo.

Do ponto de vista ambiental, observa-se que a ausência do processo de queima contribui significativamente para a redução das emissões de gases poluentes e do consumo energético. No aspecto econômico, a racionalização do processo construtivo e a possibilidade de produção local favorecem a viabilidade do material. Já no âmbito social, destaca-se seu potencial para geração de emprego e ampliação do acesso à moradia, especialmente em contextos com déficit habitacional.

Entretanto, a análise também evidencia que sua adoção ainda está condicionada à superação de desafios estruturais, como a disseminação do conhecimento técnico, a qualificação da mão de obra e a aceitação pelo mercado. No contexto do Rio Grande do Norte, tais fatores são intensificados pelas especificidades regionais, como a disponibilidade de matéria-prima e as condições de produção, o que reforça a necessidade de adaptações locais.

Dessa forma, destaca-se a importância do incentivo a pesquisas aplicadas, ao desenvolvimento de normas técnicas e à realização de ações de capacitação profissional, visando ampliar o uso do tijolo ecológico e consolidar práticas construtivas mais sustentáveis no setor.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) pelo suporte acadêmico.

Referências Bibliográficas

BARBOSA, J. S. et al. Sustentabilidade na construção civil. Revista Ambiental, 2022.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2000.

NAGALLI, A. Resíduos de construção civil: quantificação e gerenciamento. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.

OLIVEIRA, D. N. Análise da viabilidade do tijolo ecológico de solo-cimento na construção civil: revisão de literatura. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), 2020.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. Metodologia do trabalho científico. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

SANTOS, A. et al. Impactos ambientais da construção civil. Revista ENIAC Pesquisa, 2021.

MEMBRANAS RECICLADAS ASSOCIADAS À CARVÃO ATIVADO OBTIDO DO RESÍDUO DE BAGAÇO DE MALTE: UMA ALTERNATIVA MAIS SUSTENTÁVEL AO TRATAMENTO DE EFLUENTES

1 Caique Prado Machado de Oliveira, 1 Maria Gabriela Ferreti Cali, 1 Pâmela Calazans Fonseca, 1 Rafael Antônio Gomes de Oliveira, 1Samuel Henrique Teixeira Rodrigues

1 Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas), e-mail: caiqueoliveiraeq@gmail.com

Palavras-chave: Carvão ativado; Membrana reciclada; Tratamento de efluente.

Introdução

O crescimento industrial intensificou a geração de resíduos diversos, impulsionando a busca por tecnologias de tratamento mais eficientes e sustentáveis (Braga, 2023). No setor têxtil, o elevado uso de água e químicos resulta em efluentes contaminados com compostos recalcitrantes a tratamentos biológicos convencionais, tornando necessários processos avançados como a adsorção e separação por membranas, que, por vezes, possuem alto custo. Como alternativa, a reutilização de resíduos industriais, como o bagaço de malte para produção de biocarvão e a reciclagem de membranas de osmose inversa (Seibel, 2021), apresenta-se como uma rota econômica alinhada também aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. O presente trabalho visa validar um sistema sequencial integrando o carvão ativado do bagaço de malte e membranas recicladas via *downcycling* para a remoção do corante azul de metileno. O objetivo central é avaliar preliminarmente a eficiência desse trem de tratamento sustentável em comparação ao desempenho de materiais comerciais novos, buscando uma alternativa menos onerosa e com eficácia comparável às tecnologias convencionais atuais.

Material e Métodos

Para atender aos objetivos traçados, o trabalho foi dividido em etapas: produção e caracterização do carvão ativado proveniente do bagaço de malte; produção e caracterização da membrana reciclada de osmose inversa; produção e caracterização do efluente sintético; e para a validação dos resultados obtidos, foi feita uma comparação entre os resultados obtidos e uma rota de tratamento utilizando membrana e carvão ativado comerciais.

O bagaço de malte utilizado neste estudo foi obtido através do malte pilsen comercial, submetido a processo de preparo envolvendo o cozimento, lavagem e secagem do material em estufa. O malte (6,70kg) previamente moído foi adicionado a um recipiente de mosturação com água morna (20L), foi homogeneizado e o sistema foi submetido a dupla rampa de aquecimento (30 minutos à 45ºC/ 60 minutos à 70ºC), sendo misturado a cada 10 minutos. Posteriormente, o bagaço foi separado do mosto por meio de filtração manual com um coador de pano, e em seguida, seco em estufa à 105ºC por 40 horas e após o resfriamento, vedado com filme plástico para evitar a contaminação.

Depois de seco, o bagaço de malte (BMS) foi tratado com uma solução de KOH 33g/L em repouso por 24 horas em temperatura ambiente, permitindo assim a difusão do agente ativante. A quantidade de BMS utilizada foi o correspondente à metade do recipiente (2 litros) e foram adicionados também 2 litros da solução básica. Após o tempo de contato, o sistema foi filtrado novamente com filtro de pano, e submetido à secagem em estufa a 105ºC por 24 horas, conforme procedimento descrito por Mildenberg (2019).

A ativação do carvão foi realizada em atmosfera semi-inerte por 1 hora em temperatura de 700ºC. A taxa de aquecimento até a temperatura alvo foi de 10ºC/min. A pirólise ocorreu em um forno tipo mufla e, visando aproximar-se da atmosfera inerte, foi usado um recipiente de ferro fundido, que foi fechado após adição da biomassa e, para reduzir a quantidade de oxigênio no interior do forno e inibir a formação de cinzas, o forno foi preenchido com carvão vegetal comercial. Não houve necessidade de triturar o material pois o malte foi obtido já triturado.

Depois de resfriado até a temperatura ambiente, o carvão ativado foi lavado duas vezes para que se obtivesse um pH neutro e os poros formados fossem desobstruídos. Na primeira lavagem utilizou-se água destilada aquecida (70ºC). Já na segunda lavagem, o carvão foi imerso em uma solução de HCl 0,1 mol/L e em agitação por 10 minutos. Depois, lavado com água até que o pH estivesse entre 6 e 8. Por fim, foi seco por 24 horas em estufa à 105ºC.

Após a finalização do processo de produção, o material obtido foi caracterizado por meio de: análise termogravimétrica em atmosfera inerte (50mL/min de N_2), utilizando analisador térmico da fabricante Shimadzu, modelo DTG-60H; microscopia eletrônica de varredura (MEV) em conjunto com espectroscopia por energia dispersiva (EDS), utilizando um equipamento da marca Jeol, modelo JSM-IT300, com ampliações de 15x, 100x, 300x e 600x; espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) em um equipamento da marca Shimadzu modelo IR Affinity-1; e, por fim, com a determinação de ponto de carga zero (PCZ), na qual uma amostra de carvão foi diluída em uma solução de NaCl 0,1 mol/L e com pH ajustado para 2, 4, 7, 9 e 13, a fim de se estabelecer o PCZ em função do valor do pH do meio.

No caso da reciclagem da membrana, ocorreu um processo oxidativo controlado da camada seletiva superficial ultrafina de poliamida aromática presente na superfície da membrana de osmose reversa (RO) da marca Dow Filmtech e modelo TW30-1812-75.

As membranas foram reumedecidas por imersão em uma solução 50%v/v de álcool etílico puro e água, por 15 minutos. Depois o ataque oxidativo foi feito por imersão completa das membranas em uma solução de NaOCl com concentração de cloro livre de 2,48%m/v (determinada por titulação com tiossulfato de sódio) por 5 horas e depois foram lavadas com água ultrapura 5 vezes para cessar o ataque e estabilizar a superfície. A solução de NaOCl foi diluída para garantir maior controle do processo oxidativo e gerar, assim, uma membrana de nanofiltração (NF). Essas condições foram determinadas por meio da análise da intensidade de contato desejada (150000 ppm*h).

Após o ataque, foram adquiridos os dados para comparação das condições da membrana em fim de vida com suas propriedades quando nova e após reciclagem. Para isso foram avaliados os parâmetros: permeabilidade, rejeição e hidrofobicidade.

O teste de permeabilidade consistiu em compactar a membrana no módulo com água destilada por 1h a 12bar e seguir com a permeação de água à diferentes pressões. Em triplicata se mediu: a vazão de permeado em cada pressão com vazão de alimentação constante de 2,4L/min. Os dados foram tratados e construiu-se uma curva de Fluxo versus Pressão de Operação, cuja inclinação fornece a permeabilidade hidráulica.

Já o teste de rejeição foi avaliado pela capacidade de remoção de sais pelas membranas, verificada por meio de uma curva de calibração construída por meio da condutividade elétrica – pressão de 12bar utilizando 4L de solução salina de NaCl 2g/L. Sob pressão e temperatura constantes, a eficiência de remoção dos íons foi mensurada através da variação entre a concentração da solução de alimentação e a concentração dos permeados com o passar do tempo. Após a calibração com o NaCl, o teste foi realizado para cada soluto pretendido – $MgSO_4$ e azul de metileno.

Para o teste de hidrofobicidade, pingou-se uma gota de água destilada em diversos pontos da membrana tratada e registrou-se com fotos, que foram avaliadas no *software* ImageJ por meio do plug-in DropSnake, que determina o ângulo de contato a partir da curvatura do perfil da gota depositada.

Outros testes de rejeição consistiram na filtração de soluções de azul de metileno e sulfato de magnésio. A membrana foi compactada com água ultrapura, com pressão de 12bar e vazão de alimentação de 2,4L/min, com recirculação do concentrado, sob temperatura constante. A concentração para os dois solutos foi de 500mg/L e o tempo de operação de aproximadamente 30 minutos, até se coletar 20mL de permeado para análise (o sulfato por condutividade e o azul de metileno por espectroscopia UV-Vis).

De maneira semelhante ao carvão ativado, as membranas também foram submetidas à análise por MEV e EDS, o que permitiu a análise de suas superfícies, bem como identificar os elementos químicos presentes nas amostras.

Para o efluente sintético os passos foram simples: preparou-se 4 litros de uma solução aquosa de Azul de Metileno 25mg/L que foi caracterizada por meio de espectrometria de absorção.

Por fim, para a comparação com o tratamento comercial, estabeleceu-se dois trens de tratamento: um com carvão e membrana comerciais e outro com carvão e membranas reciclados.

Para a primeira etapa do tratamento montou-se uma coluna de adsorção com 4,13g de carvão ativado (103mm), com vazão de alimentação de 0,15L/min. E na etapa com a membrana, estabeleceu-se no módulo uma pressão de 12bar e vazão de alimentação de 2,4L/min. Ambos os trens foram montados da mesma forma, para garantir a maior eficácia na comparação entre o comercial e a rota com materiais que foram reciclados.

Ao final, a concentração de cada efluente foi analisada utilizando espectroscopia de absorção UV-Vis, e os resultados foram comparados.

Resultados e Discussões

Para a análise dos resultados seguiu-se a mesma ordem da metodologia apresentada anteriormente: caracterização do bagaço de malte; análise do processo de produção do carvão ativado; caracterização do carvão ativado, utilizando diferentes técnicas; avaliação do processo de reciclagem da membrana; caracterização da membrana reciclada com variados testes; avaliação e comparação entre o sistema convencional e o reciclado.

Na caracterização do bagaço de malte a análise termogravimétrica revelou o comportamento típico de degradação térmica em materiais lignocelulósicos, onde a perda de massa iniciou-se em 200 °C (degradação da lignina) conforme descrito por Nanda *et al.* (2013), e se intensificou até a casa dos 500 °C (decomposição de celulose e hemicelulose). As imagens de MEV e os dados do EDS constataram que a superfície original do bagaço era rugosa, fibrosa e portadora de poros apropriados para adsorção, sendo sua estrutura majoritariamente composta de compostos orgânicos contendo 42,9% de carbono e resíduos de potássio por conta da etapa de impregnação, conforme a Figura 01 a seguir.

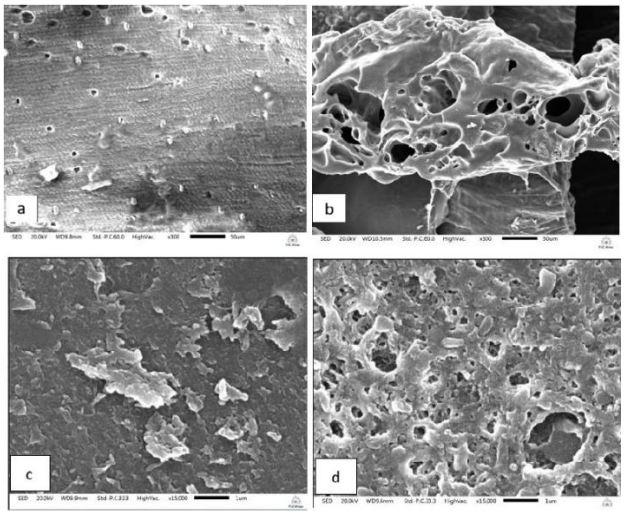


Figura 01: Registros em MEV: a – Bagaço de malte in natura (x300); b – Carvão ativado do bagaço de malte (x300); c – Superfície da membrana de OI pré-tratamento (x15000); d – Superfície da membrana de OI pós tratamento.
Fonte: pelo autor (2025)

O espectro de FTIR identificou com sucesso os agrupamentos químicos vitais, tais como hidroxilas características da umidade da biomassa e as estruturas alifáticas, lignínicas e carboxílicas.

Com relação à produção do carvão, o rendimento produtivo após a pirólise de 990g de bagaço de malte, obteve-se 31,7g de carvão ativado, o que confere uma eficiência volumétrica aproximada de 3,72% no forno. Como a higienização puramente à base de água demonstrou um alto consumo elétrico e de insumos, implementou-se com sucesso a lavagem rápida de neutralização com ácido clorídrico (0,1 mol/L), a qual preservou os aspectos adsortivos do material e estabilizou seu pH final em torno de 8,3 e 8,4.

Na caracterização do carvão ativado obtido, diferente da biomassa inicial, a análise termogravimétrica mostrou estabilidade em altas temperaturas devido à eliminação anterior das substâncias voláteis durante a pirólise. No MEV e EDS, as cavidades e os poros se apresentaram de maneira irregular, mais abertos e fragmentados, enquanto o percentual de carbono atingiu 79,8%, o que comprova a efetividade da conversão para matriz carbonácea. A análise via FTIR indicou o enfraquecimento acentuado das bandas moleculares primárias do bagaço após a calcinação, reforçando a degradação e destruição dos grupos funcionais orgânicos originais. O comportamento em laboratório definiu que o Ponto de Carga Zero desse carvão se assenta no pH 8,2. Através da análise de imagens focada na porosidade superficial, conforme a figura 01 apresentada anteriormente, aferiu-se que 18,73% de toda a área topográfica analisada é formada por poros, classificando-os dimensionalmente como macroporos estruturais essenciais para a entrada dos contaminantes no núcleo da peça.

Na reciclagem da membrana utilizou-se o ataque por solução oxidativa de hipoclorito de sódio, que conteve 2,48% de concentração de cloro livre, operando no decorrer de cinco horas de submersão até alcançar uma intensidade total de exposição calculada em 137.500 ppm*h. Já na caracterização da membrana, com os testes mencionados anteriormente, foi possível avaliar a qualidade obtida. Pelo teste de permeabilidade determinou-se um fluxo hidráulico que ficou compatível com o das versões disponíveis no mercado para as membranas de nanofiltração, beirando a ordem de 1,04 L/(m².h.bar). O teste de rejeição de sal reportou índices de aproximadamente 40% para íons monovalentes (NaCl), posicionando o desempenho de rejeição desta membrana como uma filtragem do tipo nanofiltração. Nos parâmetros do teste de retenção a membrana reciclada deteve 66% das moléculas de Sulfato de Magnésio e 93,32% do corante azul de metileno, limitando seu escopo de separação química a solutos localizados entre 120 Da e 370 Da. O exame termogravimétrico não revelou anomalias consideráveis entre a amostra intacta e a oxidada, pois o cloro age somente raspando uma margem insignificante da espessura global. Apesar disso, as fotos do MEV e a espectroscopia de EDS registraram profundas escoriações, rugosidades e buracos de erosão, somados à substituição expressiva do nitrogênio pelo cloro. Na aferição por ângulo de contato descobriu-se que a degradação ocorreu de forma desregulada, já que o meio da membrana ficou muito mais agredida pelo agente químico do que as extremidades periféricas do material.

Para homologar a eficiência tecnológica da rota reciclada com a versão nova comercial, submeteram-se fluxos de 4 litros de 28 mg/L de azul de metileno à bateria de tratamentos. Ao injetar a solução pela coluna base de referência usando 4g do adsorvente comercial, foram retidos 52,5% do corante. Quando os reatores operaram com os mesmos 4 gramas da versão reciclável extraída do resíduo do malte, foi registrada uma melhora, descontaminando quase 88,9% de todo o componente cromático de uma só vez. Independentemente de qual foi a tecnologia aplicada na coluna (comercial ou o carvão de bagaço), a finalização em ambos os trens operada através dos poros da membrana reciclável ou não-reciclável eliminou todo e qualquer traço remanescente do azul de metileno, rendendo correntes purificadas no final do tratamento, conforme figura 02 a seguir.

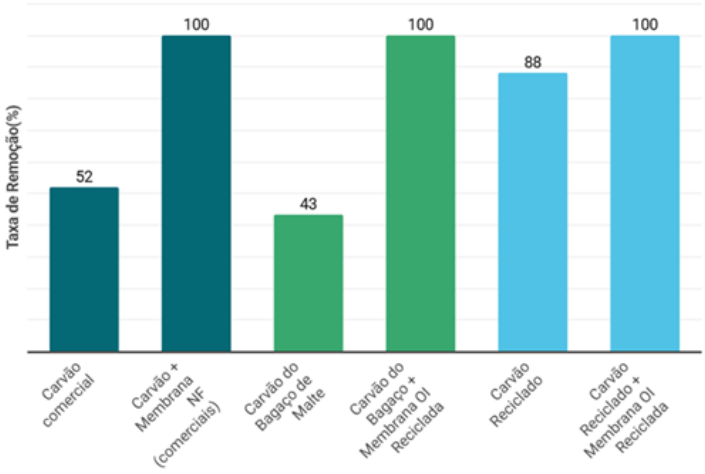


Figura 02: Análise de resultado comparativo da remoção dos efluentes sintéticos nas diferentes rotas de tratamento. Fonte: pelo autor (2025)

Considerações Finais

O processo de reciclagem, feito através do ataque oxidativo com hipoclorito de sódio (NaClO), resultou em uma membrana com características intermediárias entre a nanofiltração e a ultrafiltração. Esta membrana conseguiu rejeitar 50% de sais monovalentes (NaCl), 66% de sais bivalentes ($MgSO_4$) e eliminar 100% do azul de metileno. As análises de (MEV) e Termogravimetria confirmaram a degradação parcial e controlada da fina camada de poliamida, que era o objetivo da reciclagem.

Ficou comprovado que o carvão ativado de biomassa possui um potencial adsortivo promissor. Apesar de o material produzido ter apresentado uma densidade menor do que o carvão ativado comercial, sua eficiência na remoção do corante foi superior quando comparada utilizando a mesma massa de adsorvente.

Destacam-se como possibilidades de investigação adicional: a influência do pH do meio em relação ao Ponto de Carga Zero (pH-PCZ) do carvão, a determinação da área superficial real e do tamanho das partículas, o ajuste do fluxo de alimentação do sistema, a avaliação da uniformidade da superfície da membrana (através da hidrofobicidade) e a descoberta da intensidade ótima de contato para a oxidação da membrana.

Os resultados atestam o potencial técnico e ambiental de se reaproveitar membranas degradadas e resíduos industriais (como o malte) para a criação de estações de tratamento avançado sustentáveis. Essa integração não apenas valoriza subprodutos e impulsiona a economia circular, mas também se consolida como uma rota viável e sustentável, com perspectivas muito promissoras para futuras aplicações tanto em escala laboratorial quanto industrial.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais pelo apoio à pesquisa, em especial pela concessão de recursos do projeto FIP 2026/35379.

Referências Bibliográficas

BRAGA, D. S.; PINHEIRO, F. J. C.; SANT'ANA, M. C.; ALMEIDA, M. M.; KINOSHITA, A.; PAIVA, F. F. G.; TAMASHIRO, J. R. Tratamento de efluentes: sistemas convencionais e avançados, desafios e perspectivas para sustentabilidade. *In:* PACHECO, Clécia Simone Gonçalves Rosa; SANTOS, Reinaldo Pacheco dos (Orgs.). **Ciências e tecnologia das águas: inovações e avanços em pesquisa.** Vol. 1. 1. ed. Ponta Grossa: Atena Editora, 2023. p. 306-319. DOI: 10.37885/230312599.

MILDENBERG, Adrielly Nasario. **Obtenção de carvão ativado a partir de bagaço de malte e sua aplicação na remoção de azul de metileno.** 2019. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

NANDA, S. et al. **Characterization of North American Lignocellulosic Biomass and Biochars in Terms of their Candidacy for Alternate Renewable Fuels.** Bioenergy Research, v. 6, n. 2, p. 663–677, 2013.

SEIBEL, Fabio Ivan. **Reciclagem de membranas de osmose inversa por oxidação química e possíveis aplicações.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2021.