

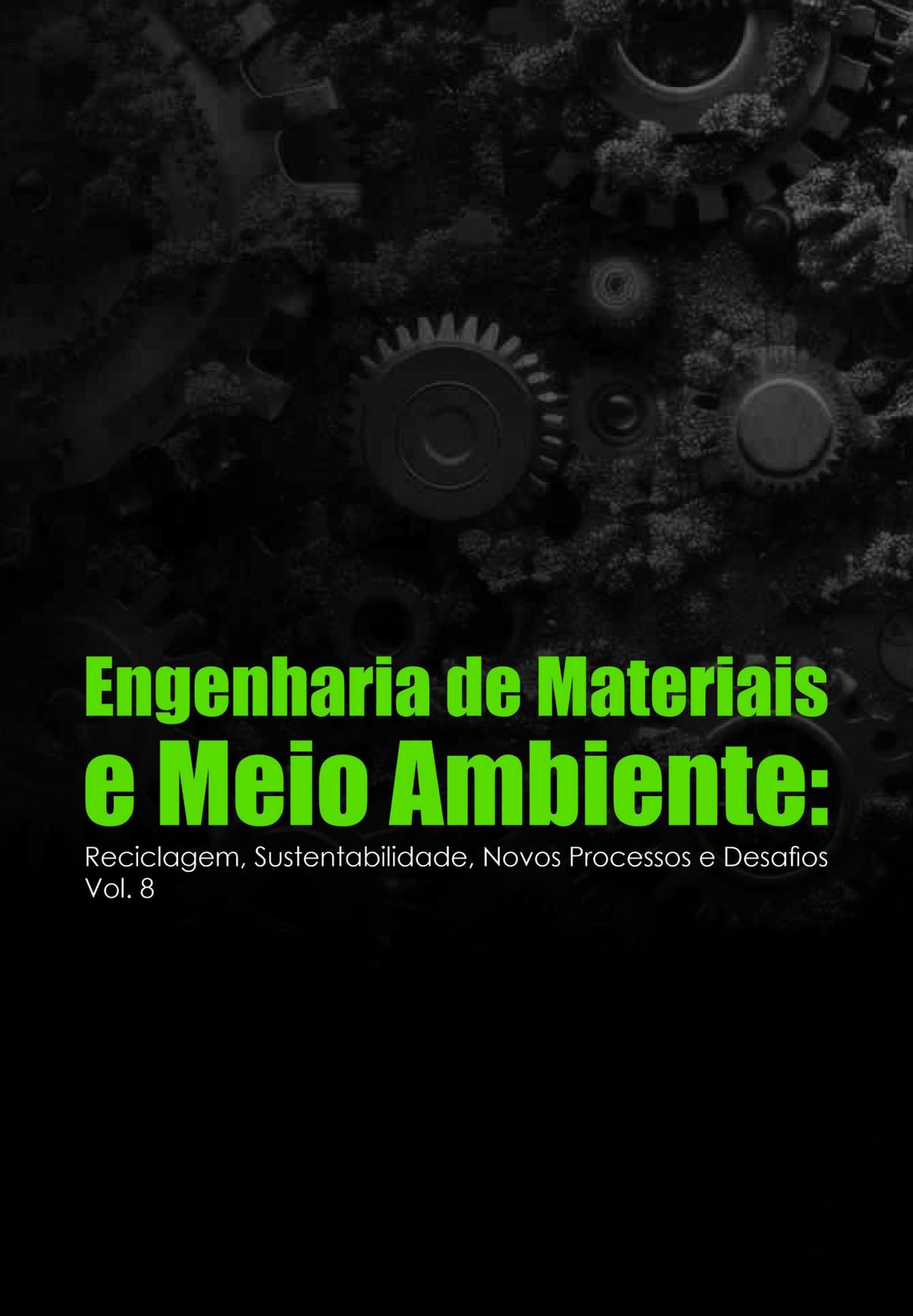
Engenharia de Materiais e Meio Ambiente:

Reciclagem, Sustentabilidade, Novos Processos e Desafios
Vol. 8

Jean Carlos Rodrigues
(Organizador)



AYA EDITORA
2025



Engenharia de Materiais e Meio Ambiente:

Reciclagem, Sustentabilidade, Novos Processos e Desafios
Vol. 8

Engenharia de Materiais e Meio Ambiente:

Reciclagem, Sustentabilidade, Novos Processos e Desafios
Vol. 8

Jean Carlos Rodrigues
(Organizador)



AYA EDITORA
2025

Direção Editorial

Prof.º Dr. Adriano Mesquita Soares

Organizador

Prof.º Me. Jean Carlos Rodrigues

Capa

AYA Editora©

Revisão

Os Autores

Executiva de Negócios

Ana Lucia Ribeiro Soares

Produção Editorial

AYA Editora©

Imagens de Capa

br.freepik.com

Área do Conhecimento

Engenharias

Conselho Editorial

Prof.º Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva (UNIDAVI)

Prof.ª Dr.ª Adriana Almeida Lima (UEA)

Prof.º Dr. Aknaton Toczec Souza (UCPEL)

Prof.º Dr. Alaerte Antonio Martelli Contini (UFGD)

Prof.º Dr. Argemiro Midonês Bastos (IFAP)

Prof.º Dr. Carlos Eduardo Ferreira Costa (UNITINS)

Prof.º Dr. Carlos López Noriega (USP)

Prof.ª Dr.ª Claudia Flores Rodrigues (PUCRS)

Prof.ª Dr.ª Daiane Maria de Genaro Chirolí (UTFPR)

Prof.ª Dr.ª Danyelle Andrade Mota (IFPI)

Prof.ª Dr.ª Déa Nunes Fernandes (IFMA)

Prof.ª Dr.ª Déborah Aparecida Souza dos Reis (UEMG)

Prof.º Dr. Denison Melo de Aguiar (UEA)

Prof.º Dr. Emerson Monteiro dos Santos (UNIFAP)

Prof.º Dr. Gilberto Zammar (UTFPR)

Prof.º Dr. Gustavo de Souza Preussler (UFGD)

Prof.ª Dr.ª Helenadja Santos Mota (IF Baiano)

Prof.ª Dr.ª Heloísa Thaís Rodrigues de Souza (UFS)

Prof.ª Dr.ª Ingridi Vargas Bortolaso (UNISC)

Prof.ª Dr.ª Jéssyka Maria Nunes Galvão (UFPE)

Prof.º Dr. João Luiz Kovaleski (UTFPR)

Prof.º Dr. João Paulo Roberti Junior (UFRR)

Prof.º Dr. José Enildo Elias Bezerra (IFCE)

Prof.º Dr. Luiz Flávio Arreguy Maia-Filho (UFRPE)

Prof.ª Dr.ª Marcia Cristina Nery da Fonseca Rocha Medina (UEA)

Prof.ª Dr.ª Maria Gardênia Sousa Batista (UESPI)

Prof.º Dr. Myller Augusto Santos Gomes (UTFPR)
Prof.º Dr. Pedro Fauth Manhães Miranda (UEPG)
Prof.º Dr. Rafael da Silva Fernandes (UFRA)
Prof.º Dr. Raimundo Santos de Castro (IFMA)
Prof.ª Dr.ª Regina Negri Pagani (UTFPR)
Prof.º Dr. Ricardo dos Santos Pereira (IFAC)
Prof.º Dr. Rômulo Damasclín Chaves dos Santos (ITA)
Prof.ª Dr.ª Silvia Gaia (UTFPR)
Prof.ª Dr.ª Tânia do Carmo (UFPR)
Prof.º Dr. Ygor Felipe Távora da Silva (UEA)

Conselho Científico

Prof.º Me. Abraão Lucas Ferreira Guimarães (CIESA)
Prof.ª Dr.ª Andreia Antunes da Luz (UniCesumar)
Prof.º Dr. Clécio Danilo Dias da Silva (UFRGS)
Prof.ª Ma. Denise Pereira (FASU)
Prof.º Dr. Diogo Luiz Cordeiro Rodrigues (UFPR)
Prof.º Me. Ednan Galvão Santos (IF Baiano)
Prof.ª Dr.ª Eliana Leal Ferreira Hellvig (UFPR)
Prof.º Dr. Fabio José Antonio da Silva (HONPAR)
Prof.ª Ma. Jaqueline Fonseca Rodrigues (FASF)
Prof.ª Dr.ª Karen Fernanda Bortoloti (UFPR)
Prof.ª Dr.ª Leozenir Mendes Betim (FASF)
Prof.ª Dr.ª Lucimara Glap (FCSA)
Prof.ª Dr.ª Maria Auxiliadora de Souza Ruiz (UNIDA)
Prof.º Dr. Milson dos Santos Barbosa (UniOPET)
Prof.ª Dr.ª Pauline Balabuch (FASF)
Prof.ª Dr.ª Rosângela de França Bail (CESCAGE)
Prof.º Dr. Rudy de Barros Ahrens (FASF)
Prof.º Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares (UFPI)
Prof.ª Dr.ª Silvia Aparecida Medeiros Rodrigues (FASF)
Prof.ª Dr.ª Sueli de Fátima de Oliveira Miranda Santos (UTFPR)
Prof.ª Dr.ª Tássia Patricia Silva do Nascimento (UEA)
Prof.ª Dr.ª Thaisa Rodrigues (IFSC)

© 2025 - AYA Editora

O conteúdo deste livro foi enviado pelos autores para publicação em acesso aberto, sob os termos e condições da Licença de Atribuição Creative Commons 4.0 Internacional (**CC BY 4.0**). Este livro, incluindo todas as ilustrações, informações e opiniões nele contidas, é resultado da criação intelectual exclusiva dos autores. Estes detêm total responsabilidade pelo conteúdo apresentado, que reflete única e inteiramente sua perspectiva e interpretação pessoal.

É importante salientar que o conteúdo deste livro não representa, necessariamente, a visão ou opinião da editora. A função da editora foi estritamente técnica, limitando-se aos serviços de diagramação e registro da obra, sem qualquer influência sobre o conteúdo apresentado ou as opiniões expressas. Portanto, quaisquer questionamentos, interpretações ou inferências decorrentes do conteúdo deste livro devem ser direcionados exclusivamente aos autores.

E576 Engenharia de materiais e meio ambiente reciclagem, sustentabilidade, novos processos e desafios [recurso eletrônico]. / Jean Carlos Rodrigues (organizador). -- Ponta Grossa: Aya, 2025. 197 p.

V. 8

Inclui biografia

Inclui índice

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN: 978-65-5379-817-5

DOI: 10.47573/aya.5379.2.474

1. Engenharia – Estudo e ensino. 2. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.) – Aspectos sociais. 3. Engenharia ambiental – Brasil. 4. Água - Reuso. 5. Águas residuais – Purificação. 6. Cooperativas de reciclagem – Brasil. 7. Resíduos como material de construção. 8. Materiais de construção - Reaproveitamento. 9. Construção civil. I. Rodrigues, Jean Carlos. II. Título

CDD: 620.11

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Bruna Cristina Bonini - CRB 9/1347

International Scientific Journals Publicações de Periódicos e Editora LTDA AYA Editora®

CNPJ: 36.140.631/0001-53

Fone: +55 42 3086-3131

WhatsApp: +55 42 99906-0630

E-mail: contato@ayaeditora.com.br

Site: <https://ayaeditora.com.br>

Endereço: Rua João Rabello Coutinho, 557
Ponta Grossa - Paraná - Brasil
84.071-150

SUMÁRIO

Apresentação..... XII

01

Mensuração do Índice de Sustentabilidade de um Sítio Agroecológico 13

Eduarda Grunwald Ceretta

Gabriela Giusmin Dejavitte

Mariluce Castanho Ferreira

Micael Benito Bourscheid Brum

Valter Antônio Senger

Alcione Aparecida de Almeida Alves

DOI: 10.47573/aya.5379.2.474.1

02

Indicadores de Sustentabilidade de uma Cooperativa de Catadores de Materiais Recicláveis.....30

Bruna Willig Kopplin

Jean Cláudio Radünz

João Fernando Medeiros Cardoso

Leandro Perius Heck

Rafael Franco Pires

Alcione Aparecida de Almeida Alves

DOI: 10.47573/aya.5379.2.474.2

03

Previsão da Emissão de Co₂ no Manejo de Solo Agrícola em Mato Grosso: Subsídios para Mitigação de Impactos Ambientais47

Bianca Monique Engels Oliveira

Carolina Mafini Domingues

Gabrielle Carvalho Bueno

Isabelly Rondon Borba

Nicolas Del Castanhel

DOI: 10.47573/aya.5379.2.474.3

04

Estudo de Caso sobre Reciclagem de Resíduos Sólidos na Construção Civil (RCC): Os Desafios da Cidade de Jaú.....65

Marcelo José Garcia

Pedro Aparecido Mariano

Ana Carolina Rodrigues Falcão

Marina Carboni

DOI: 10.47573/aya.5379.2.474.4

05

Produção e Descarte Ambiental de Plásticos: Conexões entre Clima, Biodiversidade e Saúde Global.....76

Emmanuel Romero Martins da Silva

Jair Henrique dos Passos Velozo

Eliana Cristina Barreto Monteiro
Galba Maria de Campos-Takaki

DOI: 10.47573/aya.5379.2.474.5

06

Resíduos Plásticos nos Oceanos: Uma Ameaça Global e os Desafios da Sustentabilidade Ambiental 92

Gabriela Oliveira da Silva
Virginia da Silva Batista
Adriana Ferreira de Souza
Marcos Antônio Barbosa de Lima
Rosileide Fontenele da Silva Andrade
Galba Maria de Campos-Takaki

DOI: 10.47573/aya.5379.2.474.6

07

Produção de Modelo Conceitual de Solos e Águas Subterrâneas Potencialmente Contaminados por Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos..... 111

Miqueias de Castro da Silva
Amanda Mendonça Azambuja
Kauanny Schirmer Siveris
Kalyem Rafaela Antunes dos Santos
Alcione Aparecida de Almeida Alves

DOI: 10.47573/aya.5379.2.474.7

08

Tratamento de Águas Residuais por Wetlands Comparando os Sistemas de Leitos Construídos, Sistema Automatizado e Wetland Compacta 125

Leidson Ramos de Sousa
Adriana Ferreira de Souza
Sergio Carvalho de Paiva
Eduardo Antônio Maia Lins
Valderice Pereira Alves Baydum
Galba Maria de Campos Takaki

DOI: 10.47573/aya.5379.2.474.8

09

Características, Toxicidade e Processos de Remoção de Metais Pesados no Ambiente..... 139

André Felipe Santos Lima
Adeildo de Oliveira Filho
Raquel Luiza Alves de Araújo
Eliana Cristina Barreto Monteiro
Galba Maria de Campos Takaki

DOI: 10.47573/aya.5379.2.474.9

10

Contribuições ao Estudo Anatômico do Caimbé (*Curatella Americana*) 155

Diego Lima de Souza Cruz
Anna Bárbara de Souza Cruz

DOI: 10.47573/aya.5379.2.474.10

11

Análise de Processo Erosivo em Talude Urbano-Ambiental na Sub-Bacia do Igarapé Água Branca – Manaus/AM 170

Djalma Almeida Araújo Júnior

DOI: 10.47573/aya.5379.2.474.11

12

Arte e Meio Ambiente: Uma Abordagem Sustentável na Prática Artística 178

Sebastião Carlos Galdêncio

DOI: 10.47573/aya.5379.2.474.12

Organizador 187

Índice Remissivo 188

APRESENTAÇÃO

As transformações nas relações entre sociedade, natureza e tecnologia, especialmente nas últimas décadas, impõem desafios significativos aos campos da engenharia e da gestão ambiental. Este volume se insere nesse contexto ao reunir investigações que dialogam com a sustentabilidade a partir da ótica da engenharia de materiais e do meio ambiente, articulando conhecimento técnico, responsabilidade socioambiental e práticas voltadas à realidade brasileira.

Os temas abordados se concentram na análise da sustentabilidade aplicada a sistemas produtivos diversos, desde a agricultura familiar e a gestão de resíduos sólidos até o reúso de recursos hídricos e o controle da poluição ambiental. Ao longo dos capítulos, evidenciam-se esforços que integram avaliação técnica, indicadores ambientais e viabilidade econômica, permitindo uma compreensão ampliada das interações entre processos produtivos e impactos ambientais. A contribuição deste livro se reflete também no modo como articula estudos sobre práticas agroecológicas, atividades de cooperativas de catadores, resíduos na construção civil e poluição marinha, entre outros. Esses enfoques se conectam a partir do princípio da interdependência entre os sistemas naturais e as decisões humanas, abordando desde o ciclo de vida dos materiais até as consequências globais do descarte inadequado.

Além disso, destaca-se o interesse por soluções descentralizadas, como o uso de wetlands construídos para tratamento de efluentes, e a aplicação de técnicas alternativas no monitoramento da qualidade ambiental. Essa diversidade de abordagens metodológicas reflete a busca por caminhos adaptados às especificidades locais, respeitando os limites ecológicos e promovendo práticas sustentáveis em múltiplas escalas. O conjunto de trabalhos também incorpora reflexões sobre o papel da ciência e da cultura na construção de novas perspectivas. A inclusão de estudos anatômicos de espécies nativas e a abordagem da arte como instrumento de sensibilização ambiental reforçam a amplitude da proposta do livro, abrindo espaço para olhares que transcendem a tecnicidade e valorizam saberes complementares.

Assim, esta obra oferece subsídios para pesquisadores, estudantes e profissionais interessados na interface entre engenharia, meio ambiente e sustentabilidade, fomentando análises críticas e informadas que contribuam para o avanço de práticas mais responsáveis, contextualizadas e integradas às realidades locais e globais.

Boa leitura!



Mensuração do Índice de Sustentabilidade de um Sítio Agroecológico

Measuring the Sustainability Index of an Agroecological Site

Eduarda Grunwald Ceretta

Gabriela Giusmin Dejavitte

Mariluce Castanho Ferreira

Micael Benito Bourscheid Brum

Valter Antônio Senger

Alcione Aparecida de Almeida Alves

Resumo: Diante do agravamento das crises ambientais, o desenvolvimento sustentável emerge como uma estratégia essencial para promover transformações que assegurem o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) até 2030, estando a produção de alimentos por meio da agricultura familiar intrínseca ao atendimento destes ODS. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo averiguar e mensurar os índices de sustentabilidade do Sítio Agroecológico com Certificação Orgânica, localizado no estado do Rio Grande do Sul. Para tanto, foram realizadas análises de dados primários e secundários, de caráter documental, entre os meses de março e maio de 2025, além da observação participante realizada no mês de abril. Os resultados indicaram um índice de sustentabilidade classificado como Desejável (2,65), considerando uma escala de 1 a 3, o que demonstra que o Sítio adota práticas coerentes com os princípios da agroecologia e da conservação ambiental, bem como uma gestão eficiente dos recursos ambientais da propriedade. Destacam-se, entre os indicadores de sustentabilidade que mais contribuíram para esses resultados, a presença de área de preservação permanente, o uso de adubação verde, a rotação de culturas e a consorciação de culturas/plantas. O Sítio desempenha um papel significativo do ponto de vista ambiental e socioeconômico, ao contribuir para a geração de renda no meio rural e estimular o consumo de alimentos saudáveis, produzidos de forma ambientalmente sustentável.

Palavras-chave: meio ambiente; sustentabilidade ambiental; indicador ambiental; meio rural.

Abstract: In view of the worsening environmental crises, sustainable development emerges as an essential strategy to promote transformations that ensure the fulfillment of the Sustainable Development Goals (SDGs) by 2030, with food production through family farming being intrinsic to meeting these SDGs. In this context, this study aimed to investigate and measure the sustainability indexes of the Organic Certified Agroecological Farm, located in the state of Rio Grande do Sul. To this end, analyses of primary and secondary data, of a documentary nature, were carried out between the months of March and May 2025, in addition to participant observation carried out in April. The results indicated a sustainability index classified as Desirable (2.65), considering a scale of 1 to 3, which demonstrates that the Farm adopts practices consistent with the principles of agroecology and environmental conservation, as well as efficient management of the property's environmental resources. The sustainability indicators that most contributed to these results include the presence of a

permanent preservation area, the use of green manure, crop rotation and the intercropping of crops/plants. The site plays a significant role from an environmental and socioeconomic point of view, contributing to the generation of income in rural areas and encouraging the consumption of healthy foods, produced in an environmentally sustainable manner.

Keywords: environment; environmental sustainability; environmental indicator; rural environment.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável visa equilibrar as dimensões ambiental, social e econômica. Nos últimos anos, essa abordagem tem se tornado ainda mais relevante diante da intensificação das crises climáticas, da perda de biodiversidade e das desigualdades sociais. Conforme apontado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022), a sustentabilidade ambiental assume um papel central para integrar os aspectos ético, científico e prático, mobilizando governos, empresas e a sociedade civil em torno de estratégias que assegurem a integridade dos ecossistemas e o bem-estar das futuras gerações. A incorporação de práticas sustentáveis nos sistemas produtivos é vista não apenas como uma alternativa viável, mas como uma necessidade estratégica para mitigar os impactos ambientais, promover a justiça social e assegurar a resiliência das economias locais e globais.

A Agricultura Orgânica representa uma alternativa sustentável aos impactos da agricultura convencional, promovendo equilíbrio ambiental, valorização dos saberes locais e melhoria na qualidade de vida dos produtores e consumidores (Moura *et al.*, 2022). E práticas como adubação verde e controle biológico contribuem para a resiliência dos sistemas frente às mudanças climáticas (Cidon *et al.*, 2021).

Para além disso, no campo social, aliada à agricultura orgânica, destaca-se o papel da aprendizagem coletiva, que fortalece a identidade agroecológica e facilita a adoção de práticas sustentáveis por meio da troca de experiências entre agricultores (Cento; Bahsi, 2025). Apesar dos desafios, como acesso a tecnologias e políticas públicas, a agricultura orgânica se apresenta como um caminho promissor para o desenvolvimento rural sustentável, além de que, a avaliação da sustentabilidade em sistemas agrícolas orgânicos e certificados tem evoluído com o desenvolvimento de índices que integram dimensões ambientais, sociais e econômicas (Seufert; Ramankutty, 2022).

Os indicadores de sustentabilidade são ferramentas essenciais para avaliar o desempenho ambiental, social e econômico de sistemas produtivos, permitindo a monitorização e a comparação de práticas sustentáveis. Esses indicadores podem incluir métricas como pegada de carbono, eficiência no uso da água, biodiversidade, equidade social e viabilidade econômica. A adoção de indicadores é fundamental para orientar políticas públicas e estratégias corporativas, garantindo que o desenvolvimento sustentável seja mensurável e verificável. Estudos recentes destacam a importância de abordagens integradas, como os Objetivos

de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, para alinhar indicadores locais e globais (GRI, 2020).

Estudos recentes destacam que a agricultura orgânica certificada apresenta menores níveis de contaminação por pesticidas e maior sequestro de carbono no solo, embora ainda enfrente desafios em escalabilidade e custos de transição (Seufert; Ramankutty, 2022).

No Brasil, a certificação orgânica por auditoria é o modelo convencional de garantia da qualidade orgânica, realizada por certificadoras credenciadas pelo Ministério da Agricultura (MAPA), que inspecionam periodicamente as propriedades para garantir o cumprimento das normas, como a proibição de agrotóxicos, transgênicos e fertilizantes sintéticos (MAPA, 2022). Há também a certificação participativa, que envolve produtores, consumidores e técnicos em um processo colaborativo de verificação. Nesse sentido, destacam-se iniciativas como a Rede Ecovida de Agroecologia, que atua principalmente na região Sul do país, e por meio de grupos locais, promove avaliações coletivas, visitas periódicas e trocas de experiências, fortalecendo a relação entre agricultores e comunidade, reduzindo custos e aumentando a transparência do processo (Rede Ecovida, 2023).

A manutenção de uma certificação orgânica em propriedades rurais exige a adoção de práticas sustentáveis mensuráveis por meio de indicadores ambientais, sociais e econômicos. O processo de avaliação inicia-se com a seleção criteriosa desses indicadores como qualidade do solo, biodiversidade e condições de trabalho, os quais servem de base para a construção de um índice de sustentabilidade ambiental. Esse índice não apenas valida a conformidade com os requisitos orgânicos, mas também orienta melhorias contínuas na gestão da propriedade. Nesse contexto, este relatório técnico tem como objetivo averiguar e mensurar os índices de sustentabilidade do Sítio Agroecológico com certificação orgânica, localizado na região noroeste do Rio Grande do Sul, identificando avanços e oportunidades de otimização na propriedade.

O desenvolvimento deste estudo justifica-se pela relevância de identificar avanços e de apontar possibilidades de aprimoramento no sistema de produção de alimentos orgânicos. Ademais, a experiência proporcionada pela análise documental, aliada às observações e reflexões realizadas ao longo do processo, que envolveu não apenas aspectos teóricos, mas também práticos, enriqueceu significativamente a formação dos pesquisadores envolvidos na temática.

Neste sentido, o presente estudo tem como objetivo averiguar e mensurar os índices de sustentabilidade de um Sítio Agroecológico, localizado na região Noroeste do Rio Grande do Sul, realizado por meio da análise de dados primários e secundários, de caráter documental, utilizando-se técnicas de pesquisa documental e observação participante.

MATERIAIS E MÉTODOS

Histórico e Caracterização do Empreendimento

A propriedade adota técnicas de cultivo orgânico, manejo ecológico do solo e valorização da biodiversidade, priorizando alimentos livres de agrotóxicos e produzidos com responsabilidade socioambiental. O Sítio oferece alguns atrativos, como Trilha Ecológica em área de mata nativa preservada, permitindo aos visitantes uma experiência junto à natureza local por meio de observação da fauna e flora características da região. O percurso é finalizado com a contemplação de um riacho com uma pequena queda d'água.

Como medida de proteção à produção orgânica e de preservação da qualidade ambiental, a propriedade adota práticas agrícolas sustentáveis, entre elas a não utilização de agrotóxicos ou insumos químicos sintéticos. Dentre as principais estratégias implementadas, destaca-se a utilização de uma cortina vegetal de proteção, composta por três barreiras sucessivas formadas por diferentes espécies, com ênfase para as bananeiras, que somam mais de 1.500 pés. Essa estrutura atua como barreira física e biológica, contribuindo para a redução da deriva de contaminantes externos, o controle natural de pragas e a conservação da biodiversidade local.

A propriedade conta, um espaço dedicado à preservação de sementes nativas, resgatando tradições agrícolas e promovendo a biodiversidade. Além disso, dispõe de uma estufa de plantas que adota um sistema natural de cultivo, integrando uma grande diversidade de ervas medicinais. Esse espaço oferece aos visitantes a oportunidade de aprender sobre as propriedades e os usos dessas plantas, tanto para consumo quanto para a comercialização de diversas espécies naturais. A propriedade participa de feiras locais, oferecendo uma variedade de produtos orgânicos, como alface, cenoura, beterraba, quiabo, batata-doce, mandioca, milho, tomate, abóbora e feijão.

O Sítio Agroecológico conta ainda com um Espaço Gastronômico que oferece um café colonial composto por pratos saudáveis e saborosos, elaborados com ingredientes frescos, orgânicos e de alto valor nutricional. Um dos destaques é o uso de Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANCs), que proporcionam sabores únicos. Nesse ambiente, os visitantes não apenas degustam alimentos de qualidade, mas também têm a oportunidade de conhecer de perto o cultivo dos produtos, todos com certificação orgânica.

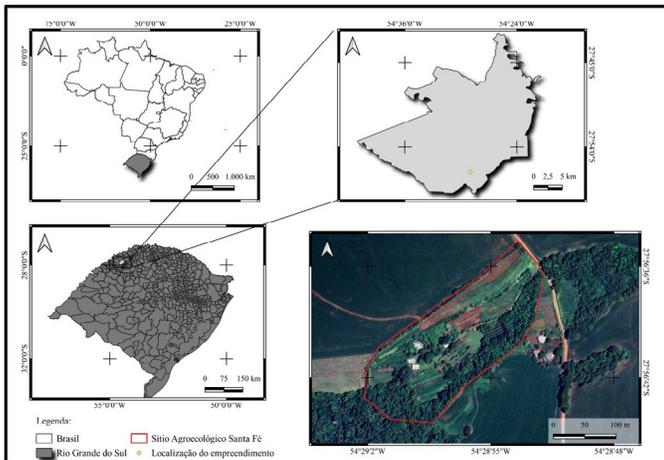
O turismo ecológico desenvolvido no Sítio Agroecológico com Certificação Orgânica é voltado a estudantes, famílias e demais interessados, com foco na educação ambiental e na promoção de práticas sustentáveis. A programação inclui sessões educativas e atividades interativas sobre biodiversidade, conservação dos recursos naturais e princípios da agroecologia. Durante as visitas, os participantes têm a oportunidade de acompanhar demonstrações práticas de técnicas sustentáveis de cultivo, como a utilização de barreiras vegetais no controle biológico de pragas

e a adoção de estratégias para atração de polinizadores. Essas ações contribuem diretamente para a manutenção da saúde do solo, o equilíbrio do ecossistema e o fortalecimento da produção orgânica.

O Sítio, além de ser um exemplo de práticas sustentáveis e educação ambiental, também preserva a história da família e da região por meio de um espaço afetivo ou mini museu em processo de desenvolvimento. Embora ainda em construção, o espaço já conta com um Museu, com diversas peças antigas: o acervo inclui quadros, malas, câmeras fotográficas, ferro de passar roupa e uma máquina de escrever, entre outros objetos que marcaram diferentes épocas da família. Esses itens, que remontam a épocas passadas, são valiosos testemunhos da cultura e das tradições locais, oferecendo uma oportunidade única de conhecer o legado da família e sua conexão com o território ao longo dos anos.

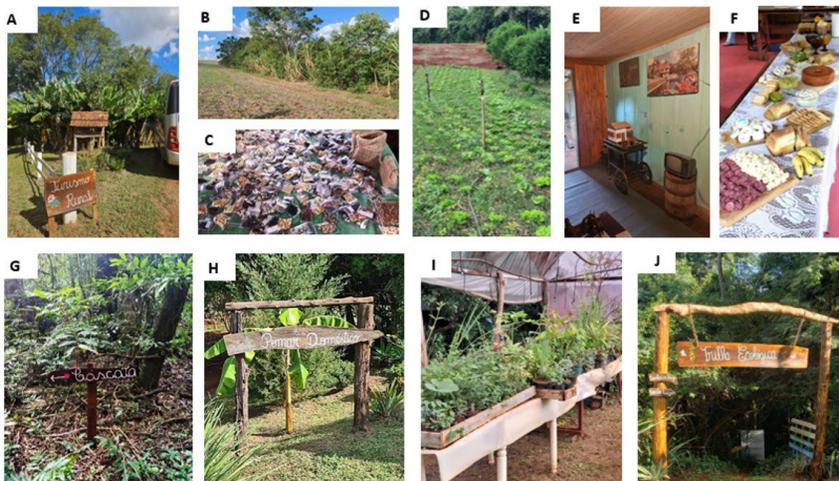
Na Figura 1 está representado o mapa de localização do Sítio Agroecológico, o qual está organizado em diferentes escalas, permitindo a visualização hierárquica do local: desde sua inserção no território nacional e estadual até a identificação detalhada da área do empreendimento. Na imagem de satélite, a área do empreendimento está delimitada, evidenciando sua inserção em meio a vegetação nativa e áreas de uso agrícola.

Figura 1 - Mapa de localização geográfica do Sítio Agroecológico.



Fonte: autoria própria, 2025.

Na figura 2 estão apresentadas diferentes áreas e elementos do Sítio Agroecológico, com o objetivo de apresentar visualmente as características estruturais, produtivas e paisagísticas da propriedade. Esses registros fotográficos foram realizados *in loco* e evidenciam aspectos como a entrada da propriedade, áreas de cultivo, espaços de convivência, sinalizações e estruturas de apoio, reforçando o caráter agroecológico, educativo e turístico do empreendimento.

Figura 2 - Registros fotográficos da propriedade.

Fonte: autoria própria, 2025.

Na figura 2, verificam-se as fotografias de A a J, registradas durante a pesquisa. A fotografia A mostra a entrada da propriedade do sítio agroecológico; a B, uma barreira do cortinamento verde utilizado no local. Na fotografia C, visualiza-se o espaço destinado à comercialização de sementes crioulas; na D, observam-se as hortaliças cultivadas. A fotografia E destaca um recorte interno do Mini Museu da propriedade; a F, o café colonial servido aos visitantes. Na fotografia G, encontra-se a sinalização do caminho que leva à Cascata, enquanto a H mostra a entrada para o Pomar Doméstico. Na fotografia I, vê-se a estufa de plantas medicinais e, por fim, na J, a entrada da trilha ecológica.

Agricultura Familiar e a Produção Orgânica

Destaca-se que somente os familiares compõem a equipe de trabalho no empreendimento, o que indica um limitador na condição de atendimento aos visitantes, dificultando a possibilidade de ampliação.

De acordo com Borges *et al.* (2020), a agricultura familiar é um modelo de produção rural baseado no trabalho e na gestão realizados predominantemente pelos membros da própria família. Presente em pequenas e médias propriedades, esse tipo de agricultura é responsável por cerca de 70% dos alimentos consumidos no Brasil, contribuindo diretamente para a segurança alimentar e o desenvolvimento sustentável.

Caracteriza-se pela diversidade produtiva, uso de práticas sustentáveis, preservação de saberes tradicionais e valorização da cultura local. Além disso, promove a geração de emprego e renda no campo, fixando as famílias nas zonas rurais. No Brasil, é reconhecida legalmente pela Lei nº 11.326/2006, que garante acesso a políticas públicas específicas, como o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF). Trata-se de um setor estratégico para a economia e para a soberania alimentar do país.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Índice de Sustentabilidade do Sítio Agroecológico com Certificação Orgânica

O Índice de Sustentabilidade considerou para o referido local, as dimensões ambientais e econômicas, conforme pode ser visto nos quadros 2 e 3.

Quadro 2 – Índice de sustentabilidade em propriedade rural de agricultura familiar – ambiental.

| | Indicadores | Parâmetros | | | Índice parcial |
|------------|---------------------------------|--|----------------------------------|--|----------------|
| | | 1 | 2 | 3 | |
| Ambientais | Possui APP ou reserva legal | Não possui | < 50% de APP ou RL protegida | > 50% de APP ou RL protegida | 3 |
| | Animais Silvestres | Não há população | Pouca população | Alta população | 2 |
| | Água para agricultura | Se desconhece as características físico-químicas e microbiológicas | Conhece a qualidade da água | A água é tratada ou possui qualidade suficiente para tal fim | 1 |
| | Insumos | Mineral | Mineral +orgânico | Orgânico | 2 |
| | Uso de adubação verde | Não faz | Esporadicamente | Faz com frequência | 3 |
| | Rotação de culturas | Não faz | Alguns sistemas | Faz em todos os sistemas | 3 |
| | Diversidade de culturas | Baixa | Média | Alta | 3 |
| | Consortação de culturas/plantas | Não faz | Em um dos sistemas | Faz em todos os sistemas | 3 |
| | Compactação do solo | Grande parte da área | Pequena parte da área | Não tem | 3 |
| | Quebra ventos | Não tem | Há nas áreas de cultivo | Em toda a área | 3 |
| | Cobertura do solo | Solo exposto | Apenas c/ cultivos | Cobertura em todo o ano | 3 |
| | Defensivos químicos | Todas as culturas | Grandes culturas | Não faz/defensivos orgânicos | 3 |
| | Processo erosivo | Grandes áreas | Pequenas áreas, correção simples | Não tem | 2 |
| | Controle de plantas espontâneas | Herbicida | Capina + herbicida | Cobertura + capina | 3 |
| | Implementos agrícolas usados | Modo intensivo | Manual | Quando necessário | 3 |
| | Turismo Rural | Não se aplica | até 20 pessoas | acima de 20 pessoas | 3 |

| | | | | |
|---|---|---|---|-----------|
| Uso de EPI's | Não possui | Quando necessário | Sempre | 2 |
| Certificação Orgânica | Não possui | Em encaminhamento | Possui | 3 |
| Criação de animais para abate e consumo / Agroindústria | Não se aplica | Abastece parcialmente | Abastece totalmente | 2 |
| Resíduos Orgânicos da Cozinha | Queimado | Lixo comum | Compostagem | 3 |
| CAR (Cadastro Ambiental Rural) | Não possui | Informação desconhecido | Possui | 3 |
| Aproveitamento de resíduos das culturas | Não se faz | Alguns materiais | Sempre se faz | 3 |
| Áreas degradadas | Várias | Algumas | Não há | 3 |
| Agregação de valor | Não realiza | Realiza em parte da produção | Realiza em toda a produção | 3 |
| Média | | | | 2,7 |
| Grau de sustentabilidade ambiental | 1 a 1,6 (grau crítico de sustentabilidade) | 1,7 a 2,3 (grau aceitável de sustentabilidade) | 2,4 a 3 (grau desejável de sustentabilidade) | Desejável |

Fonte: autoria própria, 2025.

Quadro 3 – Índice de sustentabilidade em propriedade rural de agricultura familiar – econômica.

| | Indicadores | Parâmetros | | | Índice parcial |
|------------|-----------------------------|-------------------|------------------------------|--|----------------|
| | | 1 | 2 | 3 | |
| Econômicos | Acesso ao PRONAF | Nunca acessou | Pretende acessar | Já acessou | 3 |
| | Comercialização de produtos | Com intermediário | Intermediário + venda direta | Venda direta (feiras, local de produção, etc.) | 3 |
| | Origem animal | Com intermediário | Intermediário + venda direta | Venda direta (feiras, local de produção, etc.) | 3 |
| | Origem vegetal | Com intermediário | Intermediário + venda direta | Venda direta (feiras, local de produção, etc.) | 3 |
| | Infraestrutura | | | | |
| | Sede/Residência | Não adequada | Precisa de adequações | Adequada | 3 |
| | Visitantes | Não adequada | Precisa de adequações | Adequada | 3 |
| | Hospedagem | Não Possui | Precisa de adequações | Possui | 1 |
| | Acessibilidade a banheiros | Não Possui | Precisa de adequações | Suficiente | 2 |

| | | | | |
|---|--|--|--|-----------|
| Animais | Não adequada | Precisa de adequações | Adequada | 3 |
| Produtos orgânicos | Não Possui | Insuficiente | Suficiente | 3 |
| Mão de obra terceirizada | Não há | Em algumas atividades | Para todas as atividades | 1 |
| Assistência técnica | Raramente | Esporadicamente | Frequentemente | 3 |
| Participação de Cooperativas e/ou Associações | Não participa | Pretende participar | Participa | 3 |
| Média | | | | 2,6 |
| Grau de sustentabilidade econômica | 1 a 1,6 (grau crítico de sustentabilidade) | 1,7 a 2,3 (grau aceitável de sustentabilidade) | 2,4 a 3 (grau desejável de sustentabilidade) | Desejável |

Fonte: autoria própria, 2025.

O índice de sustentabilidade ambiental foi elaborado com base nos diversos indicadores mostrados no Quadro 2, que refletem o grau de comprometimento com práticas sustentáveis. O primeiro aspecto analisado foi a presença de Áreas de Preservação Permanente (APP), ou Reserva Legal (RL), instituídas pelo Código Florestal em 1965, cuja manutenção é essencial para preservar nascentes, biodiversidade e prevenir a erosão (Oliveira, Francisco; Bohrer, 2021). A pontuação atribuída foi máxima (3), demonstrando o cumprimento da legislação ambiental. Quanto à presença de animais silvestres, a população foi considerada baixa, uma vez que não foram observadas muitas espécies de fauna no momento da aula de campo.

A água utilizada para irrigação na agricultura é oriunda de açude, e se desconhece as características físico-químicas e microbiológicas. Por isso recebeu a pontuação baixa (1), pois sugere-se melhorias nesse quesito. Quanto aos insumos utilizados, a propriedade não utiliza defensivos químicos e opta por alternativas orgânicas, o que reforça o compromisso ambiental. Observa-se o uso combinado de adubos minerais e orgânicos, calda bordalesa, calda sulfocálcica, que, conforme a Embrapa (2015), são usadas no controle de fungos, ácaros, e outros insetos sugadores de hortas e de pomares, por conter o enxofre e o cálcio. A adoção frequente da adubação verde recebeu pontuação máxima e é uma prática muito positiva, pois enriquece o solo naturalmente.

A rotação de culturas também obteve nota máxima e contribui para o controle de pragas, a saúde do solo e a resiliência produtiva. A diversidade de espécies cultivadas foi considerada alta, o que também resultou na nota máxima. A consorciação de culturas, presente em todos os sistemas da propriedade, reforça as boas práticas agroecológicas e também recebe pontuação máxima, assim como a ausência de compactação do solo, que garante maior infiltração de água e proteção para o solo.

A presença de quebra-ventos em toda a área cultivada foi outro destaque positivo, protegendo os cultivos contra a deriva de agrotóxicos. A cobertura do solo

durante todo o ano também foi considerada adequada e recebeu a maior pontuação, mostrando atenção à conservação do solo e prevenção da erosão. Embora tenham sido identificadas pequenas áreas com vestígios de processo erosivo, o gestor da propriedade explicou que tais marcas decorrem do revolvimento realizado na terra e não representam um problema

Com relação ao item “controle de plantas espontâneas” é feito com cobertura vegetal e capina manual, o que indica práticas ecológicas e sustentáveis, com nota máxima. O uso de implementos agrícolas é feito apenas quando necessário e por isso também foi bem avaliado, pois reduz impactos no solo e economiza recursos.

O turismo rural, de acordo com a classificação do quadro 2, na propriedade atende a mais de 20 pessoas e recebeu nota máxima, indicando potencial de diversificação de renda e valorização das atividades realizadas na propriedade. Em relação à segurança do trabalho, o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) ocorre apenas quando necessário, o que é positivo, pois indica que os trabalhos realizados são considerados de baixo risco. No entanto, esse aspecto ainda pode ser aprimorado, razão pela qual a pontuação atribuída foi intermediária. Medidas de prevenção de acidentes, como o uso de perneiras e luvas durante a roçada, que ajudam a evitar picadas de animais, além de vestimentas que protegem contra insetos, contribuíram para aumentar a segurança nas atividades realizadas.

O item “certificação orgânica” está presente nos produtos comercializados e isso reflete o compromisso da propriedade com práticas sustentáveis reconhecidas. A criação de animais e a agroindústria abastecem as necessidades, demonstrando integração produtiva, autonomia alimentar e dependência externa apenas para produtos industrializados. Os resíduos orgânicos da cozinha são destinados à compostagem, uma prática ambientalmente correta que recebeu pontuação máxima (3) e o aproveitamento de resíduos das culturas é feito de forma integral, evitando desperdícios e promovendo a economia circular.

A propriedade possui o Cadastro Ambiental Rural (CAR), o que garante regularização e acesso a políticas públicas. Nenhuma área degradada foi identificada, o que reforça o bom manejo ambiental da propriedade e justificando a nota máxima. Por fim, observa-se a agregação de valor em toda a produção, evidenciando uma gestão eficiente e maior retorno econômico, sem comprometer o meio ambiente.

Em resumo, a propriedade obteve média geral 2,7, o que a coloca no grau desejável de sustentabilidade ambiental. A avaliação mostra um desempenho excelente em práticas agroecológicas, biodiversidade, uso do solo e gestão de resíduos. Contudo, aspectos como a falta de conhecimento sobre as características físico-químicas e microbiológicas da água para agricultura, o uso sistemático de EPIs e o controle total da erosão ainda podem ser aprimorados, elevando ainda mais o padrão de sustentabilidade da propriedade.

Os dados apresentados no quadro 3 seguiram os indicadores de desenvolvimento sustentável na dimensão econômica. Como resultado, para esse aspecto, obteve-se uma média de 2,6, valor que se enquadra no grau desejável de sustentabilidade, correspondente ao intervalo de 2,4 a 3 na escala utilizada.

O primeiro item do Quadro 3 refere-se ao acesso ao Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF), a partir do qual a agricultura familiar passou a ser oficialmente reconhecida com sua criação em 1996. O programa tem como objetivo principal financiar os custos e investimentos dos pequenos proprietários rurais que utilizam predominantemente a mão de obra familiar, promovendo melhores condições de produção. Entre suas ações, destacam-se o incentivo à adoção de tecnologias, a aquisição de equipamentos e insumos agrícolas. Além disso, o PRONAF busca reduzir as desigualdades regionais, setoriais e sociais historicamente presentes nas políticas públicas, que até então eram majoritariamente voltadas à modernização técnica da agricultura brasileira (Panzutti; Monteiro, 2014).

Na análise *in loco* da propriedade, pode-se constatar o benefício concedido pelo Governo do Estado do Rio Grande do Sul, denominado “Irrigando a Agricultura Familiar”. Os financiamentos voltados à agricultura familiar são de fundamental importância para estimular o desenvolvimento sustentável, pois permitem que os agricultores tenham acesso a mais recursos para aumentar e qualificar sua produtividade, gerando, conseqüentemente, maior renda.

O segundo item apresentado no Quadro 3 refere-se à “comercialização de produtos”, subdividida em duas categorias: animal e vegetal. Ambas se enquadram no parâmetro de venda direta, uma vez que a comercialização é realizada pelos próprios colaboradores do Sítio, em feiras, no Mercado Público da cidade, em escolas para a merenda escolar, entre outros espaços.

Observou-se que nas atividades de campo, ao longo do ano são produzidos diversos tipos de vegetais, com planejamento e organização, que consideram fatores como o clima, a umidade do solo e outras variáveis agrícolas. São cultivadas verduras como alface, couve e repolho; legumes como abóbora, feijão, milho e ervilha; e frutas como pêssego, laranja, bergamota e banana. A comercialização é feita de forma sazonal, e os clientes estão adaptados a essa dinâmica. Essa diversidade garante um rendimento econômico contínuo, possibilitando a manutenção do sítio e assegurando renda familiar ao longo de todo o ano. Além disso, a produção orgânica beneficia a comunidade e a região, promovendo uma alimentação mais saudável, com produtos de maior qualidade e sabor, e contribuindo para a preservação ambiental, uma vez que os alimentos são cultivados sem o uso de agrotóxicos e fertilizantes químicos.

O terceiro item do quadro 3 está relacionado à “infraestrutura” do local, subdividido em seis aspectos: sede, visitantes, hospedagem, acessibilidade a banheiros, animais e produtos orgânicos. Apenas dois desses subitens não alcançaram a nota máxima esperada nos parâmetros avaliados: hospedagem, que não é oferecida, e acessibilidade a banheiros. Considerando essa situação, e por estarem estrategicamente localizados próximos a outros espaços, como o refeitório, o acesso à trilha e o museu, possíveis adaptações dos banheiros poderiam contribuir para com a acessibilidade.

O quarto item do quadro 3 “mão de obra terceirizada” recebeu a menor pontuação na escala dos parâmetros avaliados (1), uma vez que não há contratação

desse tipo de serviço no Sítio, inclusive por se tratar da agricultura familiar em que a base do trabalho é da própria família. Destaca-se que, todas as atividades, desde as burocráticas até a gestão das atividades de campo, são realizadas pelos familiares.

Em relação ao quinto item do Quadro 3 “assistência técnica”, foi atribuído o maior valor dentro dos parâmetros avaliados, considerando que os colaboradores recorrem frequentemente a esse suporte, por meio dos cursos e técnicas de aperfeiçoamento que recebem da EMBRAPA e de outras instituições de pesquisa. Essa prática é vantajosa, pois possibilita a formação contínua dos envolvidos, contribuindo para a adequação às exigências legais e para a obtenção de certificações. Os proprietários realizaram diversos cursos de aperfeiçoamento relacionados ao cultivo de verduras, hortaliças, pomares, ervas medicinais, entre outros, além de experiências junto ao viveiro municipal.

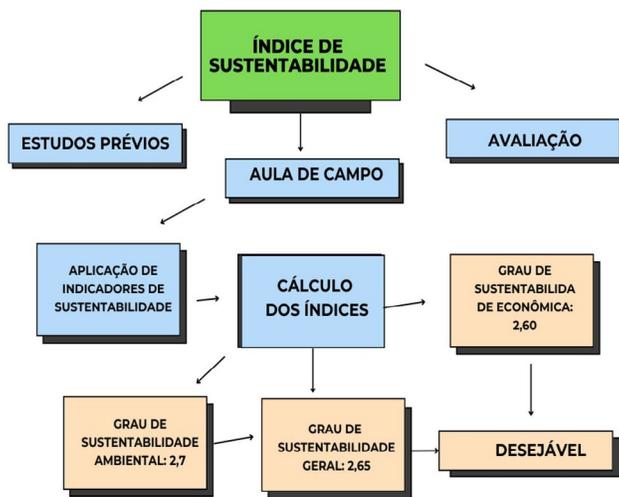
A assistência técnica e a extensão rural desempenham um papel fundamental no fortalecimento da agricultura familiar, conforme apontado pelo Ministério do Desenvolvimento Agrário (EMATER, 2024). Entre seus princípios estão a gratuidade, a qualidade e a acessibilidade aos serviços de assistência técnica, que visam não apenas ampliar a capacidade produtiva, mas também promover a sustentabilidade no campo.

O sexto e último item, “participação em Cooperativas e/ou Associações”, recebeu a maior nota dentro dos parâmetros avaliados (3), visto que os colaboradores do Sítio participam ativamente dessas organizações. Essa participação é essencial, pois garante formação contínua, realização de visitas técnicas e adequação às exigências formais. Além disso, integrar uma cooperativa, independentemente de seu segmento, proporciona acesso a novos mercados, tecnologias, informações e à redução de custos, uma vez que a atuação coletiva fortalece economicamente os envolvidos, seguindo a lógica de que a união gera força (Engel; Almeida; Deponti, 2014).

Em síntese, a propriedade obteve uma média geral de 2,6, o que a coloca no grau desejável de sustentabilidade econômica. A avaliação destacou a conformidade da propriedade com indicadores de sustentabilidade, especialmente no acesso a financiamentos, comercialização de produtos orgânicos e participação em cooperativas. No entanto, indicadores relacionados à infraestrutura podem ser aprimorados, promovendo maior grau de sustentabilidade na propriedade.

Na Figura 3, observa-se o fluxograma que demonstra os processos realizados para o desenvolvimento dos índices de sustentabilidade:

Figura 3 – Fluxograma dos índices de Sustentabilidade.



Fonte: autoria própria, 2025.

Conforme é possível observar na figura 3, bem como nos quadros 2 e 3, os índices de sustentabilidade da propriedade indicam um bom desempenho nos aspectos ambientais e econômicos, com média geral de 2,65 pontos. No aspecto ambiental, como foi mencionado, a propriedade atingiu uma média de 2,7 pontos, o que a coloca no grau desejável de sustentabilidade. Destacam-se práticas de excelência em agroecologia, biodiversidade, uso do solo e gestão de resíduos. No entanto, áreas como o tratamento da água para a agricultura, o uso de EPIs e a acessibilidade ainda exigem aprimoramentos.

No aspecto econômico, a média foi de 2,6, também alcançando o grau desejável de sustentabilidade. A conformidade com indicadores de acesso a financiamentos, comercialização de produtos orgânicos e participação em cooperativas representa um dos destaques positivos da propriedade. Contudo, a infraestrutura, especialmente a acessibilidade aos banheiros, precisa ser melhorada.

Esses Índices desempenham um papel crucial ao direcionar ações para o desenvolvimento sustentável dos agroecossistemas, como afirmam Kemerich *et al.* (2013). Identificar as fragilidades do sistema é fundamental para definir prioridades de intervenção. No caso da propriedade analisada, destacam-se, principalmente, a ausência de tratamento da água para irrigação e a necessidade de melhorias na infraestrutura.

Dentre as sugestões para aprimoramento, destaca-se a implementação de uma análise dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos de qualidade da água do açude de onde se utiliza a água para irrigação, a qual precisa ser de classe I ou II, conforme prevê a Resolução CONAMA N° 357 de 17 de março de 2005 (Brasil, 2005), uma vez que ela não pode conter contaminantes, microrganismos e substâncias que prejudiquem as plantas. A depender das condições de qualidade encontradas, pode-se propor alternativas para tratamento específico, como, por

exemplo, correção de salinidade, da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), filtração, decantação de partículas sólidas presentes na água e outras técnicas, conforme sugere Lemos Filho *et al.* (2011), caso sejam necessárias.

No aspecto econômico, é recomendado o acesso a linhas de crédito específicas para a agricultura familiar e a adesão a programas governamentais que viabilizem melhorias na infraestrutura, para garantir maior acessibilidade.

Uma sugestão para a ampliação do índice de sustentabilidade no local, seria a adaptação da estrutura atual existente no sítio, para o modelo de tratamento descentralizado conhecido como banheiro seco, uma alternativa comumente utilizada no saneamento ecológico. Para tanto, se faz necessário a inclusão de um vaso sanitário separador de urina/mictório direcionando para um reservatório que recebe e armazena o efluente durante um período de tempo pré-determinado. Estudos demonstram que esse efluente após o período de maturação pode substituir os fertilizantes de nitrogênio mineral na produção de cereais (Schönning; Stenström, 2004).

Em suma, os indicadores de sustentabilidade da propriedade analisada demonstraram-se eficazes ao evidenciar aspectos relevantes na produção de alimentos orgânicos, contribuindo para a qualidade de vida da família produtora e da sociedade que tem acesso a esses alimentos. A continuidade do monitoramento do agroecossistema, como proposto por Pereira e Martins (2010), permitirá avaliar a proximidade do sistema com a sustentabilidade, identificar aspectos críticos, entender os fatores que comprometem o equilíbrio e orientar ações que favoreçam sua transição para um funcionamento ainda mais sustentável.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Sítio Agroecológico com Certificação Orgânica se apresenta como um modelo de produção e gestão eficiente, que vai além da produção de alimentos. Ele integra os princípios da ecologia, sustentabilidade e bem-estar social, alinhando as práticas agroecológicas às necessidades e valores da agricultura familiar. O sítio apresenta características como a forte ligação com a terra, o conhecimento tradicional transmitido de geração em geração e a gestão predominantemente familiar, o que lhe confere um papel singular no cenário agrícola regional.

Sendo assim, ao priorizar práticas que respeitam os ciclos naturais e evitam o uso de insumos sintéticos, promove a saúde do ambiente, do solo, das plantas, dos animais e das pessoas. Valoriza o conhecimento local, a biodiversidade e fortalece a agricultura familiar e as comunidades rurais, adaptando-se à sua escala produtiva. Por conseguinte, contribui para a sustentabilidade ambiental e a mitigação das mudanças climáticas por meio do manejo ecológico do solo, da conservação da água, da redução de emissões de gases de efeito estufa e do sequestro de carbono.

Além disso, o empreendimento contribui para a geração de renda no meio rural e estimula o consumo de alimentos saudáveis e produzidos de forma ética. Sua

atuação também possui um importante caráter educativo, servindo como espaço de referência para atividades de extensão, pesquisa e formação em agroecologia, colaborando para a difusão de conhecimentos e práticas sustentáveis na região. Dessa forma, o Sítio Agroecológico com Certificação Orgânica não apenas contribui para o desenvolvimento local, mas também inspira transformações positivas no modelo produtivo rural do Noroeste gaúcho.

A propriedade obteve média geral 2,7 na dimensão ambiental e 2,6 na dimensão econômica, situando-se em ambos os casos no grau desejável de sustentabilidade. No aspecto ambiental, destacou-se o desempenho positivo em práticas agroecológicas, conservação da biodiversidade, uso adequado do solo e gestão de resíduos. Mas, como em todo e qualquer ambiente, há aspectos que podem, ao longo do tempo serem aprimorados, a exemplo do conhecimento sobre a qualidade da água utilizada na agricultura. No âmbito econômico, os resultados evidenciam conformidade com indicadores, especialmente como acesso a financiamentos, comercialização de produtos orgânicos e atuação em cooperativas, embora melhorias na infraestrutura sejam necessárias, acredita-se que estas podem vir de fomento externo, como forma de contribuir para com a sustentabilidade regional, uma vez que a sustentabilidade ambiental tem sido um compromisso do referido sítio. Conclui-se, portanto, que a propriedade apresenta alto desempenho sustentável, com potencial para avanços ambientais e estruturais.

REFERÊNCIAS

BORGES, I. M. S.; GOMES, L. S.; MELO, J. W. B.; OLIVEIRA, J. M. R.; SANTOS, V. **Agricultura familiar: análise de sustentabilidade através de indicadores sociais, econômicos e ambientais**. Research, Society and Development, v. 9, n. 4, e54942832, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/2832>. Acesso em: 01 maio 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Indicadores de desenvolvimento sustentável**. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais; Coordenação de Geografia. Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Normas para certificação orgânica no Brasil**. Brasília, DF: MAPA, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura>>. Acesso em: 24 abr. 2025.

CENTO, H.; BAHSI, N. **Aprendizagem social na agricultura orgânica e convencional: uma análise comparativa**. Ciência Rural, v. 55, n. 5, p. e20240118, 2025.

CIDON, C.; THEIS, V.; SCHREIBER, D.; HAUBERT, B.; FAGUNDES, C. **Análise da agricultura orgânica na Região Sul do Brasil, sob a perspectiva da sustentabilidade.** Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 14, supl. 1, p. 1–19, 2021. Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/9420>. Acesso em: 01 maio 2025.

EMATER. [Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural] ASCAR. [Associação Sulina de Crédito e Assistência Rural]. **Projeto da Emater/RS-Ascar em parceria com o Ministério do Desenvolvimento Agrário beneficia mais de 4,9 mil famílias nas regiões de Santa Rosa e Ijuí.** Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2024. Disponível em: <https://estado.rs.gov.br/mais-de-4-9-mil-familias-do-noroeste-sao-beneficiadas-com-projeto-de-sustentabilidade-nas-propriedades>. Acesso em: 24 abr. 2025.

EMBRAPA [Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária]. **Calda Sulfocálcica: Preparo, usos e cuidados,** 2015.

ENGEL, V.; ALMEIDA, G. G. F.; DEPONTI, C. M. **Agricultura familiar no contexto das cooperativas rurais: o caso da Ecocitrus.** Cadernos de Ciência & Tecnologia, Brasília, v. 34, n. 1, p. 59–81, jan./abr. 2014.

GRI [Global Reporting Initiative]. **GRI Standards: linking the SDGs and sustainability reporting.** 2020. Disponível em: <https://www.globalreporting.org>. Acesso em: 24 abr. 2025.

IPCC [Intergovernmental Panel On Climate Change]. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change.** Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. Acesso em: 1 maio 2025.

KEMERICH, P. D. C.; MARTINS, S. R.; KOBAYAMA, M.; BURIOL, G. A.; BORBA, W. F.; RITTER, L. G. **Avaliação da sustentabilidade ambiental em bacias hidrográficas mediante a aplicação do modelo P-E-R.** Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, Cascavel, v.10, n.10, p.2140-2150, 2013.

LEMOS FILHO, M. A. F.; ZANINI, J.; SILVA, Elcides R. S.; CAZETTA, J. O.; FERRAUDO, A. S. **Sistema com aeração, decantação e filtragem para a melhoria da qualidade de água em irrigação localizada.** Engenharia Agrícola, v. 31, n. 3, p. 506-519, jun. 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69162011000300011>.

MOURA, D. A.; SOARES, J. P. G.; REIS, S. A.; FARIAS, L. F. **Agricultura orgânica: impactos ambientais, sociais, econômicos e na saúde humana.** COLÓQUIO – Revista do Desenvolvimento Regional, v. 19, n. 1, p. 215–235, jan./mar. 2022. Disponível em: <https://seer.faccat.br/index.php/coloquio/article/view/2354>. Acesso em: 01 maio 2025.

OLIVEIRA, T. G.; FRANCISCO, C. N.; BOHRER, C. B. A. **Áreas de Preservação Permanente (APP) no topo de morros no estado do Rio de Janeiro: uma avaliação dos dispositivos legais em diferentes unidades geomorfológicas.**

Ciência Florestal, v. 31, n. 1, p. 491-514, 15 mar. 2021. Universidade Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509832492>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/CdXCyQs33YLdX4k8V3KFs9F/>. Acesso em: 01 maio 2025.

PANZUTTI, N.; MONTEIRO, A. V. **Agricultura familiar e políticas públicas.**

Cadernos CERU, v. 25, n. 2, p. 131-145, 2014.

PEREIRA, V. S.; MARTINS, S. R. **Indicadores de sustentabilidade do agroecossistema arroz orgânico com manejo de água contínuo na bacia do Araguá (SC) mediante aplicação da metodologia MESMIS.**

Revista Brasileira de Ciências Ambientais, Rio de Janeiro, v.15, n.1, p.56-78, 2010.

REDE ECOVIDA. **Sistema participativo de garantia: princípios e funcionamento.**

2023. Disponível em: <<https://www.ecovida.org.br>>. Acesso em: 24 abr. 2025.

SCHÖNNING, C.; STENSTRÖM, T. A. **Diretrizes para o uso seguro de urina e fezes nos sistemas de saneamento ecológico.**

Estocolmo: Instituto Ambiental de Estocolmo – SEI, 2004. Tradução: Márcia Loureiro Paulo. Disponível em: https://www.ecosanres.org/pdf_files/ESR_Publications_2004/ESR2pt.pdf. Acesso em: 08 maio 2025.

SEUFERT, V.; RAMANKUTTY, N. **Organic agriculture in the context of climate change and food security.**

Nature Sustainability, v. 5, n. 9, p. 785–793, 2022.

DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00909-5>.



Indicadores de Sustentabilidade de uma Cooperativa de Catadores de Materiais Recicláveis

Sustainability Indicators of a Cooperative of Recyclable Material Collectors

Bruna Willig Kopplin

Jean Cláudio Radünz

João Fernando Medeiros Cardoso

Leandro Perius Heck

Rafael Franco Pires

Alcione Aparecida de Almeida Alves

Resumo: A sustentabilidade ambiental em empreendimentos de base solidária tem se destacado como ferramenta estratégica para a inclusão social e a preservação dos recursos naturais. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo principal elaborar indicadores de sustentabilidade ambiental aplicáveis à uma Cooperativa de Catadores de Materiais Recicláveis na Região Noroeste do Rio Grande do Sul. A análise foi conduzida por meio de abordagem quali-quantitativa, com aplicação de metodologia de observação participante (março de 2025) e levantamento de dados primários e secundários (de março a maio de 2025). Foram desenvolvidos fluxogramas e indicadores organizados em três eixos temáticos principais: água de abastecimento, águas residuárias e resíduos sólidos.

Palavras-chave: sustentabilidade ambiental; indicadores ambientais; resíduos sólidos; economia circular; impactos ambientais.

Abstract: Environmental sustainability in solidarity-based enterprises has been highlighted as a strategic tool for social inclusion and the preservation of natural resources. In this context, the main objective of this study was to develop environmental sustainability indicators applicable to the Recycling Workers' Cooperative in the Northwestern Region of Rio Grande do Sul. The analysis was conducted using a qualitative-quantitative approach, with the application of participant observation methodology (March 2025) and primary and secondary data collection (from March to May 2025). Flowcharts and indicators were developed, organized into three main thematic axes: water supply, wastewater and solid waste.

Keywords: environmental Sustainability; environmental indicators; solid waste; circular economy; environmental impacts.

INTRODUÇÃO

A sustentabilidade ambiental tem ganhado destaque nas últimas décadas como pilar essencial para a conservação dos recursos naturais e a mitigação dos impactos causados pelas atividades humanas. Nesse contexto, a gestão adequada dos resíduos sólidos torna-se fundamental, uma vez que práticas inadequadas podem causar sérios danos ambientais e à saúde pública (Zhang *et al.*, 2020). O conceito de desenvolvimento sustentável, conforme Mensah (2020) integra

dimensões ambientais, sociais e econômicas, visando suprir as necessidades atuais sem comprometer as futuras gerações.

Para garantir a eficácia e sustentabilidade das ações, o uso de indicadores específicos permite avaliar o desempenho ambiental, social e econômico das cooperativas de reciclagem, subsidiando decisões e políticas públicas (Ribeiro; Besen; Dezincourt, 2021). No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010 e atualizada pelo Decreto nº 10.936/2022, estabeleceu diretrizes para o gerenciamento adequado de resíduos, com foco na responsabilidade compartilhada entre governo, setor privado e sociedade (Brasil, 2022).

Com o aumento da urbanização e do consumo, a geração de resíduos se intensificou, tornando a gestão mais complexa (Dias; Alves, 2021). A segregação na origem e o gerenciamento eficiente dos resíduos são essenciais para a economia circular e a redução de impactos ambientais. Separar corretamente os resíduos facilita o trabalho das cooperativas e reduz o envio a aterros, promovendo sustentabilidade (Okot-Okumu; Nyenje, 2022). As cooperativas de catadores desempenham papel crucial, contribuindo para a reciclagem e inclusão social, com exemplos de parcerias que transformam resíduos em produtos sustentáveis (Lopes; Rodrigues, 2022).

Além disso, ferramentas de governança têm se mostrado fundamentais para fortalecer a economia circular e a sustentabilidade econômica dessas organizações (Medeiros; Silva; Garcia, 2021).

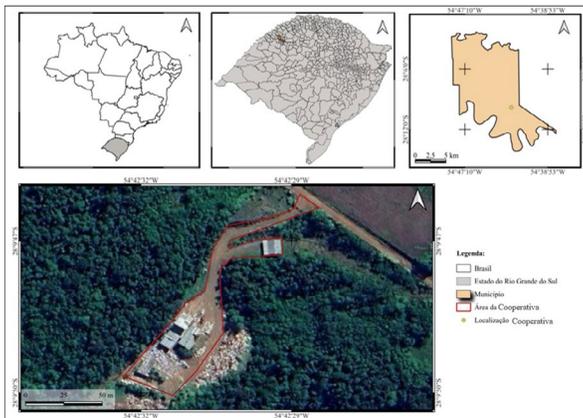
Neste sentido, o objetivo deste estudo foi elaborar indicadores de sustentabilidade ambiental aplicáveis a uma cooperativa de catadores de materiais recicláveis situada na Região Noroeste do Rio Grande do Sul. A pesquisa buscou compreender a realidade local, avaliar as condições estruturais e operacionais da cooperativa e contribuir para a formação de cidadãos ambientalmente conscientes e socialmente engajados.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

A Cooperativa está localizada na região Noroeste do estado do Rio Grande do Sul. A figura 1 apresenta a sua posição geográfica no território estadual, permitindo a compreensão espacial de sua inserção no contexto do Rio Grande do Sul.

Figura 1 - Mapa de localização da Cooperativa no Rio Grande do Sul.



Fonte: Imagem de satélite Google, IBGE, adaptado, 2025.

Na figura 2, apresenta-se a infraestrutura, as condições de trabalho dos cooperados e os processos operacionais da cooperativa. Oferecendo uma visão mais detalhada da realidade do empreendimento.

Figura 2 - Estrutura Física e Atividades Operacionais da Cooperativa.



Fonte: autores, 2025.

Nota: (A) Local de triagem dos materiais; (B) Esteira de triagem dos materiais; (C) Prensa de compactação dos resíduos; (D) Materiais separados e prensados.

Nas imagens respectivas às figuras 1 e 2, se evidenciam tanto a localização e inserção territorial da cooperativa quanto às etapas do seu processo operacional, destacando sua relevância ambiental. A delimitação espacial e o registro das atividades, da triagem à compactação dos resíduos, permitem compreender os impactos e contribuições da cooperativa para a gestão adequada dos resíduos, promovendo práticas sustentáveis, mitigando danos ao meio ambiente e fortalecendo a reciclagem como estratégia de conservação dos recursos naturais.

Método de Pesquisa

A presente pesquisa seguiu uma abordagem quali-quantitativa, combinando a análise descritiva das práticas operacionais da cooperativa com a construção de indicadores de sustentabilidade ambiental adaptados à sua realidade. De acordo com Gil (2017), esse tipo de abordagem é adequada quando se busca compreender a complexidade de um fenômeno em seu contexto natural, ao mesmo tempo em que se obtêm dados objetivos para subsidiar a análise. As etapas metodológicas incluíram observação participante realizada in loco em março de 2025, permitindo o acompanhamento direto da rotina, da infraestrutura e dos fluxos operacionais. Dados primários foram obtidos por meio de visitas técnicas, registros fotográficos e conversas informais com os cooperados, proporcionando uma compreensão aprofundada das práticas e desafios enfrentados no cotidiano da cooperativa.

Complementarmente, foram analisados dados secundários presentes em documentos institucionais, legislações vigentes e normas técnicas da ABNT, o que garantiu embasamento normativo e técnico à pesquisa. Conforme Lakatos e Marconi (2003), o cruzamento entre diferentes fontes de dados é essencial para a confiabilidade e a validade dos resultados.

Elaboração de Indicadores de Sustentabilidade

A partir da observação participante, foram elaborados fluxogramas representativos dos processos internos e definidos indicadores organizados em três indicadores macros: água de abastecimento, águas residuárias e resíduos sólidos. Esses indicadores foram estruturados de modo a respeitar as especificidades locais e as condições estruturais da cooperativa, visando promover práticas sustentáveis adaptadas à sua realidade operacional.

Para a água de abastecimento, os indicadores propuseram o monitoramento da captação, consumo, reuso e qualidade da água, considerando parâmetros físico-químicos e microbiológicos (Almeida; Rodrigues, 2020), em conformidade com normativas como as Portarias GM/MS nº 5/2017 e nº 888/2021.

Quanto aos resíduos sólidos, os indicadores avaliaram etapas como triagem, armazenamento, transporte e destinação final, com base na tipologia e origem dos resíduos. A correta classificação segundo a ABNT NBR nº 10.004:2024, aliada à mensuração de volumes e eficiência das operações, visa otimizar o uso do espaço e reduzir riscos ambientais (Silva *et al.*, 2018).

Para as águas residuárias, os indicadores analisaram a geração, o tratamento e a disposição final de efluentes, contemplando sanitários, lavagem de equipamentos, cozinha e processos operacionais. O controle de estruturas como caixas de gordura e canaletas, além da verificação da frequência de manutenção, foi fundamental para prevenir a contaminação de solos e corpos hídricos (Castro; Mendes, 2019; Maia *et al.*, 2023).

A definição dos indicadores considerou a realidade local da Cooperativa, com base nos dados obtidos entre março e maio de 2025, levando em conta sua infraestrutura existente e as práticas operacionais então adotadas.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Histórico da Cooperativa

Inicialmente composta por sete trabalhadores, a cooperativa chegou a contar com 22 membros e atualmente mantém 12 cooperados, atuando exclusivamente no município. Os resíduos são recebidos diariamente e triados manualmente em esteira, sendo posteriormente prensados para armazenamento e transporte. O processo enfrenta desafios, como a chegada de resíduos contaminados por falta de segregação na origem e limitações estruturais, como o espaço físico reduzido e ausência de banheiro na área de triagem.

A Cooperativa realiza diariamente o recebimento de resíduos sólidos provenientes da coleta seletiva municipal, com logística alternada: resíduos recicláveis são coletados às terças e quintas, e o lixo orgânico às segundas, quartas e sextas-feiras. As atividades operam em turno integral, de segunda a sexta-feira, com foco em sustentabilidade e economia circular.

A cooperativa possui licença ambiental vigente e conta com equipamentos como caminhão caçamba, retroescavadeira e esteira de triagem, mantidos com apoio da prefeitura. Na comercialização, destaca-se o envio mensal de papelão e, no mínimo, duas cargas de plásticos, com ênfase no Polietileno Tereftalato (PET), material de maior valor. Os plásticos cristal contaminados, por sua vez, são descartados no aterro sanitário.

Indicadores de Sustentabilidade

A elaboração de indicadores de sustentabilidade da cooperativa foi estruturada a partir de três categorias: água de abastecimento, resíduos sólidos e águas residuárias.

Considerando o indicador macro água de abastecimento e seus respectivos indicadores de condição ambiental e indicadores de desempenho ambiental foram elaborados para avaliar o uso, a potabilidade e reaproveitamento hídrico no ambiente da Cooperativa. Para estes, identificou-se que a cooperativa enfrenta desafios na gestão da água, como a ausência de limpeza periódica da caixa d'água, falta de

práticas de reuso de água da chuva por cisterna ou de água proveniente da lavagem de materiais e equipamentos e desconhecimento do volume consumido. Segundo Oliveira *et al.* (2021), a adoção de indicadores ambientais no uso da água permite identificar oportunidades de melhoria na gestão dos recursos, promovendo o uso racional, a segurança sanitária e a conformidade legal. Além disso, Santos e Lima (2022) destacaram que práticas como o reuso de água e a manutenção preventiva dos sistemas de abastecimento são essenciais para empreendimentos que buscam sustentabilidade e responsabilidade ambiental, especialmente em contextos de cooperativas que lidam com resíduos sólidos.

No que se refere aos resíduos sólidos, o volume de resíduos processados, sua origem, tipologia, formas de gerenciamento e condições estruturais da unidade. Atualmente, a cooperativa recebe, em média, duas cargas diárias de resíduos recicláveis. O tempo de armazenamento varia entre 15 e 30 dias, dependendo do volume efetivamente triado.

O espaço destinado ao recebimento das cargas foi considerado insuficiente para atender à atual demanda operacional, os resíduos são alocados para a triagem, em boa parte são espalhados pelo vento e outros resíduos são alocados erroneamente pela prefeitura municipal. Após a triagem manual, os resíduos são acondicionados em bags com capacidade de 1 m³, os quais são posteriormente encaminhados para o processo de prensagem. Depois, os fardos são armazenados em galpão coberto, onde permanecem até a sua expedição. O controle da saída dos materiais é realizado com base no volume triado, não havendo periodicidade fixa.

Em relação à tipologia e classificação, os resíduos são agrupados da seguinte forma: resíduos poliméricos (plástico cristal, transparentes, leitoso, embalagens, recipientes diversos, baldes, bacias e garrafas PET), resíduos de celulose (papelão), resíduos metálicos (alumínio e aço) e apenas frascos inteiros de bebidas alcoólicas padronizadas em vidro, previamente selecionadas para retorno específico. O sistema de separação e triagem ocorre de forma manual, com o apoio de uma gaiola gravitacional e esteira de roletes, em estrutura coberta e adaptada para essa finalidade.

Após a separação, os materiais recicláveis são armazenados em bags até serem enfardados com o uso de prensa, ficando em local coberto e no aguardando da comercialização. Vale destacar que não há tratamento dos resíduos no local, visto que a atuação da cooperativa se restringe às etapas de triagem e acondicionamento.

Observou-se a ausência de área impermeabilizada para os resíduos não selecionados e rejeitos, que estão dispostos a céu aberto ao redor da área de triagem. Em relação à segurança no trabalho, constatou-se a falta de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), restritos estes a, luvas de algodão descartáveis, e a inexistência de Equipamentos de Proteção Coletiva (EPCs) e equipamentos de combate a incêndio. A estrutura da cooperativa é composta por um galpão de triagem, uma edificação para prensagem e armazenagem de resíduos e uma área de apoio com funções administrativas, alimentação, banheiro e descanso.

A gestão das águas residuárias na Cooperativa apresentou lacunas e embora exista uma caixa de gordura instalada, sua manutenção e limpeza não são realizadas

periodicamente, e, além disso, ela não recebe o esgoto proveniente da pia devido a uma desconexão na tubulação que a interliga, resultando no descarte inadequado dos efluentes da cozinha diretamente no solo. Para solucionar esse problema, é imprescindível realizar o reparo da tubulação como primeiro passo. Em seguida, é necessário adequar a caixa de gordura conforme as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR n° 8.160:1999.

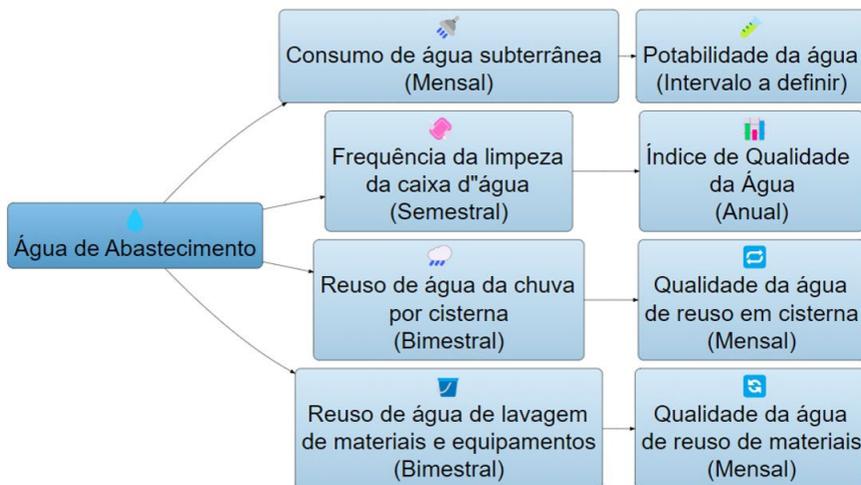
A norma ABNT NBR n° 17.076:2024 recomenda que o histórico de consumo de água, com pelo menos um ano, seja considerado no dimensionamento de sistemas de tratamento de esgoto. No entanto, a Cooperativa não conseguiu fornecer as informações relativas ao consumo de água, uma vez que a gestão financeira deste indicador é de responsabilidade da Prefeitura Municipal, à qual a Cooperativa não possuía acesso direto. Caso estivessem disponíveis, esses dados poderiam melhorar o planejamento e a gestão do uso da água. Como alternativa, sugeriu-se a instalação de uma fossa séptica, conforme a norma, para tratar adequadamente os efluentes e evitar o descarte irregular no meio ambiente.

Além disso, a investigação identificou que a Cooperativa não possuía um sistema adequado para o recolhimento dos efluentes gerados por resíduos como embalagens de caixas de leite, faltando estruturas como canaletas e tanques de coleta. A implantação desse sistema é necessária para atender às normas ambientais, garantindo que os resíduos e os efluentes sejam destinados conforme o preconizado na licença ambiental e em atendimento à Lei n° 12.305/2010.

Na cooperativa, observou-se a criação de suínos em pequena escala, destinados ao consumo próprio. Segundo Severo (2007), a suinocultura, mesmo em sistemas não industrializados, tem elevado potencial poluidor. Camargo (2022) destacou que a falta de orientação técnica em propriedades familiares pode resultar em manejo inadequado dos dejetos, afetando a qualidade do solo, água e ar. Martins *et al.* (2019) alertaram que os dejetos suínos contêm nutrientes, metais pesados e microrganismos patogênicos, que, se descartados incorretamente, podem causar danos ambientais, como a eutrofização. Portanto, é essencial que a cooperativa implemente ações educativas e apoie práticas sustentáveis de manejo, integrando agroecologia e sustentabilidade.

Nas figuras 3, 4 e 5 estão apresentados os fluxogramas com uma síntese dos indicadores ambientais relacionados no contexto da sustentabilidade em empreendimentos de coleta seletiva e reciclagem.

Figura 3 - Fluxograma Indicadores de sustentabilidade da água de abastecimento.

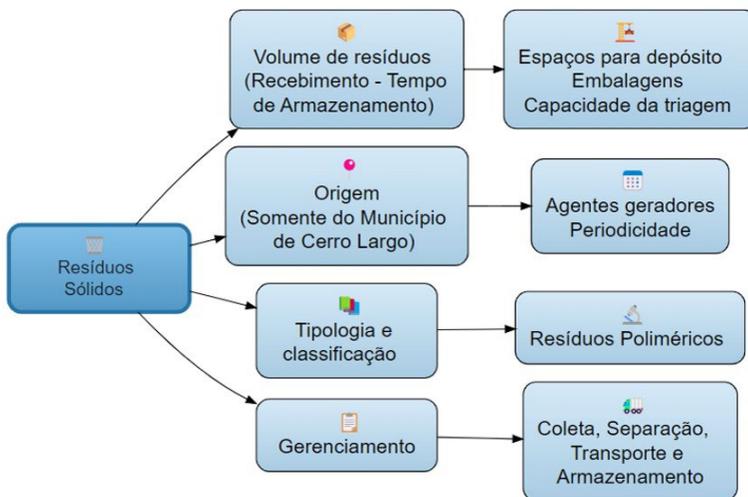


Fonte: autores (2025).

Conforme apresentado na figura 3 os indicadores de sustentabilidade relacionados à água de abastecimento demonstram as principais etapas de captação, uso, controle de qualidade, reuso e monitoramento, permitindo visualizar de forma integrada os pontos críticos da gestão hídrica na cooperativa.

Estudos recentes destacam que a gestão eficiente da água é fundamental para melhorar as condições ambientais e operacionais em cooperativas de catadores (Gonçalves *et al.*, 2021; Silva; Souza, 2022). O fluxograma demonstrado na figura 3, segue as diretrizes da ABNT NBR n° 14.001:2015 ao propor indicadores que possibilitam o controle e a redução dos impactos ambientais relacionados ao uso e descarte da água. A inclusão de métricas como qualidade da água de reuso e frequência de limpeza das caixas d'água atende às exigências sanitárias e reforça a vigilância ambiental. Além disso, conforme Marque e Gonzaga (2020), o monitoramento contínuo fortalece a sustentabilidade e valoriza o trabalho dos catadores, promovendo saúde, segurança e reconhecimento social.

Figura 4 - Fluxograma Indicadores de sustentabilidade de resíduos sólidos.



Fonte: autores (2025).

Conforme apresentado na figura 4, vinculada aos indicadores de resíduos sólidos, abordou-se respectivos a estes, o volume, a origem, a tipologia e o gerenciamento. Destacam-se aspectos como a capacidade de triagem com gerenciamento envolvendo coleta, separação, transporte e armazenamento.

O monitoramento de indicadores como volume de resíduos, tempo de armazenamento, triagem e classificação, bem como o gerenciamento do processo de coleta, separação, transporte e armazenamento, é fundamental para garantir a eficiência operacional e a sustentabilidade das ações (Souza; Silva, 2022; Lima *et al.*, 2021). Além disso, fatores como agentes geradores, produtividade da equipe e resíduos rejeitados são determinantes para avaliar a viabilidade econômica da cooperativa e sua contribuição para a economia circular (Brasil, 2021). Segundo Ferreira e Almeida (2023), a adoção de indicadores sistemáticos também contribui para o reconhecimento social dos catadores e o fortalecimento da cadeia da reciclagem.

Figura 5 - Fluxograma Indicadores de sustentabilidade de águas residuárias.



Fonte: autores (2025).

Conforme apresentado na figura 5, vinculada aos indicadores de águas residuárias, abordou-se, respectivamente a estes, os efluentes sanitários, a limpeza do local, a lavagem de EPIs e o recolhimento de efluentes, aspectos como a caixa de gordura, a eficiência do processo de tratamento, estrutura, acessibilidade, manutenção, limpeza, o uso de canaletas e caixas de recolhimento, o monitoramento do efluente da caixa coletora.

A adoção de práticas de gestão das águas residuárias pela Cooperativa é essencial para mitigar impactos ambientais e garantir condições sanitárias adequadas aos trabalhadores. O fluxograma apresentado na figura 5 evidencia indicadores-chave, como a lavagem dos EPIs, a limpeza das áreas operacionais e o monitoramento da eficiência dos processos de tratamento (Oliveira; Andrade, 2022). Essas ações são fundamentais para assegurar ambientes salubres e em conformidade com as normas vigentes.

Além disso, o reaproveitamento de efluentes, aliado à educação ambiental e à manutenção preventiva, pode gerar benefícios ambientais e econômicos (Silva *et al.*, 2023). A coleta, o tratamento regular e a disposição final adequada dos efluentes, conforme orienta a ABNT NBR nº 17.076:2024, fortalecem a sustentabilidade da cooperativa e promovem a saúde ocupacional dos catadores.

Proposições de Adequações Operacionais e Estruturas

Para melhorar a eficiência operacional e a segurança dos trabalhadores na Cooperativa, são necessárias adequações na infraestrutura. Entre elas, destacam-se a ampliação da cobertura na área de recebimento de resíduos, o fechamento lateral da edificação de triagem e a criação de passagens cobertas com pisos acessíveis. A rede elétrica também deve ser revisada, com aterramento de equipamentos, visando à prevenção de acidentes e à conformidade com normas de segurança.

A área de transbordo de resíduos excedentes precisa de cobertura e pavimentação impermeável, com acesso restrito a pessoal autorizado, enquanto o setor de enfardamento deve passar por reorganização do layout, correções elétricas e instalação de equipamentos de combate a incêndio. Para o manejo adequado de resíduos não recicláveis, é fundamental proibir o recebimento de materiais orgânicos e remover os descartes irregulares, garantindo a destinação final conforme as normas ambientais.

A partir disso, a edificação de apoio requer tratamento adequado das águas servidas e cloacais antes do descarte. Como prática sustentável, recomenda-se o aproveitamento de águas pluviais para reduzir o consumo de água potável. Essas medidas, ao serem implementadas, promovem não apenas a sustentabilidade ambiental da cooperativa, mas também melhores condições de trabalho e conformidade com as diretrizes técnicas de gestão de resíduos.

Sugere-se, portanto, que experiências consolidadas de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos sejam consideradas como referência para o fortalecimento das práticas da Cooperativa. Modelos que aliam infraestrutura adequada, valoração econômica dos materiais recicláveis, inclusão social dos catadores e integração com políticas públicas demonstram resultados positivos tanto no aspecto ambiental quanto socioeconômico.

Além disso, os resultados obtidos reforçam a necessidade de maior participação e apoio do poder público para garantir a efetividade das práticas sustentáveis em cooperativas de catadores de materiais recicláveis, conforme o estabelecido pela PNRS, que elencou o princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Conforme a referida Lei, em seu Art. 11, cabe aos Estados, em conformidade com suas diretrizes e regulamentos, promover a integração da organização, do planejamento e da execução das funções públicas de interesse comum relacionadas à gestão dos resíduos sólidos. Neste sentido, é fundamental que haja investimentos em infraestrutura, capacitação, assistência técnica e fomento às cooperativas, bem como o fortalecimento de políticas públicas que promovam a gestão integrada de resíduos sólidos e a valorização do trabalho desenvolvido por cooperativas.

Conforme destacam Macedo *et al.* (2020), a adoção de modelos de gestão conjunta entre municípios, principalmente em regiões com menor capacidade técnica e financeira, tem potencializado a eficiência operacional, fortalecido a cadeia da reciclagem e promovido benefícios ambientais e sociais. Nesse mesmo sentido, Saueressig *et al.* (2021) evidenciou que as cooperativas de catadores, quando inseridas em sistemas bem estruturados, contribuem significativamente para a economia circular, agregando valor aos resíduos recicláveis e garantindo condições dignas de trabalho aos cooperados. Assim, utilizar essas experiências como referência pode ser decisivo para o aprimoramento das práticas locais da Cooperativa, ampliando seu alcance e sua efetividade.

A implementação de estratégias semelhantes pode contribuir significativamente para o aprimoramento da infraestrutura da cooperativa, a diversificação de suas atividades e o fortalecimento de sua atuação em educação ambiental, manejo

adequado de resíduos orgânicos e resíduos de poda. Dessa forma, reforça-se o papel da cooperativa na promoção da sustentabilidade e na transformação da realidade local por meio da economia circular.

De acordo com Silva e Araújo (2023), investimentos em infraestrutura, capacitação dos cooperados e expansão de programas de coleta seletiva são fundamentais para fortalecer o papel das cooperativas na gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos e na inclusão socioeconômica dos catadores de materiais recicláveis. Além disso, o estudo de Pereira e Messias (2025) destacou que, as cooperativas contribuem para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) no Brasil e a concretização do trabalho decente. Essas evidências reforçam a importância de ações educativas e ambientais para a sustentabilidade e o impacto local positivo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O referido estudo desenvolveu e analisou indicadores de sustentabilidade organizados em três eixos temáticos: águas de abastecimento, resíduos sólidos e águas residuárias para a Cooperativa. A partir da aplicação desses indicadores, foi possível identificar fragilidades na infraestrutura e nos processos operacionais da cooperativa, como a ausência de práticas de reuso de água, deficiências no tratamento de efluentes e limitações no armazenamento e triagem de resíduos. Além disso, os indicadores também evidenciaram o potencial de melhoria e fortalecimento da gestão ambiental por meio de ações corretivas e planejadas.

Referente ao eixo de águas de abastecimento a Cooperativa apresentou importantes avanços. A regularização do uso da água e a valorização do consumo consciente entre os cooperados demonstraram um cenário promissor de responsabilidade ambiental. Alguns pontos ainda precisam de atenção, como a implementação de um monitoramento sistemático da potabilidade da água, os resultados apontam para um avanço consistente rumo à sustentabilidade.

Conforme supracitado, para o indicador de resíduos sólidos, observou que, apesar dos esforços operacionais da cooperativa no processamento de resíduos recicláveis, ainda existem limitações estruturais e operacionais significativas que comprometem a eficiência e a segurança das atividades desenvolvidas.

Relativo às águas residuárias, constatou-se que no momento avaliado, não dispunha de um sistema eficaz de gerenciamento destes efluentes. Foram identificadas deficiências no sistema de coleta e na ausência de tratamento adequado dos efluentes domésticos.

Diante dos desafios identificados, recomenda-se à Cooperativa a adoção de melhorias estruturais e operacionais. É fundamental a ampliação e readequação do espaço destinado à recepção das cargas, bem como a implementação de um sistema eficiente para a destinação correta dos rejeitos. A criação de áreas impermeabilizadas contribuirá para evitar a contaminação do solo, enquanto a correta alocação dos resíduos poderá otimizar o fluxo de trabalho e reduzir impactos

ambientais. A segurança dos colaboradores deve ser prioridade, por isso é essencial garantir o fornecimento e uso adequado de EPIs e EPCs. Além disso, faz-se urgente a reestruturação da caixa de gordura, com correções construtivas e ajuste na interligação dos canos, assegurando o encaminhamento adequado dos efluentes. Após essas intervenções, recomenda-se a instalação de uma fossa séptica para o tratamento dos resíduos sanitários, consolidando um sistema sanitário mais eficaz e ambientalmente responsável.

Por fim, faz-se importante destacar que a elaboração deste trabalho baseou-se em um diagnóstico à realidade atual da Cooperativa considerando as condições observadas in loco, os dados obtidos no período de março a maio de 2025, retratando a realidade do local somente neste período. Cada indicador proposto levou em conta a realidade vivida no dia a dia da cooperativa, suas conquistas, limitações e desafios. Assim sendo, este relatório pode ser utilizado exclusivamente para fins de melhoria do local, servindo como instrumento de apoio à gestão e à sustentabilidade da cooperativa.

Por fim, indica-se a necessidade e apoio do poder público cooperando para garantir que as práticas sustentáveis, conforme o estabelecido pela PNRS, que elenca o princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Conforme a referida Lei, em seu Art. 11, cabe aos Estados, em conformidade com suas diretrizes e regulamentos, promover a integração da organização, do planejamento e da execução das funções públicas de interesse comum relacionadas à gestão dos resíduos sólidos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. F.; RODRIGUES, L. M. **Indicadores de sustentabilidade na gestão da água em empreendimentos de pequeno porte**. Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 7, n. 14, p. 112–126, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT NBR ISO nº 14.001:2015** - Sistemas de gestão ambiental - Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT NBR nº 10.004:2024** - Sistema Geral de Classificação de Resíduos (SGCR). Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT NBR nº 8.160:1999** - Sistemas Gerais de Esgoto Sanitário - Projeto e Execução. Rio de Janeiro: ABNT, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT NBR nº 17.076:2024** Projeto de sistema de tratamento de esgoto de menor porte - Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

CAMARGO, C. **Principais formas de manejo dos dejetos na criação de suínos no município de Nova Alvorada/RS**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Desenvolvimento Rural) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos – Atualização 2021**. Ministério do Meio Ambiente. Brasília: MMA, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mma>. Acesso em: 08 abr. 2025.

CASTRO, J. M.; MENDES, R. C. **Indicadores ambientais na gestão de efluentes: contribuições para a sustentabilidade hídrica em empreendimentos de médio porte**. Revista Engenharia e Sustentabilidade, v. 6, n. 2, p. 89-104, 2019.

COSTA, B. A.; KREWER, C. T.; BECKER, C. E.; GONCALVES, C. O.; SANTOS, I. A.; SCHERER, J. B.; ALVES, A. A. de A. **Determinação do índice de sustentabilidade da Cooperativa de Trabalho dos Catadores Unidos pela Natureza (COOPERCAUN) no município de Cerro Largo - RS**. In: CAMPOS, R.; SCHUCK, A.; BENDLIN, L.; SANTOS, R. C. dos (org.). Gestão empresarial, sustentabilidade e inovação tecnológica. 1. ed. Mafra: Editora UCS, 2024. p. 151-165.

COSTA, D. F. da; LIMA, A. R. de; SOUZA, T. M. de. **A atuação de cooperativas de catadores na gestão de resíduos sólidos urbanos: estudo de caso no Sul do Brasil**. Revista Brasileira de Desenvolvimento Sustentável, v. 10, n. 1, p. 112–128, 2024. DOI: 10.5935/rbds.v10n1.2024.012.

CUNHA, M. S.; RIBEIRO, A. F.; LIMA, P. R. **Indicadores de sustentabilidade em cooperativas de catadores: uma abordagem sistêmica**. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 13, e20210073, 2021.

DIAS, S. M.; ALVES, A. R. **Challenges in the management of municipal solid waste in developing countries: A review**. Waste Management & Research, v. 39, n. 12, p. 1431–1445, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242X2111039335>. Acesso em: 6 abr. 2025.

FERREIRA, J. R.; ALMEIDA, A. F. **Indicadores operacionais e sustentabilidade em cooperativas de catadores: estudo de caso em municípios do sul do Brasil**. Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental, v. 12, n. 2, p. 85–102, 2023.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GONÇALVES, L. A.; RODRIGUES, F. M.; COSTA, R. R. **Sustentabilidade e indicadores ambientais em cooperativas de reciclagem: um estudo aplicado no sul do Brasil**. Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 8, n. 3, p. 124–138, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades@ - Cerro Largo (RS)**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/cerro-largo/panorama>. Acesso em: 06 abr. 2025.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LIMA, P. M.; SILVA, T. R.; ALMEIDA, J. F. **Eficiência na gestão de resíduos sólidos urbanos: análise de cooperativas sob a ótica da economia circular**. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, n. 60, p. 9–22, 2021.

LOPES, A. G.; RODRIGUES, T. E. **Cooperativas de catadores e inclusão socioeconômica na gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil**. Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente, v. 60, p. 348–367, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/dma.v60i0.83252>. Acesso em: 6 abr. 2025.

MACEDO, L. A. R.; LANGE, L. C.; CASTILHOS JÚNIOR, A. B. de; GUTIÉRREZ, R. A.; LEVATINO, M. B. **Regionalização para a gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos: avanços e desafios para a sustentabilidade em consórcios públicos operantes no Brasil e na Argentina**. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica, v. 13, n. 3, p. 971–987, 2020. Disponível em: <https://www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/69722>. Acesso em: 15 maio 2025.

MAIA, L. H. S.; SILVA, M. À. F.; SOUZA, T. S.; NECA, C. S. M. (2023). **Esgotamento Sanitário: A Importância Do Tratamento Do Esgoto Doméstico E Industrial Em Pro L Da Qualidade De Vida E Sustentabilidade Ambiental :Uma Revisão De Literatura**. Revistaft, 27(123), 57. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8067557>

MARQUES, J. M.; GONZAGA, A. L. **Indicadores ambientais e inclusão produtiva de catadores: caminhos para a sustentabilidade**. Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente, v. 54, p. 295–312, 2020.

MEDEIROS, L. B.; SILVA, A. M.; GARCIA, J. B. **Indicadores de sustentabilidade para organizações de catadores de materiais recicláveis**. Sustainability in Debate, v. 12, n. 3, p. 410–429, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v12n3.2021.40557>. Acesso em: 6 abr. 2025.

MENSAH, J. **Sustainable development: Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action: Literature review**. Cogent Social Sciences, v. 6, n. 1, p. 1–21, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23311886.2020.1800953>. Acesso em: 6 abr. 2025.

OKOT-OKUMU, J.; NYENJE, R. **Solid waste segregation and recycling in urban settings: A systematic review of effectiveness and sustainability**. Journal of Environmental Management, v. 303, p. 114190, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114190>. Acesso em: 6 abr. 2025.

OLIVEIRA, R. L.; MENDES, F. A.; COSTA, L. M. **Gestão ambiental e sustentabilidade em empreendimentos de economia solidária**. Revista Gestão Sustentável, v. 10, n. 1, p. 45–62, 2021.

OLIVEIRA, T. R.; ANDRADE, L. F. **Práticas de manejo de águas residuárias em cooperativas de reciclagem: riscos e soluções.** Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 27, n. 1, p. 34–45, 2022.

PEREIRA, M. L. A.; MESSIAS, I. A. **Trabalho decente e sustentável em cooperativa de materiais recicláveis.** Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, v. 50, 2025. Disponível em: [https://www.scielo.br/j/rbso/a/6ZDTtyy4dJwSbMYmJ3YTpt/?form at=pdf&lang=pt](https://www.scielo.br/j/rbso/a/6ZDTtyy4dJwSbMYmJ3YTpt/?form%20at=pdf&lang=pt). Acesso em: 15 maio 2025.

RIBEIRO, H.; BESEN, G. R.; DEZINCOURT, R. M. **Sustainability indicators applied to solid waste management in cooperatives: A Brazilian case study.** Sustainability, v. 13, n. 8, p. 4561, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13084561>. Acesso em: 6 abr. 2025

SANTOS, T. G.; LIMA, M. A. **Indicadores ambientais em empreendimentos cooperativos: uma abordagem prática para sustentabilidade.** Revista Brasileira de Planejamento Ambiental, v. 12, n. 2, p. 77–93, 2022.

SAUERESSIG, G. G.; SELBITTO, M. A.; KADEL JR, N. **Papel das cooperativas de reciclagem no retorno de resíduos sólidos urbanos à indústria.** Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 14, n. 2, p. 355–366, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n2e6537>. Acesso em: 15 maio 2025.

SEVERO, L. S. **Evolução da sustentabilidade no processo produtivo de suínos da cooperativa de suinocultores de Encantado Ltda-Cosuel.** 2007.

SILVA, A. M.; PEREIRA, C. R.; SOUZA, D. L. **Gestão ambiental em unidades de triagem: indicadores e desafios operacionais.** Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 10, n. 1, p. 75–89, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/urbe/a/VphbjGPyh6QDYKdC4X6tK4m/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 15 maio 2025.

SILVA, D. R.; LIMA, E. F.; BARBOSA, M. N. **Educação ambiental e gestão de águas residuárias: estudo de caso em unidades de triagem.** Cadernos de Sustentabilidade Ambiental, v. 5, n. 2, p. 74–89, 2023.

SILVA, M. A.; ARAÚJO, L. R. **Cooperativas e gestão de resíduos sólidos: desafios e perspectivas para a inclusão socioeconômica de catadores.** Revista de Administração Pública, v. 57, n. 2, p. 320-339, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-761220220123>. Acesso em: 15 maio 2025.

SILVA, M. A.; OLIVEIRA, L. F.; SANTOS, R. M. **Aplicação de indicadores de sustentabilidade na gestão de resíduos sólidos urbanos: uma análise em unidades de triagem.** Revista Brasileira de Gestão Ambiental, v. 12, n. 3, p. 47-60, 2018.

SILVA, M. R.; SOUZA, P. T. **Sustentabilidade ambiental e saúde pública: o papel das cooperativas de catadores.** Revista Ciências Ambientais, v. 20, n. 1, p. 101–115, 2022.

SILVA, R. L.; OLIVEIRA, A. S.; FERREIRA, P. H. **A importância dos indicadores de sustentabilidade na gestão de resíduos sólidos urbanos por cooperativas.** Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente, v. 52, p. 40-58, 2020.

SOUZA, F. D.; PEREIRA, L. A.; BATISTA, E. P. **Sustentabilidade e Economia Solidária: indicadores participativos em cooperativas de reciclagem.** Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, v. 24, p. 1-18, 2022.

SOUZA, R. M.; SILVA, V. T. **Avaliação da performance de cooperativas de materiais recicláveis com base em indicadores de sustentabilidade.** Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente, v. 58, p. 197–214, 2022.

ZHANG, D.; TAN, S. K.; GERSBERG, R. M. **Sustainable municipal solid waste management in China: Challenges and opportunities.** Journal of Environmental Management, v. 261, p. 110162, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110162>. Acesso em: 6 abr. 2025.

ZHANG, L.; XU, L. **Municipal solid waste management: Current state and future potential for China.** Journal of Environmental Management, v. 282, p. 111968, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111968>. Acesso em: 6 abr. 2025.



Previsão da Emissão de CO_2 no Manejo de Solo Agrícola em Mato Grosso: Subsídios para Mitigação de Impactos Ambientais

Co₂ Emission Prediction in Agricultural Soil Management in Mato Grosso: Subsidies for Mitigation of Environmental Impacts

Bianca Monique Engels Oliveira

Universidade Federal de Mato Grosso

Carolina Mafini Domingues

Universidade Federal de Mato Grosso

Gabrielle Carvalho Bueno

Universidade Federal de Mato Grosso.

Isabelly Rondon Borba

Universidade Federal de Mato Grosso. <https://orcid.org/0009-0008-6923-5357>

Nicolas Del Castanhel

Universidade Federal de Mato Grosso. <https://lattes.cnpq.br/3975951284148901>

Resumo: A agricultura tem papel central no desenvolvimento econômico do estado de Mato Grosso, sendo referência nacional na produção de grãos. Contudo, o avanço do setor agrícola está diretamente relacionado à intensificação do uso do solo e, conseqüentemente, ao aumento das emissões de dióxido de carbono (CO_2), um dos principais gases de efeito estufa. Práticas como o preparo convencional do solo, a remoção da cobertura vegetal e o uso inadequado de insumos agrícolas contribuem para a mineralização da matéria orgânica e a liberação de carbono para a atmosfera. Este trabalho tem como objetivo prever a emissão de CO_2 decorrente do manejo do solo agrícola em Mato Grosso, utilizando dados históricos de uso da terra e informações edafoclimáticas. A partir dessa previsão, busca-se subsidiar a adoção de práticas agrícolas sustentáveis que reduzam os impactos ambientais e contribuam para o cumprimento das metas de redução de emissões assumidas pelo Brasil em acordos internacionais. A análise destaca a importância da transição para sistemas de manejo conservacionistas, como o plantio direto e a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), capazes de promover o sequestro de carbono no solo. A previsão das emissões associadas ao uso agrícola do solo permite o planejamento mais eficiente de políticas públicas e estratégias de mitigação, favorecendo uma produção agrícola alinhada à sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: agricultura; emissão; previsão; carbono.

Abstract: Agriculture plays a central role in the economic development of the state of Mato Grosso, serving as a national benchmark in grain production. However, the growth of the agricultural sector is directly linked to the intensification of land use and, consequently, to increased emissions of carbon dioxide (CO_2), one of the main greenhouse gases. Practices such as conventional soil preparation, the removal of vegetation cover, and the inappropriate use of agricultural inputs contribute to the mineralization of organic matter and the release of carbon into the atmosphere. This study aims to predict CO_2 emissions from agricultural soil management in Mato Grosso, using historical land use data and soil and climate information.

Based on this forecast, we aim to support the adoption of sustainable agricultural practices that reduce environmental impacts and contribute to meeting the emissions reduction targets assumed by Brazil in international agreements. The analysis highlights the importance of transitioning to conservation management systems, such as no-till farming and integrated crop-livestock-forestry (ICLF), which can promote soil carbon sequestration. Forecasting emissions associated with agricultural land use allows for more efficient planning of public policies and mitigation strategies, favoring agricultural production aligned with environmental sustainability.

Keywords: agriculture; emission; prevision; carbon.

INTRODUÇÃO

O estado de Mato Grosso, por ser o maior produtor de grãos do país atualmente, ocupa um papel fundamental no desenvolvimento econômico do país relacionado à agricultura. Entretanto, esse grande crescimento demanda sérios desafios ambientais, com destaque na emissão de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO₂), acentuada por práticas de manejo do solo inadequadas (Cerri *et al.*, 2007; EMBRAPA, 2020).

A queima de vegetação e degradação da presente no solo, é a grande causa das emissões de CO₂ devido a alterações no uso do solo, para o desflorestamento e a transformação de áreas naturais em campos agrícolas (Fearnside, 2005).

Nesse cenário, a aplicação de estratégias que conciliam produtividade agrícola com responsabilidade ambiental é de suma importância. A estimativa das emissões de CO₂ causadas pelo manejo do solo é uma ferramenta essencial para orientar a implementação de práticas conservacionistas, estimulando a mitigação dos impactos ambientais e auxiliando o Brasil no cumprimento das metas climáticas acordadas internacionalmente, como as previstas no Acordo de Paris (MCTI, 2021).

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo estimar a emissão de CO₂ relacionada às práticas agrícolas de manejo do solo no estado de Mato Grosso, por meio da análise de dados, históricos de uso da terra e condições climáticas, com o intuito de subsidiar políticas públicas e práticas sustentáveis que reduzam a pegada de carbono na agropecuária.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Emissão de Co₂ no Manejo de Solo Agrícola em Mato Grosso

As práticas de manejo do solo na agricultura exercem influência direta sobre o balanço de carbono dos ecossistemas, sendo determinantes na emissão ou sequestro de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera. No estado de Mato Grosso, onde a agricultura de larga escala ocupa papel de destaque nacional, os impactos ambientais decorrentes do uso do solo vêm sendo amplamente discutidos, sobretudo em relação à emissão de gases de efeito estufa (GEE) (Cerri *et al.*, 2007; EMBRAPA, 2020).

A conversão de vegetação nativa em áreas agrícolas é uma das principais fontes de emissão de CO₂ no estado. Esse processo libera carbono estocado na biomassa e na matéria orgânica do solo, principalmente em áreas do Cerrado e da Amazônia Legal, onde a substituição da cobertura vegetal original por monoculturas intensivas é recorrente (Fearnside, 2005). Estudos apontam que as maiores perdas de carbono ocorrem nos primeiros anos após a abertura da terra, intensificadas por práticas convencionais como o revolvimento profundo, queima de resíduos vegetais e uso de arado (Lal, 2004; Bayer *et al.*, 2013).

Além disso, a ausência de práticas conservacionistas, como o plantio direto e a cobertura do solo, acentua a mineralização da matéria orgânica, reduzindo a capacidade do solo de reter carbono e aumentando a emissão de CO₂ (Silva *et al.*, 2021). Em Mato Grosso, onde a pressão por produtividade é alta, ainda é comum a adoção de sistemas de cultivo contínuo, com pouca rotação de culturas, o que contribui para a degradação dos atributos físicos e biológicos do solo (Marques *et al.*, 2019).

O Agronegócio em Mato Grosso e o uso do Solo

O Mato Grosso é um dos estados mais promissores do Brasil no setor do agronegócio, destacando-se pela grande produção de grãos, como soja e milho, além de ser um dos maiores exportadores de carne bovina do país (IBGE, 2023). Por isso, a agropecuária desempenha um papel fundamental na economia estadual, contribuindo de forma significativa para a economia nacional (Santos, 2023).

Entretanto, o crescimento do agronegócio no estado tem gerado um impacto profundo no uso do solo. As vastas áreas de vegetação nativa, como o Cerrado e a Amazônia, foram, com o tempo, sendo substituídas por lavouras e pastagens para os animais (Almeida, 2021). Essa mudança no uso do solo tem gerado debates sobre os efeitos ao meio ambiente, recursos naturais e comunidades locais (Ferreira, 2020).

Embora o setor tenha impulsionado a economia e promovido a criação de empregos e a expansão das infraestruturas regionais, também surgem questões críticas relacionadas ao desmatamento, à perda de biodiversidade e à degradação dos solos (Costa, 2023). Por isso, a transformação das paisagens naturais em áreas de cultivo, sem a devida gestão, pode resultar em sérios problemas ambientais, como a perda de habitats e a alteração dos ciclos hidrológicos (Oliveira, 2022).

O equilíbrio entre o crescimento econômico e a preservação ambiental é o maior desafio para Mato Grosso. A implementação de práticas sustentáveis pode ser a chave para garantir que o agronegócio continue a crescer sem comprometer a saúde do meio ambiente (Santos, 2023).

Emissão de CO₂ associada ao manejo de solo

Um dos maiores reservatórios de carbono do planeta é o solo, sendo maior do que a vegetação e participa ativamente no ciclo global e com importante papel no controle dos níveis de dióxido de carbono CO₂. No entanto, esse estoque pode ser afetado por práticas inadequadas de manejo do solo, que se transformam em fontes significativas de emissão (EMBRAPA, 2020).

Aração e a gradagem é uma das diversas práticas agrícolas convencionais, que expõem a matéria orgânica do solo ao oxigênio atmosférico, acelerando a decomposição e a conseqüente liberação de CO₂ para a atmosfera. De acordo com LAL, sistemas agrícolas que fazem uso de revolvimento mecânico contínuo, podem perder entre 30% à 70% do carbono armazenado no solo ao longo de décadas (LAL, 2004).

A utilização de fertilizantes químicos contribui para o aumento das emissões de gases de efeito estufa, de forma direta por combustíveis fósseis na produção e transporte e a indireta com o aumento da emissão de óxidos de nitrogênio que é um gás com potencial de aquecimento global superior ao CO₂ (Martins, 2003).

Apesar das vantagens, a adoção de práticas conservacionistas enfrenta limitações técnicas, econômicas e de mensuração. É essencial considerar aspectos como a permanência do carbono no solo, o risco de reversão do estoque e o monitoramento de gases como metano (CH₄) e N₂O, que também são influenciados pelo manejo adotado o biochar se degrada de maneira muito mais lenta, armazenando carbono no solo de forma 1500 a 2000 vezes mais duradoura do que a matéria orgânica não pirolisada, podendo permanecer por séculos ou até milênios (Bersi, 2024).

De acordo com (Escobar, 2011), o impacto ambiental de diferentes práticas agrícolas precisa ser compreendido com a finalidade de identificar sistemas conservacionistas de manejo de solo produtivos e sustentáveis ao longo prazo. De todos os aspectos ambientais relacionados à agricultura, tem sido dada a emissão de GEE e as possíveis estratégias de mitigação com o objetivo de contribuir para a diminuição do aquecimento global.

Impactos ambientais com a emissão de CO₂

A emissão de dióxido de carbono (CO₂) decorrente do manejo do solo agrícola, especialmente em regiões de alta produção como Mato Grosso, gera impactos ambientais significativos. Esses efeitos vão além da atmosfera, atingindo também a biodiversidade, os recursos hídricos e a saúde do solo. De acordo com Apps *et al.* (1999) e Baumert (2005), as principais fontes de emissão de gases de efeito estufa (GEEs) de origem antrópica estão relacionadas às mudanças no uso da terra, à queima de combustíveis fósseis e às atividades industriais.

O impacto ambiental da agricultura no contexto das emissões de gases de efeito estufa (GEEs) tem ganhado crescente relevância. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), a agropecuária, o

uso da terra e a mudança na gestão do solo são responsáveis por aproximadamente 25% das emissões globais de GEEs, o equivalente a 10 a 12 Pg CO₂-eq por ano. Esse dado reforça a urgência de estudos voltados à mitigação desses setores, visando prevenir maiores impactos climáticos no futuro.

Segundo o IPCC (2014), embora o setor de agronegócio seja um dos principais emissores de gases de efeito estufa (GEEs), ele também está entre os mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas. Como atividade altamente dependente de condições climáticas estáveis, o agronegócio será diretamente afetado por extremos de temperatura e pela maior variabilidade no regime de chuvas, incluindo períodos de seca ou precipitações excessivas. Sendo assim, mesmo em regiões onde os níveis de precipitação são relativamente constantes, o aumento das temperaturas pode intensificar a evapotranspiração, reduzindo a disponibilidade de água no solo, isso compromete o desenvolvimento das culturas agrícolas.

Políticas e Estratégias de Mitigação no Agronegócio

A mitigação dos gases de efeito estufa (GEEs) tem se consolidado como uma estratégia central nas pesquisas voltadas à sustentabilidade dos sistemas produtivos (Hristov *et al.*, 2013). Um desafio importante para o agronegócio, é conter os problemas causados pela emissão de CO₂. Para enfrentar esse cenário, algumas estratégias gerais são propostas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, independentemente do setor de origem. Entre elas, destaca-se a prevenção do desmatamento e das queimadas, a redução do uso de combustíveis fósseis e o incentivo a práticas que favoreçam o sequestro de carbono atmosférico (Cerri *et al.*, 2007).

Nesse contexto, uma das principais ações é a adoção de práticas conservacionistas, como o plantio direto, que reduz o revolvimento do solo e evita a liberação de carbono. Segundo a Embrapa (2022), essa prática favorece o acúmulo de matéria orgânica e o sequestro de CO₂ no solo. A integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) também tem se destacado por combinar diferentes sistemas produtivos no mesmo espaço, otimizando o uso da terra e promovendo a ciclagem de nutrientes.

No campo das políticas públicas, o Plano ABC+ (2020–2030) oferece crédito e assistência técnica a produtores que adotam tecnologias sustentáveis, como o ILPF, o plantio direto e a recuperação de áreas degradadas (Brasil, 2024). O plano, coordenado pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), é um dos principais instrumentos de apoio à agricultura de baixo carbono.

Além disso, o Código Florestal Brasileiro (Lei n.º 12.651/2012) estabelece a obrigatoriedade da manutenção de áreas de reserva legal e de preservação permanente, que atuam como importantes sumidouros de carbono e contribuem para o equilíbrio dos ecossistemas. Paralelamente, a inovação tecnológica desempenha um papel essencial na mitigação das emissões. O uso de cultivares mais eficientes, a aplicação de bioinsumos e a adoção da agricultura de precisão permitem otimizar

o uso de fertilizantes e defensivos, reduzindo perdas e, conseqüentemente, as emissões de gases de efeito estufa.

Modelos de Previsão de Séries Temporais

A análise de séries temporais tem como objetivo identificar relações de dependência no decorrer do tempo, elucidar o processo subjacente à série, descrever o seu padrão (comportamento) e realizar previsões (Bayer e Souza, 2010).

Há vários métodos disponíveis para modelar uma série temporal com o propósito de prever seus valores futuros, sendo que esses métodos variam em complexidade na forma como lidam com as informações contidas na série (Bressan, 2004).

As séries temporais apresentam comportamentos que se repetem nos dados ao longo do tempo. De acordo com Hyndman e Athanasopoulos (2021) esses padrões são classificados em:

- **Tendência:** ocorre quando existe um crescimento ou decréscimo de longo prazo nos dados;
- **Sazonalidade:** ocorre quando a série temporal é afetada por fatores sazonais, tais como, um mês de um ano ou um dia da semana;
- **Ciclos:** ocorre quando os dados exibem máximos e mínimos que não estão relacionados à frequência fixa.

Os dados coletados devem ser observados antes da aplicação de qualquer método de previsão, identificando os padrões para escolher o método mais eficaz para o padrão detectado.

Modelo *Autoregressive Integrated Moving Average* (ARIMA)

Os modelos ARIMA, fundamentam-se na concepção de que é possível modelar uma série temporal não estacionária por meio da aplicação de diferenciações e da incorporação de um componente auto regressivo e um componente de média móvel (Bressan, 2004).

Para operar os cálculos das previsões na modelagem ARIMA são necessários três passos fundamentais, sendo eles (Box e Jenkins, 1976):

(i) identificação de modelos potenciais: aqui, busca-se encontrar o modelo que melhor descreve o comportamento da série temporal analisada através dos ordens dos parâmetros autoregressivos simples ou sazonal (p e P) e de médias móveis simples ou sazonal (q e Q). Isto é realizado através de análises e comparação dos padrões das funções de autocorrelação (ACF) e de autocorrelação parcial (PACF) da série temporal com os respectivos padrões teóricos dos correlogramas da ACF e PACF;

(ii) estimação dos parâmetros e validação dos modelos: neste segundo passo os parâmetros dos modelos são estimados fazendo-se uso de pacotes computacionais e estatísticos. Além disso, é realizada ainda a validação dos modelos verificando se os resíduos (erros de previsão) se comportam como ruídos branco,

o que indica que o modelo pode ser usado para realizar previsões futuras da série temporal estudada. Caso os resíduos não sejam aleatórios, torna-se necessário considerar outro modelo, estimar seus parâmetros e avaliar novamente os resíduos. Para que os erros sejam aleatórios, espera-se que nenhum coeficiente da ACF e PACF dos resíduos seja significativo;

(iii) previsão: neste último passo, é utilizado o modelo selecionado anteriormente para obter previsões futuras da série temporal estudada.

Cabe ressaltar que as três etapas citadas anteriormente devem ser realizadas quantas vezes forem necessárias para se obter um modelo satisfatório que reflita adequadamente o processo gerador da série temporal (Morettin e Tolo, 2006). Adiante, são apresentadas as características e equações matemáticas dos modelos referentes aos termos auto regressivos (AR) e média móvel (MA), bem como os modelos ARMA e ARIMA.

O modelo autorregressivo de ordem p - AR (p), é apropriado para casos onde as observações de uma série temporal, em alguns instantes no tempo, estão fortemente correlacionados com os seus valores passados (Levine *et al.*, 2012). Trata-se de um modelo estocástico que representa uma quantidade grande de séries temporais (Pellegrini, 2000).

A Equação (1) representa o modelo AR (p) que expressa uma regressão da variável dependente em função de seus valores passados (Makridakis; Wheelwright; Hyndman, 1998):

$$y_t = c + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (1)$$

Em que: c é o termo constante; ϕ_i é o parâmetro do modelo e descreve como uma observação corrente y_t se relaciona com os valores passados $y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-p}$; ε_t é o erro aleatório no período t ; $i = 1, \dots, p$.

Já o modelo de média móvel de ordem q - MA (q) - é representado através da equação (2). De acordo com Makridakis *et al.* (1998), este modelo realiza a regressão da variável y_t com os erros aleatórios passados $\varepsilon_{t-1}, \varepsilon_{t-2}, \dots, \varepsilon_{t-q}$:

$$y_t = c - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t \quad (2)$$

Onde: c é o termo constante; θ_j é o parâmetro do modelo que representa como uma observação corrente y_t se relaciona com os erros aleatórios passados $\varepsilon_{t-1}, \varepsilon_{t-2}, \dots, \varepsilon_{t-q}$; $j = 1, \dots, q$.

Os modelos autorregressivos e de médias móveis - ARMA (p, q) - realiza a combinação das características dos modelos AR (p) e MA (q), sendo que y_t é descrito por seus valores passados e pelos ruídos aleatórios corrente e passados (Makridakis; Wheelwright; Hyndman, 1998). O modelo ARMA (p, q) é representado pela Equação (3):

$$y_t = c + \phi_1 y_{t-1} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (3)$$

Em que: c, ϕ_i, y_t, θ_j e ε_t já foram definidos anteriormente.

Cabe ressaltar que os modelos apresentados anteriormente relacionados aos termos autorregressivos (AR), de média móvel (MA) e autorregressivos e de

médias móveis (ARMA), são usados para situações onde as séries temporais são estacionárias, isto é, apresentam médias e variâncias constantes ao longo do tempo.

Para séries temporais não estacionárias, deve-se proceder com as transformações (diferenças) das mesmas para que se tornem estacionárias. Assim, quando há necessidade de transformação de uma série não estacionária em estacionária, é utilizado o modelo ARIMA (p, d, q). Tal modelo é composto pelos componentes AR (p) e MA (q), com a série original diferenciada d vezes, sendo representado pela Equação (4) (Makridakis; Wheelwright; Hyndman, 1998):

$$w_t = c + \phi_1 w_{t-1} + \dots + \phi_p w_{t-p} + \varepsilon_t - \theta - \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_p \varepsilon_{t-p}, \quad (4)$$

Onde: $w_t = \Delta^d y_t = (1 - L)^d y_t$; e c, ϕ_i, θ_j e ε_t já foram definidos anteriormente.

Modelo Suavização Exponencial com Tendência – Modelo Linear de Holt

O modelo linear de Holt, é um técnica de previsão utilizada em dados que apresentam tendências crescentes ou decrescentes não sazonais. É um método estendido da suavização exponencial simples, onde envolve uma equação de nível (5), equação de tendência (6) e equação de previsão (7) (Holt, 1957):

$$\hat{\ell}_t = \alpha y_t + (1 - \alpha) (\hat{\ell}_{t-1} + b_{t-1}) \quad (5)$$

A equação calcula o nível estimado no tempo atual ($\hat{\ell}_t$) como uma média ponderada, entre y_t (o valor atual observado da série) e a previsão feita no tempo anterior, expressa por $\hat{\ell}_{t-1}$ (nível estimado no tempo anterior) somado com b_{t-1} que é a tendência estimada no tempo anterior. O termo α representa a melhor estimativa que o modelo tinha para o valor de y_t , com base no nível e na tendência, essa equação faz um ajuste do nível atual.

$$b_t = \beta (\hat{\ell}_t - \hat{\ell}_{t-1}) + (1 - \beta) b_{t-1} \quad (6)$$

A Equação 6 atualiza a estimativa da tendência (b_t), com base na mudança real observada no nível da série entre os tempos $\hat{\ell}_t - \hat{\ell}_{t-1}$, ajustando-se às variações reais que ocorrem na série temporal. O termo β é o parâmetro de suavização da tendência, onde, se for próximo de 1, o modelo dá mais peso à nova variação do nível e se for próximo de 0, o modelo preserva mais a tendência anterior.

$$\hat{y}_{t+h|t} = \hat{\ell}_t + hb_t \quad (7)$$

A expressão $\hat{y}_{t+h|t}$, representa a previsão do valor da série no tempo t (tempo atual) + h (períodos à frente), $\hat{\ell}_t$, sendo o nível da série no tempo, ou seja, uma estimativa suavizada do valor médio da série até o tempo atual e b_t a tendência estimada da série no tempo, que indica a direção da evolução da série.

METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho, foram adotados dois métodos complementares, o método de pesquisa bibliográfica, que consiste reunir dados

com base em fontes já publicadas, conteúdos provenientes de artigos, livros e sites da internet, essa metodologia é fundamental para oferecer embasamento teórico. E a pesquisa quantitativa, implica em converter dados em valores numéricos, para serem analisados com o intuito de detectar padrões, utilizada em pesquisas com uso de estatísticas e avaliação de grandes conjuntos de dados (Santana *et al.*, 2025).

Além disso, o desenvolvimento do trabalho também contou com o uso de software específico para a realização de previsões, o que contribuiu para a aplicação prática dos conceitos estudados e para a obtenção de resultados.

Coleta de Dados

A base de dados utilizada neste estudo foi obtida por meio do Sistema de estimativas de emissões e remoções de gases de efeito estufa (Seeg).

A base de dados operada foi atualizada pela última vez no mês de novembro de 2024 e foram utilizadas 6 variáveis da base da Seeg, sendo elas: Ano, Emissão, UF da emissão, Gás, Setor de emissão e Categoria emissora.

Os dados históricos utilizados para este estudo se referem à quantidade, em megatonelada (Mt), de emissão de CO₂ por manejo de solo no agronegócio de Mato Grosso e abrangem o período de 1970 a 2023, conforme mostrado no Apêndice A.

Análise de Dados

Com base nos resultados obtidos, procedeu-se ao tratamento dos dados com o intuito de preparar a base para a aplicação dos modelos de previsão. Inicialmente, foram filtradas e organizadas na planilha apenas a variável considerada essencial para a análise, tal como: a quantidade de CO₂ emitida, apresentada no Apêndice B – Base estratificada dos dados históricos. Essa seleção visou eliminar ruídos e informações redundantes, de modo a garantir maior clareza e objetividade na interpretação dos dados.

A partir do levantamento, foi construído um gráfico de linha representando a série de dados ao longo dos anos. Essa representação gráfica teve como principal objetivo a identificação de padrões comportamentais recorrentes nos dados, possibilitando uma análise visual preliminar quanto à presença de tendência, sazonalidade ou ciclos.

Aplicação de Métodos de Previsão de Séries Temporais

Nesta etapa, foram aplicados os métodos de previsão previamente descritos. Inicialmente, a base de dados foi dividida em porções de treino (42 anos observados) para estimar os parâmetros e ajustar o modelo, e teste (12 anos observados) o conjunto é usado para a validação e análise das medidas de acurácia.

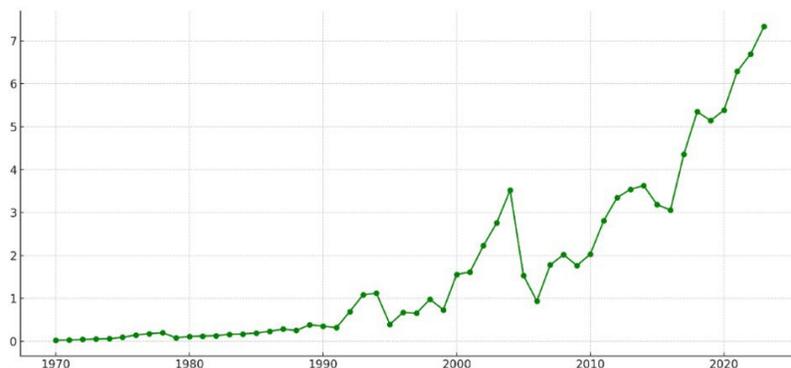
A partir da porção de teste da base de dados, o programa R apresenta as medidas de acurácia, que permitem avaliar o desempenho do modelo na previsão de novos dados. Essas medidas são obtidas a partir da comparação entre os valores observados e os valores ajustados (ou previstos).

A partir dos valores encontrados, a escolha do modelo será baseada no menor valor de acurácia. Essa métrica indica o quão distante, as previsões do modelo estão dos valores reais, quanto menor o resultado mais próximo as previsões estão dos valores observados, dando maior precisão e confiabilidade ao modelo.

RESULTADOS

A figura 1 apresenta a série temporal da quantidade de emissão de CO₂ pelo agronegócio em Mato Grosso de 1970 a 2023.

Figura 1 - Quantidade anual emitida de CO₂ pelo agronegócio em Mato Grosso.



Fonte: autoria própria, 2025.

A partir da figura 2, é possível observar que os dados apresentam um padrão de tendência de crescimento. Esse comportamento indica uma variação sistemática ao longo do tempo, caracterizada por um crescimento consistente nos valores registrados de emissão.

Esse tipo de padrão sugere que, ao longo do período analisado, houve fatores constantes ou progressivos, sejam eles econômicos, climáticos, tecnológicos ou operacionais que impactaram de forma contínua os níveis de produção e consequentemente de emissão.

Na etapa de modelagem, utilizou-se inicialmente com o `code auto.arima()`, foi feita a escolha automática do modelo ARIMA para modelar e prever a série temporal estudada. O modelo escolhido foi o ARIMA (1,1,3) com drift, ou seja, uma tendência média. Após a obtenção do modelo foi feita a verificação da qualidade do modelo com a aplicação do teste de *Ljung-Box*, apresentado na tabela 1.

Tabela 1 - Resultado pós-verificação.

| Modelo ARIMA (1,1,3) | |
|-----------------------------|--------------|
| Coefficiente | Valor |
| p-Valor | 0.1815 |

Fonte: autoria própria, 2025.

O resultado mostra que não há autocorrelação nos resíduos, indicando que o modelo está adequadamente ajustado aos dados históricos. Em seguida, são apresentados os valores encontrados para as métricas de desempenho (erros de previsão) para a porção de dados de teste (tabela 2).

Tabela 2 - Resultado métricas de desempenho.

| Modelo ARIMA (1,1,3) | |
|--|-----------------|
| Medidas de acurácia - Porção de Teste | |
| MAE | 395.187 |
| MSE | 245.477.258.244 |
| MAPE | 8,6% |

Fonte: autoria própria, 2025.

O modelo apresentou bom desempenho, conseguiu capturar de forma adequada o comportamento da série temporal, proporcionando previsões confiáveis para os próximos períodos.

O próximo modelo analisado, foi o linear de Holt, são apresentados as métricas de desempenho para o modelo linear de Holt na porção de dados de teste, apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 - Resultado métricas de desempenho.

| Modelo de Holt | |
|--|-----------------|
| Medidas de acurácia - Porção de Teste | |
| MAE | 436.000 |
| MSE | 308.964.589.965 |
| MAPE | 9,5% |

Fonte: autoria própria, 2025.

O modelo apresentou comportamento razoável ao ajustar os dados históricos. O erro percentual absoluto médio (MAPE), foi de aproximadamente 9,5%, indicando que, em média, o valor previsto se distancia próximo de 10% do valor real, o que é considerado adequado.

Após aplicados os métodos de previsão na série temporal na emissão de CO2 pelo agronegócio de Mato Grosso, foi possível analisar os desempenhos dos dois modelos considerados, conforme apresentado na tabela 4.

Tabela 4 - Comparativo dos resultados dos modelos.

| Medidas de acurácia - Porção de Teste | |
|--|-------------|
| Modelos | MAPE |
| ARIMA (1,1,3) | 8,6% |
| Holt | 9,5% |

Fonte: autoria própria, 2025.

A partir dos resultados da Tabela 4, é possível observar que o modelo ARIMA (1,1,3) apresentou a métrica de erro MAPE menor com 8,6%, o que indica boa capacidade de ajuste às séries históricas, além de prever um crescimento consistente para os próximos anos.

Apesar de ambos os modelos exibirem erros baixos, o ARIMA(1,1,3) revelou-se mais eficaz na adaptação aos dados, o que se deve à versatilidade de seus elementos autorregressivos e de média móvel. Em contrapartida, o modelo de Holt, embora seja mais básico, ainda gera estimativas que se aproximam da realidade.

Após avaliar o desempenho durante os testes realizados e analisando o padrão da série temporal em questão, o modelo ARIMA com parâmetros $(p,d,q)=(1, 1, 3)$ foi escolhido para realizar projeções sobre as emissões de CO₂ no manejo do solo do agronegócio de Mato Grosso, no período compreendido entre os anos de 2026 até 2030, cujos resultados com os respectivos intervalos de confiança de 80% e 95% estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Previsões com intervalo de confiança com modelo ARIMA (1,1,3).

| Modelo ARIMA (1,1,3) | | | | | |
|-----------------------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Ano | Previsão (Mt) | Lo 80 | Hi 80 | Lo 95 | Hi 95 |
| 2026 | 7.480.333 | 6.362.803 | 8.597.863 | 5.771.219 | 9.189.448 |
| 2027 | 7.763.886 | 6.555.435 | 8.972.337 | 5.915.719 | 9.612.052 |
| 2028 | 7.795.613 | 6.462.837 | 9.128.390 | 5.757.307 | 9.833.920 |
| 2029 | 8.005.283 | 6.585.334 | 9.425.233 | 5.833.658 | 10.176.908 |
| 2030 | 8.089.217 | 6.569.736 | 9.608.699 | 5.765.371 | 10.413.063 |

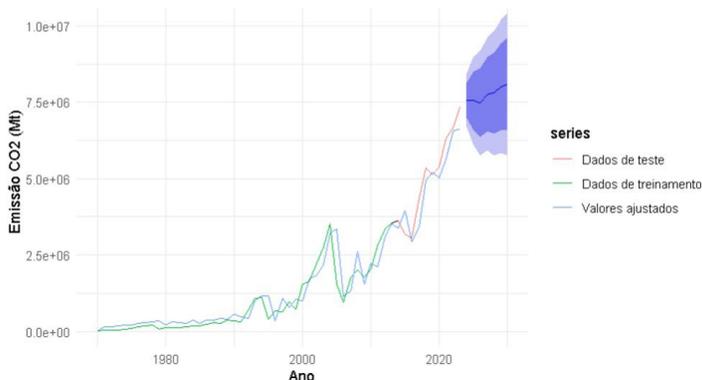
Fonte: autoria própria, 2025.

As previsões realizadas para o período de 2026 a 2030 indicam uma tendência consistente de crescimento da variável analisada, evidenciado a continuidade do aumento das emissões de CO₂ no estado de Mato Grosso com o manejo do solo na área do agronegócio. De acordo com os resultados obtidos, o valor previsto para as emissões cresce de aproximadamente 7.4 megatoneladas em 2026 para 8.08 megatoneladas em 2030, reforçando a perspectiva de que ainda é necessário adotar medidas mais rigorosas que resultem na redução desses dados nos próximos anos.

Além das previsões centrais fornecidas pelo modelo, foram calculados os intervalos de confiança de 80% e 95%, os quais indicam as faixas em que se espera encontrar os valores reais levando em conta a incerteza associada às projeções.

Observa-se na figura 2, que a amplitude desses intervalos aumenta gradualmente à medida que o horizonte de previsão se estende, característica comum em análises de séries temporais.

Figura 2 - Previsões do modelo ARIMA (1,1,3) com intervalos de confiança de 80% e 95%.



Fonte: autoria própria, 2025.

Apesar desse comportamento citado anteriormente, os intervalos de previsão permanecem relativamente concentrados, o que sugere que o modelo apresenta um desempenho satisfatório e uma confiança moderada nas projeções realizadas. Essas previsões podem ser muito úteis para fundamentar escolhas estratégicas em termos de políticas públicas e ambientais relacionadas à redução das emissões de CO₂ e ao planejamento sustentável do crescimento econômico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como principal objetivo aplicar técnicas de séries temporais, com destaque para o modelo ARIMA e o modelo linear de Holt para prever a emissão de CO₂ no estado de Mato Grosso com o aumento do manejo de solo no agronegócio nos próximos 5 anos. A escolha desses modelos se deu em função da sua simplicidade na aplicação e da capacidade de capturar tendências ao longo do tempo, mesmo em contextos com certa instabilidade.

Em síntese, a aplicação do modelo ARIMA para a previsão final das emissões demonstrou ser eficaz, reforçando a utilidade de ferramentas de séries temporais como apoio à tomada de decisão estratégica. O modelo linear de Holt não foi adotado como o principal modelo para as previsões finais deste estudo devido às limitações observadas na sua capacidade de representar adequadamente o comportamento dos dados analisados.

Além disso, o estudo destaca que práticas como plantio direto e ILPF são essenciais para sequestrar carbono no solo e conter emissões, o que é essencial para políticas públicas mais eficientes e o cumprimento das metas climáticas do Brasil. O estudo reforça que é possível conciliar o crescimento do agronegócio em Mato Grosso com responsabilidade ambiental, desde que práticas sustentáveis sejam priorizadas. Pesquisas futuras podem incluir mais variáveis socioeconômicas e climáticas, além de avaliar o impacto de diferentes políticas agrícolas nas emissões de CO₂.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Carla. **Uso e ocupação do solo em áreas de fronteira agrícola: o caso do Mato Grosso**. Cuiabá: UFMT, 2021.
- APPS, M. J. *et al.* **Carbon budget of the Canadian forest product sector**. Environment Science & Policy, Vancouver, v. 2, n. 1, p. 25–41, fev. 1999.
- BALDWIN, Katherine *et al.* **Revisão de Política Agrícola dos EUA, 2023**. 2024.
- BAUMERT, K. A. *et al.* **Navigating the Numbers: greenhouse gas data and international climate policy**. World Resources Institute, 2005.
- BAYER, C. *et al.* **Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till and conventional tillage**. Soil & Tillage Research, v. 133, p. 1–10, 2013.
- BAYER, F. M.; SOUZA, A. M. **Wavelets e modelos tradicionais de previsão: Um estudo comparativo**. Revista Brasileira de Biometria. v.28, p.40-61, 2010.
- BERSI, Juliane Araujo. **Aplicabilidade de biochar no âmbito da engenharia ambiental**. 2024.
- BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. **Time series analysis forecasting and control**. San Francisco: HoldenDay, 1976. Edição revisada.
- BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; [...] e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 28 maio 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 23 de jun. 2025.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Plano ABC+**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais>. Acesso em: 16 de jun. 2025.
- BRESSAN, A. A. **Tomada de decisão em futuros agropecuários com modelos de previsão de séries temporais**. RAE-eletrônica, v. 3, n. 1, Art. 9, jan./jun. 2004.
- CERRI, C. C. *et al.* **Greenhouse gas mitigation options in Brazil for land-use change, livestock and agriculture**. Scientia Agricola, v. 64, n. 3, p. 366–372, 2007.
- COSTA, Fernanda. **Desmatamento e perda de biodiversidade no Cerrado mato-grossense**. Campinas: Unicamp, 2023.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Emissões de Gases de Efeito Estufa na Agropecuária Brasileira e as Medidas de Mitigação**. Brasília, 2020.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Plantio Direto**. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/sistema-plantio-direto>. Acesso em: 18 de jun. 2025.

ESCOBAR, Luisa Fernanda. **Mitigação das emissões de gases de efeito estufa por sistemas conservacionistas de manejo de solo.** 2011

FERREIRA, João. **Impactos socioambientais da expansão agrícola no Centro-Oeste brasileiro.** São Paulo: Editora Ambiental, 2020.

FEARNSIDE, P. M. **Deforestation in Brazilian Amazonia: History, Rates, and Consequences.** Conservation Biology, v. 19, n. 3, p. 680–688, 2005.

HOLT, C. C. (1957). **Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted averages (ONR Memorandum No. 52).** Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh USA. Reprinted in the International Journal of Forecasting, 2004.

HRISTOV, A. N.; OH, J.; FIRKINS, J. L. KEBREAB, E.; WAGHORN, G.; MAKKAR, H. P. S.; ADESOGAN, A. T.; YANG, W.; LEE, C.; GARBER, P. J.; HANDERSON, B.; TRICARICO, J. M. **SPECIAL TOPICS: Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I.** A review of enteric methane mitigation options, Journal of Animal Science, v. 91, n. 11, p. 5045 – 5069, 2013.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção agrícola municipal: culturas temporárias e permanentes 2023.** Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

LAL, R. **Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security.** Science, v. 304, n. 5677, p. 1623–1627, 2004.

LAL, R. **Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security.** Science, v.304, p.1623-1627, 2004a.

LAL, R. **Soil carbon sequestration to mitigate climate change.** Geoderma, v. 123, n. 1–2, p. 1– 22, 2004b.

LEVINE, D. M. *et al.* **Estatística teoria e aplicações: usando o microsoft excel em português.** 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

MAKRIDAKIS, S.; WHEELWRIGHT, S.; HYNDMAN, R. J. **Forecasting: Methods and Applications.** 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.

MARTINS, Claudia Rocha *et al.* **Ciclos globais de carbono, nitrogênio e enxofre.** Cadernos temáticos de química nova na escola, v. 5, p. 28-41, 2003.

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.** Brasília, 2021.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de séries temporais.** 2. ed. São Paulo: Ed. Edgar Bluncher, 2006, 531 p.

OLIVEIRA, Mariana. **Alterações ambientais provocadas pela conversão de vegetação nativa em pastagens.** Belo Horizonte: UFMG, 2022.

PELLEGRINI, F. R. **Metodologia para implementação de sistemas de previsão de demanda**. 2000. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

PAINEL Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team: Pachauri RK, Meyer LA, editores.]. IPCC: Geneva, 2014. 151p.

REDE ILPF. **O que é ILPF**. [s.d.]. Disponível em: <https://redeilpf.org.br/o-que-e-ilpf/>. Acesso em: 26 de jun. 2025.

SANTANA, A.; NARCISO, R.; FERNANDES, A. B. **Explorando as metodologias científicas: tipos de pesquisa, abordagens e aplicações práticas**. Revista Caderno Pedagógico, v.22, n.1, p.01-18, 2025.

SANTOS, Rafael dos. **A contribuição da agropecuária para a economia estadual brasileira**. Brasília: IPEA, 2022.

SANTOS, Rafael dos. **Práticas sustentáveis no agronegócio mato-grossense**. Brasília: EMBRAPA, 2023.

STERN, N. **Stern Review: The Economics of Climate Change**. UK, 2006. 267 p.

APÊNDICE

A – BASE DE DADOS HISTÓRICOS.

| Ano | Emissão | Gás | Sector de emissão | Categoria emissora | Estado | Megatonelada (Mt) |
|------|---------|---------|-------------------|--------------------|-------------|-------------------|
| 1970 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 27.200 |
| 1971 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 35.159 |
| 1972 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 44.992 |
| 1973 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 54.729 |
| 1974 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 62.597 |
| 1975 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 92.853 |
| 1976 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 147.909 |
| 1977 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 179.346 |
| 1978 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 198.831 |
| 1979 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 83.865 |
| 1980 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 112.240 |
| 1981 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 122.635 |
| 1982 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 131.849 |
| 1983 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 164.412 |
| 1984 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 170.801 |
| 1985 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 193.001 |
| 1986 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 233.894 |
| 1987 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 285.346 |
| 1988 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 255.324 |
| 1989 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 383.533 |
| 1990 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 355.186 |
| 1991 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 317.923 |
| 1992 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 691.830 |
| 1993 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 1.086.462 |
| 1994 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 1.119.948 |
| 1995 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 395.514 |
| 1996 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 675.470 |
| 1997 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 656.020 |
| 1998 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 980.495 |
| 1999 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 733.436 |
| 2000 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 1.557.621 |
| 2001 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 1.616.433 |
| 2002 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 2.227.113 |
| 2003 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 2.760.733 |
| 2004 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 3.521.762 |
| 2005 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 1.535.059 |
| 2006 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 937.497 |
| 2007 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 1.777.683 |
| 2008 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 2.019.809 |
| 2009 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 1.764.513 |
| 2010 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 2.031.492 |
| 2011 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 2.806.073 |
| 2012 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 3.345.462 |
| 2013 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 3.541.714 |
| 2014 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 3.627.586 |
| 2015 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 3.183.349 |
| 2016 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 3.058.730 |
| 2017 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 4.356.518 |
| 2018 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 5.349.678 |
| 2019 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 5.142.603 |
| 2020 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 5.382.021 |
| 2021 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 6.291.589 |
| 2022 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 6.692.621 |
| 2023 | Emissão | CO2 (t) | Agropecuária | Solos manejados | Mato Grosso | 7.334.213 |

Fonte: autoria própria, 2025.

APÊNDICE B – BASE ESTRATIFICADA DOS DADOS HISTÓRICOS.

| Megatonelada (Mt) |
|-------------------|
| 27.200 |
| 35.159 |
| 44.992 |
| 54.729 |
| 62.597 |
| 92.853 |
| 147.909 |
| 179.346 |
| 198.831 |
| 83.865 |
| 112.240 |
| 122.635 |
| 131.849 |
| 164.412 |
| 170.801 |
| 193.001 |
| 233.894 |
| 285.346 |
| 255.324 |
| 383.533 |
| 355.186 |
| 317.923 |
| 691.830 |
| 1.086.462 |
| 1.119.948 |
| 395.514 |
| 675.470 |
| 656.020 |
| 980.495 |
| 733.436 |
| 1.557.621 |
| 1.616.433 |
| 2.227.113 |
| 2.760.733 |
| 3.521.762 |
| 1.535.059 |
| 937.497 |
| 1.777.683 |
| 2.019.809 |
| 1.764.513 |
| 2.031.492 |
| 2.806.073 |
| 3.345.462 |
| 3.541.714 |
| 3.627.586 |
| 3.183.349 |
| 3.058.730 |
| 4.356.518 |
| 5.349.678 |
| 5.142.603 |
| 5.382.021 |
| 6.291.589 |
| 6.692.621 |
| 7.334.213 |

Fonte: autoria própria, 2025.



Estudo de Caso sobre Reciclagem de Resíduos Sólidos na Construção Civil (RCC): Os Desafios da Cidade de Jaú

Case Study on Solid Waste Recycling in Civil Construction (C&D Waste): The Challenges Faced by the City of Jaú

Marcelo José Garcia

(FATEC-JAHU)

Pedro Aparecido Mariano

(FATEC-JAHU)

Ana Carolina Rodrigues Falcão

Orientadora (FATEC-JAHU)

Marina Carboni

Orientadora (FATEC-JAHU)

Resumo: O setor da construção civil desempenha um papel fundamental no desenvolvimento econômico e social, sendo responsável pela geração de empregos, o fortalecimento da indústria de materiais e o estímulo ao crescimento urbano. Contudo, essa atividade também se destaca como uma das principais responsáveis pela geração de resíduos sólidos, que causam impactos significativos ao meio ambiente, seja pela intensa extração de recursos naturais ou pela produção de insumos e o descarte inadequado de resíduos provenientes de obras e demolições. Este estudo tem como objetivo analisar o cenário da construção civil no município de Jaú, localizado no interior do estado de São Paulo, com foco na gestão dos resíduos de construção e demolição. A pesquisa enfatiza a importância da reciclagem desses materiais como uma alternativa viável e sustentável, capaz de reduzir os efeitos ambientais negativos provocados pelo setor. Além disso, busca identificar as principais práticas de reciclagem adotadas na região, bem como propor soluções e estratégias que possam aprimorar a gestão de resíduos. Assim, pretende-se contribuir para o desenvolvimento urbano sustentável, incentivando a adoção de políticas públicas e iniciativas privadas voltadas à reutilização de materiais e à preservação dos recursos naturais, alinhando-se aos princípios da sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: construção civil; resíduos; reciclagem; sustentabilidade; gestão.

Abstract: The construction sector plays a fundamental role in economic and social development, being responsible for job creation, the strengthening of the materials industry, and the stimulation of urban growth. However, this activity also stands out as one of the main contributors to the generation of solid waste, which causes significant environmental impacts, either due to the intense extraction of natural resources or the production of inputs and the improper disposal of waste from construction and demolition activities. This study aims to analyze the construction sector scenario in the municipality of Jaú, located in the interior of the state of São Paulo, focusing on the management of construction and demolition waste. The research emphasizes the importance of recycling these materials as a viable and sustainable alternative capable of reducing the negative environmental effects caused by the sector. Furthermore, it seeks to identify the main recycling practices adopted in the region, as well as

to propose solutions and strategies that can improve waste management. Thus, it is intended to contribute to sustainable urban development, encouraging the adoption of public policies and private initiatives aimed at material reuse and the preservation of natural resources, in alignment with the principles of environmental sustainability.

Keywords: construction sector; waste; recycling; sustainability; management.

INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores mais importantes da economia global. Segundo a ABRAINC - Associação Brasileira de Incorporação Imobiliária (2020), no mundo, o setor movimenta trilhões de dólares por ano e desempenha um papel crucial na geração de empregos e no crescimento econômico. No Brasil, o setor da construção civil também é um dos principais pilares da economia nacional, de acordo com dados da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC), o setor emprega milhões de trabalhadores e contribui significativamente para o Produto Interno Bruto (PIB) do país (CBIC, 2025).

Contudo, tanto no Brasil quanto no restante do mundo, a construção civil enfrenta desafios significativos no que diz respeito à sustentabilidade, o setor é um dos maiores geradores de resíduos sólidos, consumindo grandes volumes de recursos naturais. A geração de Resíduos sólidos da Construção Civil (RCC) é um dos principais problemas ambientais associados ao setor, esses resíduos, resultam tanto de novas construções quanto de demolições, reformas e escavações, quando descartados de maneira inadequada, os RCCs causam sérios impactos ambientais, como a contaminação do solo e da água, o aumento das emissões de gases de efeito estufa e a ocupação irregular de áreas (CBIC, 2025).

Diante deste cenário, a reciclagem de resíduos sólidos de construção civil surge como uma solução eficaz para minimizar os impactos negativos ao meio ambiente. A implementação de práticas de reciclagem não apenas contribui para a conservação de recursos naturais, mas também promovem a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental, aspectos que são cada vez mais relevantes na sociedade contemporânea. Segundo Conama (2007). A falta de uma gestão adequada, que inclua a triagem, a reciclagem e o reaproveitamento desses resíduos, intensifica os impactos ambientais, além de gerar desperdício de materiais que poderiam ser reutilizados em novas construções.

Assim, incluindo a cidade de Jaú, que em pleno desenvolvimento, enfrenta desafios relacionados ao gerenciamento de resíduos, que podem ser abordados por meio de políticas públicas efetivas e iniciativas de reciclagem. Portanto, este estudo visa investigar as práticas atuais de reciclagem de resíduos sólidos da construção civil em Jaú, identificar os desafios existentes e propor ações viáveis para ajudar a aprimorar a administração desses resíduos, contribuindo para um ambiente urbano mais sustentável e saudável.

EMBASAMENTO TEÓRICO

Com a publicação da Resolução 307 do CONAMA, em 2002, as empresas de construção civil passaram a ter a responsabilidade legal pelo gerenciamento dos resíduos que produziam. Entretanto, estudos indicam que já em 1986 existiam usinas de reciclagem operando no Brasil (Miranda, 2009).

Ainda pelo mesmo autor, as primeiras pesquisas científicas com resíduos reciclados de construção civil (RCC) foram realizadas por Pinto (1986), que explorou o uso de recicláveis em argamassas. Levy (1997) e Zordan (1997) também desenvolveram estudos com foco em argamassas e concretos. Em 2002, a atualização do RCD teve um impulso significativo na implementação dos planos de gerenciamento de resíduos em obras.

Em 2004, os Comitês Técnicos da ABNT elaboraram e publicaram normas técnicas para orientar o setor. A tabela 1 apresenta as normas técnicas relativas à RCD.

Tabela 1 – Normas técnicas relativas à RCD.

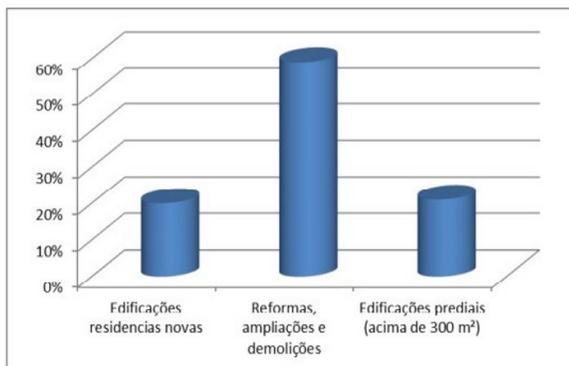
| Norma | Nome |
|------------------|---|
| NBR 15113 – 2004 | Resíduos sólidos a construção civil e resíduos inertes- aterros-diretrizes para projeto, implantação e operação. |
| NBR 15114 – 2004 | Resíduos sólidos da construção civil – áreas de reciclagem – diretrizes para projeto, implantação e operação. |
| NBR 15115 – 2004 | Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – execução em pavimentação e procedimentos |
| NBR 15116 – 2004 | Agregados reciclados de resíduos da construção civil – utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural- requisitos |

Fonte: adaptado de ABRECON, 2015.

Cunha e Barbosa (2016), apontaram que o Brasil já contava com 48 usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD), metade delas de gestão pública, com um volume reciclado de cerca de 5 %, na época, neste período havia expectativas para a expansão de usinas móveis de reciclagem. O cenário de reciclagem e gestão dos resíduos de construção e demolição (RCD) ganhou impulso com a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010) e sua regulamentação pelo Decreto Presidencial nº 7.404, em dezembro do mesmo ano.

Os resíduos gerados no processo de reciclagem podem ser reaproveitados na construção civil como agregado, dependendo de sua qualidade e dimensões para determinar o uso adequado (Costa, 2017). Segundo ABRECON (2015), esses resíduos reciclados têm desempenho técnico semelhante aos materiais convencionais e são usados em diversas aplicações, como pavimentação, fabricação de concreto e argamassa, reforço de aterros e preenchimento de valas. A maior parte desses resíduos são provida de reformas, ampliações e demolições, representando 59% da origem dos resíduos nos municípios (figura 1).

Figura 1 - Índice de geração de Resíduos de Construção e Demolição (RCD).



Fonte: ABRECON, 2015.

Conforme resolução CONAMA Nº 307/2002, O Resíduo de Construção e Demolição (RCD) ou Resíduo da Construção Civil (RCC) é definido como todo material descartado durante processos de construção, reforma, escavação ou demolição, esses resíduos são classificados em quatro classes sendo elas:

- **CLASSE A:** Resíduos recicláveis como agregados (material para pavimentação, concretos, argamassas). Exemplo: Tijolos, blocos cerâmicos, concreto, solos, rochas, azulejos, metais, resinas, colas, tintas, madeiras, compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica. Materiais cerâmicos, incluindo telhas, manilhas, tijolos e azulejos.
- **CLASSE B:** Resíduos recicláveis para outras destinações (vidro, gesso, madeira, plástico, papelão).
- **CLASSE C:** Resíduos recicláveis, mas sem tecnologias economicamente viáveis para reciclagem.
- **CLASSE D:** Resíduos perigosos (compostos ou em contato com materiais/substâncias nocivos à saúde). Exemplo: Solvente e tintas; telhas e materiais de amianto; entulho de reformas em clínicas e instalações industriais que possam estar contaminados.

METODOLOGIA

Este trabalho adota uma metodologia exploratória e descritiva, trazendo entrevistas com pessoas atuantes no meio, com foco na análise das práticas de gestão e reciclagem de resíduos sólidos da construção civil no município de JAU - SP, a pesquisa baseia-se em revisão bibliográfica e normas técnicas, estudos anteriores sobre o tema e dados disponíveis sobre ele.

A pesquisa bibliográfica abrange artigos científicos, livros e legislação pertinente à gestão de resíduos e à reciclagem de RCCs, fornecendo o embasamento teórico para a análise. A análise dos dados coletados, tanto da revisão bibliográfica quanto das entrevistas e da análise dos RCCs, permitirá a construção de conclusões e propostas para melhorias no processo de reciclagem de RCCs.

RESULTADO E DISCUSSÃO

O aumento da urbanização e do consumo nas cidades modernas intensificou o desafio de gerenciar resíduos sólidos de maneira sustentável. Entre os principais problemas estão a falta de infraestrutura adequada, o impacto ambiental e os custos elevados.

Segundo Ygor Dias Amaral, funcionário entrevistado da prefeitura de Jaú, responsável pela secretaria de meio ambiente, está sendo realizado o licenciamento da área de RCCs do município, cuja qual já está em operação e encontra-se localizada no 8º distrito industrial da cidade (figura 2).

Figura 2 - Área de RCCs do município de Jaú.



Fonte: próprio autor.

Conforme Amaral, Y.D. A administração de resíduos no município foca na gestão eficiente dos resíduos domésticos e da construção civil. Para isso, equipamentos especializados são utilizados, entre eles, destaca-se o triturador de galhos e RCCs, que processa 50 toneladas de resíduos da construção civil (RCCs) diariamente.

Esses RCCs segundo a página JAU (2025), são levados para uma usina móvel de reciclagem de resíduos da construção civil (RCC), adquirida por meio do Consórcio Intermunicipal dos Vales dos Rios Tietê e Paraná (CITP). Essa usina possui capacidade para trituração de até 100 toneladas de entulho por hora, transformando

os resíduos em materiais reutilizáveis, como sub-base para asfalto e componentes não estruturais na construção civil.

Em relação aos galhos e resíduos vegetais, a página JAU (2025), informa a realização de coletas mensais por meio do programa “Jahu Mais Limpa”. O serviço abrange restos de podas de árvores e arbustos, além de materiais inservíveis como móveis velhos e colchões.

Figura 3 - Descarte irregular de detritos na cidade de Jaú.



Fonte: próprio autor.

A imagem acima representa o descarte inadequado de RCCs na cidade de Jaú, localizado no bairro Residencial Frei Galvão. Com isso podemos perceber a necessidade financeira e sociais do uso das usinas de reciclagem, no caso dos RCCs. Através da página JAU (2025) podemos observar o volume irregular no descarte destes materiais orgânicos e inorgânicos, o que poderia ser reutilizado na construção de estradas rurais e compostagem, retornando como um benefício social para a cidade.

Se tratando da logística em transporte, transbordo e armazenagem desses resíduos, como citado por Amaral, Y.D, a secretaria está realizando o licenciamento da área de RCCs do município. Contudo a cidade de Jaú enfrenta dificuldades na regulamentação de áreas adequadas para o descarte de resíduos sólidos, a coleta desses resíduos foi interrompida por um determinado momento, devido ao aumento da população evidenciando a dimensão do desafio. A figura 4 demonstra imagens de entulho de construção acumulados em via pública.

Figura 4 - Imagem de entulho de construção acumulados em via pública.

Fonte: página de notícias do município de Jaú – SP.

As companhias que oferecem serviços de remoção desses resíduos foram algumas das mais impactadas durante esse período. Para tornar o processo de triagem viável, essas empresas precisam implantar práticas de orientação voltadas aos seus clientes.

Segundo a página da empresa CLV Caçambas (2025), podemos analisar que nas cidades de Sorocaba e Votorantim, o recolhimento de rejeitos da construção civil atende à legislação da CETESB e das prefeituras municipais. Garantindo conformidade com as normas ambientais, orientando os seus clientes sobre os tipos de resíduos proibidos, entregando um termo de responsabilidade a cada um. A empresa adota políticas de descarte adequadas de resíduos, garantindo que todos sejam direcionados corretamente, com os recicláveis destinados a uma cooperativa cadastrada junto ao aterro de inertes, em conformidade com as normas vigentes.

Por outro lado, as companhias localizadas em Jaú estão lidando com imensos obstáculos. O entrevistado Amaral, Y.D, relata que, embora exista um requisito sobre o tamanho das caçambas o município não oferece incentivos adequados, o que pode desestimular a prática da reciclagem, tornando o serviço pouco atrativo para as empresas. Assim, a utilização de aterros provisórios gera dúvidas sobre a gestão dos resíduos, enquanto a responsabilidade atribuída às empresas que prestam o serviço carece de uma orientação clara por parte da prefeitura, a proposta de uma parceria público-privada poderia fortalecer a conscientização e aperfeiçoar o processo de destinação dos resíduos.

Além disso, a escassez de insumos e operadores qualificados prejudica o funcionamento eficiente das usinas, incentivos para que a população utilize materiais reciclados poderiam reduzir os custos com transporte e mitigar as emissões de gases, também fomentar uma cultura mais sustentável. No entanto, é muito importante que essas empresas adotem práticas mais sustentáveis e atuem junto com as ações do setor público para melhorar a gestão dos resíduos da construção civil em Jaú.

Análise de Engenharia

O engenheiro Eurípedes Roosevelt Stoppa (1994), renomado por sua ampla experiência e alto nível de conhecimento na área da construção civil, apresentou

suas percepções sobre práticas e desafios relacionados à reciclagem de materiais no setor.

Com uma trajetória marcada pela competência, Stoppa (1994), destacou pontos públicos cruciais relacionados a políticas, infraestrutura e conscientização ambiental.

Segundo Stoppa (1994), as práticas de reciclagem de materiais na construção civil enfrentam sérios obstáculos devido à ausência de políticas públicas adequadas. Ele faz questão de viabilizar o reaproveitamento de materiais de Classe A (como concreto, argamassa, tijolos e pisos), seria necessário o estabelecimento de usinas específicas, similares às que são produzidas brita e pó de pedra.

O autor enxerga o uso de materiais reciclados como uma contribuição positiva para o meio ambiente, descrevendo-o como “uma forma de ajudar um pouquinho o planeta”. No entanto, ele ressaltou que a qualidade desses materiais ainda é inferior em comparação aos novos, o que representa um desafio. Além disso, ele reforçou a falta de políticas públicas como um dos maiores entraves para a implementação eficaz da reciclagem no setor.

Ao ser questionado sobre a formação na área. Stoppa (1994), foi enfático ao afirmar que não há treinamentos disponíveis para os profissionais da construção civil. Demonstrando ceticismo, Stoppa citou o ditado popular “uma andorinha não faz verão”, destacando o impacto limitado das ações individuais diante da inação coletiva. Na sua visão, a reciclagem de RCCS depende não apenas de iniciativas individuais, mas de uma transformação sistêmica que envolve governos, empresas e a sociedade. Sem isso, os impactos ambientais continuarão a crescer, comprometendo o futuro sustentável do setor e do planeta.

Ainda pelo mesmo autor a visão aponta para uma clara negligência tanto pública quanto privada sem deixar de lado a sociedade, em relação à reciclagem de resíduos na construção civil. O cenário descrito por ele revela uma cadeia desestruturada, onde faltam políticas, infraestrutura, educação e fiscalização.

A visão do engenheiro Stoppa (1994), é uma chamada à ação para governos e empresas, enfatizando a importância de políticas públicas e investimentos em tecnologia para tornar a reciclagem uma prática viável e eficiente. O engenheiro apresentou uma visão crítica e fundamentada sobre os desafios da reciclagem de resíduos no setor, ressaltando tanto sua opinião quanto à necessidade de medidas estruturais e educativas.

Por sua vez a cidade de Jaú, através da secretaria de meio ambiente (SEMEIA), elaborou um planejamento estratégico, fundamentado no desenvolvimento sustentável (ODS), a administração de resíduos concentra-se em aperfeiçoar o manejo dos resíduos gerados nas residências e na construção civil, a consolidação de uma usina de reciclagem traz diversos benefícios econômicos para o município.

A implementação de usinas de reciclagem de RCCS, representa uma solução integrada para problemas ambientais, econômicos e sociais. Além de proteger o meio ambiente, essas usinas geram economia para os municípios, criam empregos e promovem o uso mais eficiente dos recursos naturais, pavimentando o caminho para um futuro mais sustentável e próspero.

A reciclagem de resíduos da construção civil apresenta benefícios claros: é sustentável e reduz custos operacionais, além de minimizar o impacto ambiental, ao reaproveitar materiais como areia, pedras e blocos, promove economia significativa para municípios e empresas ao substituir a compra de insumos novos. Esse modelo ainda reduz despesas com transporte e descarte, contribuindo para práticas mais eficientes e sustentáveis, conforme exemplificado no caso do município de Jaú.

Uma análise dos dados coletados sobre a gestão de resíduos na construção civil em Jaú revelou que a cidade enfrenta desafios importantes quanto à implementação de práticas sustentáveis. Entre os principais problemas identificados, destacam-se a falta de incentivo governamental, a ausência de infraestrutura adequada para o manejo e reciclagem dos resíduos, e a carência de conscientização sobre a importância da triagem e reciclagem.

No entanto, também foram identificadas oportunidades, como a crescente procura por práticas sustentáveis no setor e o interesse das empresas locais em adotar soluções que contribuam para a preservação ambiental, com a adoção de políticas públicas mais rigorosas e a conscientização dos profissionais do setor, a cidade de Jaú pode avançar significativamente na gestão de resíduos, as propostas incluem a criação de centros de triagem e reciclagem de resíduos de construção, parcerias com empresas de reciclagem e a promoção de campanhas de educação ambiental voltadas para o setor da construção civil.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nesse estudo foi possível perceber que a cidade de Jaú possui um potencial significativo para aprimorar a gestão de seus resíduos, especialmente aqueles provenientes da construção civil, também a implementação de políticas públicas mais eficazes, aliada à conscientização dos profissionais do setor, representa um passo crucial para alcançar resultados positivos e sustentáveis atendendo a demanda de ações concretas e inovadoras.

Com isso, é importante ressaltar a criação de centros na área de reciclagem para resíduos de construção civil. Esses centros permitiriam a separação eficiente dos materiais, viabilizando a reciclagem e o reaproveitamento de itens como concreto, tijolos, metais e madeira, reduzindo significativamente o volume de resíduos destinados aos aterros sanitários. Parcerias estratégicas com empresas de reciclagem são igualmente essenciais.

Também a articulação entre o poder público e o setor privado pode garantir a logística adequada para o transporte, processamento e comercialização dos materiais reciclados, gerando empregos e receita para a cidade, por fim, campanhas de educação ambiental direcionadas aos profissionais da construção civil são imprescindíveis para o sucesso da iniciativa. A conscientização sobre as práticas sustentáveis e a importância da segregação dos resíduos, nos setores da reciclagem são fundamentais para a mudança de comportamento e a internalização de práticas responsáveis.

Em resumo, a combinação de políticas públicas rigorosas, parcerias estratégicas, privadas e educação ambiental representa um caminho promissor para Jaú avançar na gestão de resíduos na construção civil, contribuindo para um ambiente mais limpo e sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABRAINCO. **Construção Civil: gerando empregos e impulsionando a retomada econômica durante a pandemia**. 2020. Disponível em: <https://www.abrainco.org.br>. Acesso em: 25 de maio de 2025.
- ABRECON. **Estudo sobre a reciclagem de resíduos da construção civil no Brasil**. 2015. Disponível em: <https://abrecon.org.br>. Acesso em: 05 de junho de 2025.
- ÂNGULO, S.C.; OLIVEIRA, S.C.; MACHADO L; ABRECON. **A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil**. São Paulo, SP. Epusp, 2022.
- ANGLO, S. C. **Variabilidade de Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados**. Minas Gerais, MG. Politécnica, 2010.
- ABNT. Disponível em: <https://abnt.org.br>. Acesso em: 05 de junho de 2025.
- CBIC. **Câmara Brasileira da Indústria da Construção**. Disponível em: <https://cbic.org.br>. Acesso em: 15 de maio de 2025.
- COSTA. **Análise da gestão de resíduos da construção civil em municípios do Brasil**. Rio de Janeiro, RJ. Letras, 2009.
- CUNHA, E. A.; BARBOSA, J. R. **Gestão e reciclagem de resíduos sólidos na construção civil**. São Paulo, SP. Blucher, 2016.
- CONAMA. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br>. Acesso em: 05 de junho de 2025.
- CBCS. Disponível em: <https://www.cbcs.org.br>. Acesso em: 05 de junho de 2025.
- CLV, CAÇAMBAS. Disponível em: <https://www.clvcacamba.com.br>. Acesso em: 05 de junho de 2025.
- GOV, BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <https://www.gov.br>. Acesso em: 05 de junho de 2025.
- JAU. Disponível em: <https://www.jau.sp.gov.br>. Acesso em: 04 de junho 2025.
- LEVY, S. M. **Reciclagem do Entulho de Construção Civil para Utilização como Agregado de Argamassas e Concretos**. São Paulo, SP. Politécnica, 1997.
- MIRANDA, L. F. R. **A Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição no Brasil**. Porto Alegre, POA. Pini, 2009.

PINTO T. P. **Utilização de Resíduos de Construção: estudo do uso em argamassas.** São Paulo, SP. Clovis, 1986

STOPPA.R, E. **Qualidade na Construção de Edifícios: uma abordagem para a melhoria dos processos e produtos.** 1. ed. São Paulo: Pini, 1994.

ZORDAN, S. E. **A Utilização do Entulho como Agregado, na Confeção do Concreto.** Campinas, SP. LCT, 1997.



Produção e Descarte Ambiental de Plásticos: Conexões entre Clima, Biodiversidade e Saúde Global

Production and Environmental Disposal of Plastics: Connections Between Climate, Biodiversity and Global Health

Emmanuel Romero Martins da Silva

Aluno de mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP. 52050-900 Recife, PE. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0437-4688>

Jair Henrique dos Passos Velozo

Aluno de mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP. 52050-900 Recife, PE. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4253-1045>

Eliana Cristina Barreto Monteiro

Professora Adjunta da Escola de Tecnologia e Comunicação, Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP. Universidade de Pernambuco- UPE. 52050-900 Recife, PE ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0842-779X>

Galba Maria de Campos-Takaki

Professora Titular da Escola de Tecnologias e Comunicação, Coordenadora do Centro Multiusuário Biomoléculas e Superfície de Materiais- CEMACBIOS, MCTI/ Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP. 52050-900 Recife, PE. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0519-0849>

Resumo: Os plásticos sintéticos desempenham um papel central no estilo de vida contemporâneo devido à sua durabilidade, especificidades e baixo custo. No entanto, essas mesmas características os tornam persistentes no meio ambiente, intensificando os impactos ecotoxicológicos e climáticos. O acúmulo de resíduos plásticos, em especial, microplásticos e nanoplásticos, contaminam cadeias alimentares, afetando a saúde humana e a biodiversidade. Estudos revelam a presença de partículas em tecidos biológicos e fluidos corporais humanos, associando-se a doenças crônicas, distúrbios metabólicos e danos no fígado, rins e coração. Este trabalho analisa os impactos ambientais e sanitários decorrentes da poluição plástica, com ênfase na intervenção nos ciclos biogeoquímicos, no aquecimento global e na perda de biodiversidade. Além disso, são apresentadas estratégias para mitigação dos impactos, além do desenvolvimento de biopolímeros biodegradáveis, bem como a promoção da economia circular incluindo as consequências do descarte de plásticos, em especial microplásticos, em ambientes marinhos e na saúde humana, considerando a legislação vigente

Palavras-chave: biopolímeros; biodegradação; microplásticos; química ambiental; reciclagem.

Abstract: Synthetic plastics play a central role in contemporary lifestyle due to their durability, specificities, and low cost. However, these same characteristics make them persistent in the environment, intensifying ecotoxicological and climate impacts. The accumulation of plastic waste, especially microplastics and nanoplastics, contaminates the food chain, affecting human health and biodiversity. Studies reveal the presence of particles in biological tissues and human body fluids, associating it with chronic diseases, metabolic disorders, and damage to the liver, kidneys, and heart. This work analyzes the environmental and health impacts resulting from plastic pollution, with emphasis on intervention in biogeochemical cycles, global

warming and biodiversity loss. In addition, strategies for mitigating impacts are presented, in addition to the development of biodegradable biopolymers, as well as the promotion of the circular economy, the consequences of the disposal of plastics, especially microplastics, in marine environments and on human health, considering the current legislation

Keywords: biopolymers; biodegradation; microplastics; environmental chemistry; recycling.

INTRODUÇÃO

A indústria mundial de plásticos destinou uma parcela expressiva com produção estimada em 400 milhões de toneladas para fabricação de itens descartáveis. Desse total, aproximadamente 160 milhões de toneladas foram utilizadas exclusivamente em produtos de uso único, especialmente embalagens. Isso representa cerca de 40% da produção global, evidenciando o elevado consumo de materiais com curta vida útil e seus impactos no aumento de resíduos sólidos (Carvalho *et al.*, 2024).

Estima-se que entre 74.000 e 113.000 microplásticos ingressam anualmente no corpo humano por ingestão alimentar e inalação. Tais partículas podem carregar compostos tóxicos associados a câncer, mutações genéticas, desregulação hormonal e danos a órgãos como fígado, rins e coração (Carvalho, 2025).

De acordo com o artigo 47 da Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, é proibido o descarte de resíduos em praias, mares ou corpos hídricos, bem como a queima a céu aberto e outras formas vedadas pelo poder público. Contudo, na prática, grande parte dos resíduos plásticos ainda não é reciclada ou reutilizada, tendo como destino o meio ambiente. Sob a ação de fatores ambientais como temperatura e correntes marítimas, esses materiais se fragmentam, originando microplásticos secundários (Carvalho *et al.*, 2024).

A dimensão reduzida dos microplásticos facilita sua ingestão por organismos marinhos. Segundo a norma ISO/TR 21960:2020, microplásticos são partículas sólidas, insolúveis em água, com tamanho entre 1 µm (0,001 mm) e 1000 µm (1 mm) (Carvalho *et al.*, 2024). Essa característica favorece sua interação com a fauna e flora marinha, promovendo bioacumulação.

Por isso há uma maior interação entre organismos marinhos e o plástico devido ao tamanho, facilitando assim a absorção e ingestão desses materiais pela fauna e flora marinha, acarretando bioacumulação.

Dada a variedade de fontes e rotas pelas quais microplásticos chegam aos oceanos, sua mitigação exige uma abordagem multifacetada, baseada em inovação e detecção precoce (Pinto *et al.*, 2022).

Os microplásticos podem carregar substâncias químicas nocivas, capazes de causar câncer, mutações genéticas, desequilíbrios hormonais e danos a órgãos internos como fígado, rins, coração e sistemas nervoso e reprodutivo (Carvalho, 2025).

Este trabalho apresenta os impactos ambientais e sanitários associados à contaminação com plásticos sintéticos com ênfase nos ciclos biogeoquímicos e

saúde planetária, além de estratégias tecnológicas e políticas sustentáveis para sua mitigação.

Esta pesquisa propõe, por meio de uma revisão da literatura, identificar métodos e estratégias para reduzir os impactos ambientais associados ao uso de plásticos. Diversos tipos de plásticos são amplamente empregados no cotidiano da sociedade, atendendo a diferentes finalidades e setores produtivos.

PLÁSTICOS E A INDÚSTRIA FÓSSIL

A história do plástico começa no início do século XX, quando foram desenvolvidos os primeiros materiais plásticos derivados do petróleo. O primeiro plástico sintético foi a baquelite, inventada por Bonnichsen. No Millie's Camp, durante os anos 1970, os plásticos aparecem inicialmente como um anel plástico de embalagem de latas de cerveja ou refrigerante. Outros exemplos incluem bijuterias plásticas e bobs de plástico, mas, em sua maioria, os plásticos se apresentam como partes de brinquedos dispersos por todo o acampamento (Costa, 2023).

A produção de plásticos inicia-se a partir da exploração de recursos não renováveis, como o petróleo e o gás natural, contribuindo significativamente para a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e para a degradação ambiental. O processo fabril, especialmente na fabricação de embalagens plásticas, demanda grandes quantidades de energia e água, resultando na liberação de poluentes nocivos aos compartimentos atmosférico e hídrico (Prado Cabezas, 2024).

Segundo Diogo Costa (2025), o plástico é um tipo de polímero que pode ser moldado em diversas formas e consistências por meio de calor, pressão ou outros agentes físicos e químicos. No ambiente natural, materiais como resinas vegetais e marfim são considerados formas de plásticos naturais, em contraste com os polímeros sintéticos amplamente utilizados pela indústria, a Tabela 1 apresenta os tipos de plástico para cada alimento.

Tabela 1 - Tipos de embalagens.

| Produto lácteo | Material da embalagem |
|-----------------------|---|
| Leite líquido | Sacos de polietileno (LDPE ou LLDPE), caixas de papelão (Tetra Pak ou Tetra Brik), Garrafas de Vidro, Garrafas PET. |
| Leite em pó | Laminados flexíveis (folha PET/BOPP/papel alumínio), lata de estanho |
| Sorvete | Recipientes de polipropileno, laminados PET, caixas de papelão |
| Manteiga | Papel manteiga, papel revestido com cera, celofane, papel alumínio, latas metálicas |
| Queijo | Folha de alumínio/laminados de papel, celofane/combinções de papel, latas metálicas |
| Doces tradicionais | Folha de alumínio, celofane, filme HDPE, filme LDPE, PE, laminado, latas metálicas, recipientes de vidro |

Fonte: adaptado de Martins e Bortoleto (2024).

Ao se considerar o crescimento das indústrias, especialmente entre os dez principais países industrializados com alto nível de inovação tecnológica, as fontes de energia utilizadas nos processos industriais tornam-se questões políticas relevantes no contexto da emissão de poluentes. O autor identificou as mudanças climáticas e o aquecimento global como os “dois males” que ameaçaram a existência e a sobrevivência humanas nos últimos tempos. O uso crescente de recursos energéticos derivados de combustíveis fósseis, como insumos essenciais para a ampliação da produção de bens e serviços destinados aos mercados doméstico e internacional, pode ser associado diretamente às emissões de carbono (Usman *et al.*, 2022).

A Contribuição do Plástico para as Mudanças Climáticas

Atividades como a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento por meio de queimadas, com o objetivo de expandir a agricultura e a agropecuária, provocam diretamente, ao longo dos anos, um aumento sistemático na concentração de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) na atmosfera (Costa, 2023).

O caráter contemporâneo das mudanças climáticas que são pós-industriais e muito recentes, não pode ser simplesmente comparado com experiências humanas remotas. Neste caso, mais do que ilustrar comportamentos culturais previamente adquiridos diante de crises climáticas similares, o que a arqueologia pode revelar são os caminhos possíveis para a retomada social em contextos que tenham sido, de alguma forma, modificados ambientalmente. Esses diversos processos de resiliência cultural e social podem, sim, constituir uma grande contribuição da arqueologia ao debate atual sobre as mudanças climáticas, embora não sejam os únicos arquétipos de sustentabilidade ambiental, considerando-se materialidades mais recentes.

Segundo Carvalho (2024), o termo “mudanças climáticas” tem sido utilizado para designar alterações recentes no clima da Terra, como mudanças na temperatura, na precipitação, nos padrões de vento e nas correntes marinhas. O aumento da temperatura global, ao longo das últimas décadas, tem alterado os padrões climáticos e comprometido o equilíbrio ambiental. Esses fenômenos representam sérios riscos à saúde humana e às mais diversas formas de vida na Terra. À medida que a concentração de gases de efeito estufa (GEE) aumenta, a temperatura média do planeta também se eleva, potencializando a ocorrência de desastres ambientais, como secas prolongadas, perda de biodiversidade, alterações nas temperaturas dos oceanos, enchentes e inundações. Tais eventos podem afetar diretamente a pesca, a agricultura e a pecuária, ou seja, ameaçam o abastecimento de alimentos e contribuem para o agravamento da fome.

Ciclo de Vida dos Plásticos (ASCV)

A Avaliação de Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV) constitui uma abordagem metodológica que possibilita a análise integrada dos impactos ambientais,

sociais e econômicos ao longo de todas as etapas do ciclo de vida de um produto ou processo. Entre essas etapas, destacam-se: extração e processamento de matérias-primas, produção, distribuição, uso, manutenção, reutilização, reciclagem e descarte final (Martins e Bortoleto, 2024).

O conceito de sustentabilidade é amplamente debatido e aplicado em diversos contextos, incluindo atividades produtivas, sistemas e produtos. Sua ampla adoção, no entanto, pode gerar ambiguidade: por um lado, é interpretado como um caminho de desenvolvimento que assegura a preservação da vida presente e futura; por outro, é criticado como um termo esvaziado de sentido, dada a sua utilização genérica e, muitas vezes, desprovida de diretrizes claras (Martins e Bortoleto, 2024).

A avaliação do Ciclo de Vida (ACV) Martins e Bortoleto (2024), conforme especificada pela norma ISO 14044, é uma técnica que visa avaliar os impactos ambientais associados ao uso de recursos em produtos, serviços ou processos, considerando todas as etapas de seu ciclo de vida. Contudo, vale ressaltar que a ACV aborda exclusivamente a dimensão ambiental, não incorporando de forma integral os aspectos sociais e econômicos da sustentabilidade.

A Análise de Custos do Ciclo de Vida (ACCV) surgiu na década de 1980 como uma abordagem complementar à ACV, com foco na identificação de externalidades econômicas e custos ao longo de todo o ciclo de vida de um produto. Essa análise considera os encargos financeiros arcados por todos os atores envolvidos no ciclo, fornecedores, fabricantes, consumidores e usuários finais.

IMPACTOS AMBIENTAIS DOS PLÁSTICOS

O impacto ambiental decorrente da poluição por plásticos vai além da contaminação de organismos e do surgimento de patologias. Ele representa um desafio para o Estado em termos de gestão ambiental, saneamento básico, tratamento de água, esgoto e resíduos sólidos. Quando os padrões estabelecidos pela NBR 7229/1999 não são observados, as cidades tornam-se mais vulneráveis à escassez hídrica e à contaminação do solo (Santos *et al.*, 2025).

Segundo Nascimento e Filho (2021), o consumismo constitui um elo central entre a sociedade, a indústria e o meio ambiente. Ele estimula a demanda por bens, impulsionando a exploração de recursos naturais muitas vezes de maneira insustentável, o que culmina em instabilidade ambiental. O impacto ambiental é, portanto, caracterizado por alterações físicas, químicas ou biológicas no meio, provocadas direta ou indiretamente pela ação humana, com potencial para comprometer a qualidade de vida e a integridade dos recursos naturais.

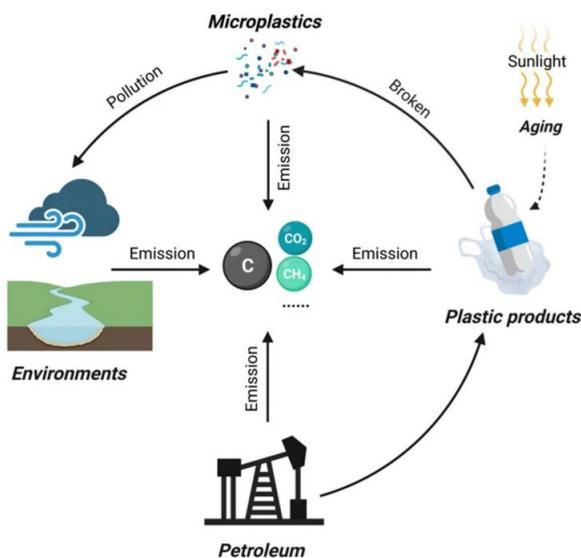
Nesse contexto, Diogo Costa (2025) analisa a relação entre educação e cultura material, destacando a importância de se problematizar os processos educacionais que perpetuam padrões de consumo e descarte de plásticos. O autor também propõe o uso da arqueologia como instrumento de conscientização e promoção de práticas sustentáveis.

CICLOS BIOGEOQUÍMICOS

Os micros e nanoplásticos oriundos da fragmentação de resíduos plásticos exercem influência significativa sobre o ciclo do carbono em ecossistemas terrestres e aquáticos (Yao *et al.*, 2025).

Além do ciclo do carbono, esses materiais interferem em outros ciclos, essenciais para a manutenção dos produtores, dificultando a sua absorção e transformação necessários à fotossíntese e metabolismo energético. A interferência do plástico no ciclo do carbono, figura 1.

Figura 1 - Ciclo do Carbono.

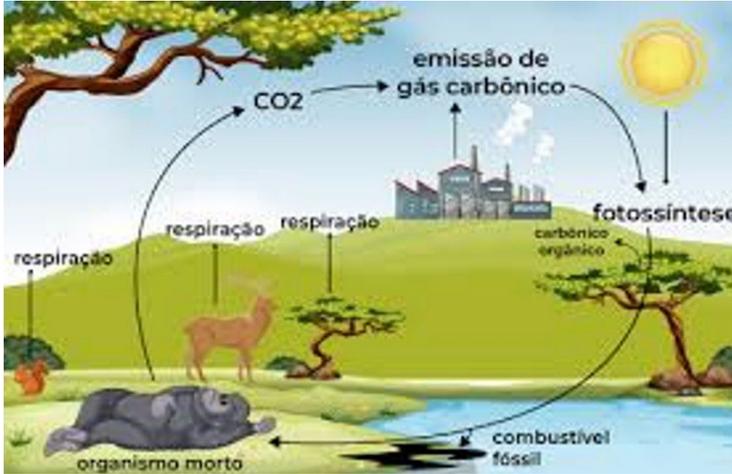


Fonte: Yao *et al.* 2025.

A matéria orgânica é um componente essencial para a fertilidade dos solos agrícolas; portanto, qualquer fator que cause alterações em sua composição pode impactar a interação dos microrganismos presentes no solo (Bardal *et al.*, 2025).

Ainda de acordo com Bardal *et al.* (2025), além da quantidade, a qualidade da matéria orgânica é igualmente relevante, pois o carbono serve como fonte de energia para os microrganismos, observe o ciclo na figura 2.

Figura 2 - Ciclo do carbono.



Fonte: Beduka, 2019.

O ciclo do nitrogênio é um dos principais componentes dos ciclos biogeoquímicos, englobando reações como a assimilação de nitrogênio pelas plantas, além de processos microbiológicos como fixação, nitrificação e desnitrificação. O ciclo é concluído quando a interconversão de nitrogênio orgânico (NO), nitrato (NO₃ - N), nitrogênio nitroso (NO₂ - N), amônio (NH₄ + N), amônia (NH₃ - N), óxido nitroso (N₂O), óxido nítrico (NO) e nitrogênio gasoso (N₂) é concluída figura 3, (Zhang *et al.*, 2025).

Figura 3 - Ciclo do nitrogênio.



Fonte: Ilsa Brasil, 2025.

O bioplástico biodegradável, é uma alternativa suavizadora desse quadro, seja sua degradação no solo ou na água, possibilitando uma melhor recuperação do meio ambiente, diminuindo a interferência com os ciclos biogeoquímicos.

IMPACTO DOS PLÁSTICOS SOBRE A SAÚDE HUMANA E ANIMAL

A progressiva presença de micro e nanoplásticos (MNPLs) no meio ambiente representa uma séria ameaça à saúde humana. Microplásticos são frequentemente descritos como partículas plásticas com até 5 mm de dimensão, sem um limite inferior de tamanho claramente definido. Já o nanoplástico é um termo proposto para partículas de plástico que se encontram na faixa submicrométrica ($<1 \mu\text{m}$). A ingestão de alimentos e líquidos contaminados, além da inalação dessas partículas pelo sistema respiratório, é considerada a principal via de exposição humana aos MNPLs.

De acordo com Barcelos (2025), estudos têm demonstrado que a presença de microplásticos (MPs) em organismos humanos pode desencadear alterações celulares e teciduais, como estresse oxidativo, processos inflamatórios e apoptose. Essas alterações estão associadas ao desenvolvimento de doenças crônicas e disfunções metabólicas.

Ainda segundo Barcelos (2025), microplásticos já foram detectados em diversos tecidos e fluidos do corpo humano. Durante a gestação, sua presença está relacionada a alterações na placenta e à possibilidade de exposição fetal. A detecção de MPs no leite materno também suscita preocupação quanto aos impactos na saúde neonatal.

A exposição dérmica a microplásticos pode ocorrer por meio do uso de produtos cosméticos que contêm microesferas classificadas como MPs primários presentes em itens como pastas de dente, xampus e produtos de limpeza facial (Barcelos, 2025).

Por apresentarem características de interesse para a indústria, os MNPLs vêm sendo deliberadamente introduzidos em produtos de limpeza, cosméticos e aplicações médicas. Também estão presentes em garrafas, roupas, pneus e embalagens. Essas partículas podem ser transportadas para rios, mares e para o ar, sendo eventualmente depositadas por meio da chuva. Também podem ser ingeridas por animais marinhos, como peixes, crustáceos e moluscos, e já foram identificadas até mesmo em sal de cozinha.

A absorção dessas partículas pode induzir estresse oxidativo, resultando em potencial dano celular e aumento da vulnerabilidade ao desenvolvimento de distúrbios neuronais, hepáticos e digestivos. O trato gastrointestinal humano é considerado o principal local de exposição aos MPs, o que pode gerar disfunção da barreira intestinal e inflamação (Cruz e Almeida, 2023).

A presença de microplásticos no organismo humano compromete seriamente a saúde, especialmente devido à bioacumulação e aos seus efeitos bioquímicos. Esses impactos não se restringem ao ser humano, afetando também a fauna e a flora. Por isso, torna-se essencial adotar estratégias que promovam a saúde ambiental de forma integrada, considerando a interdependência entre todos os organismos vivos.

PERDA DA BIODIVERSIDADE

A proteção das tartarugas marinhas (Quelônios) é um desafio crescente devido aos consideráveis impactos ambientais que ameaçam a sua sobrevivência (Cabral, 2025). O litoral do estado do Pará, localizado na região norte do Brasil, com sua rica biodiversidade e importância ecológica, é um local crucial para a nidificação de diversas espécies de tartarugas marinhas (Cabral, 2025).

Contudo, as mudanças climáticas, poluição e atividades humanas estão afetando o habitat e modos de vida dessa espécie. A poluição dos oceanos, principalmente causada por plásticos, é uma grande ameaça para as tartarugas marinhas. Elas costumam confundir esses resíduos com alimento, o que leva à ingestão acidental e pode causar sérios problemas de saúde, como obstruções no sistema digestivo e até a morte (Cabral, 2025).

O primeiro relato envolvendo a presença dessas partículas plásticas no ambiente foi publicado em 1972, quando esse material foi encontrado retido em redes de plâncton, em águas costeiras na região da Nova Inglaterra, nos Estados Unidos (Montagner *et al.*, 2021).

Estudos apontam que, dentre os plásticos mais encontrados no ambiente, incluem PP, PE, PS, PVC, PET, PA e PU, devido à sua ampla utilização e alta persistência. São os polímeros termoplásticos polipropileno (PP), polietileno (PE) (podendo ser PEBD - polietileno de baixa densidade ou PEAD - polietileno de alta densidade), poliestireno (PS), policloreto de vinila (PVC), politereftalato de etileno (PET), poliamida (PA) e o polímero termorrígido poliuretano (PU) (Montagner *et al.*, 2021).

A degradação de um polímero está relacionada ao rompimento de ligações químicas covalentes, seja na cadeia principal ou em cadeia lateral. A iniciação do processo pode ser causada por fotodegradação e/ou degradação física, química e biológica (Montagner *et al.*, 2021).

Polímeros ramificados se degradam mais facilmente que os lineares, pois suas ligações C-H em carbonos terciários são mais fracas e exigem menos energia para se romper. Os processos de degradação resultam em perda da massa molar do polímero, aumento da molhabilidade e da cristalização, bem como a formação de fissuras, gerando os fragmentos de MP. O desgaste dos polímeros facilita a liberação de aditivos químicos como estabilizantes, corantes, plastificantes e retardantes de chama usados em sua composição (Montagner *et al.*, 2021).

A ação antrópica vem aumentando gradativamente a poluição por plásticos e MP ao redor do mundo, o uso de outros contaminantes associados aos polímeros agravam o quadro. Contaminantes de origem antrópica, como bifenilas policloradas (PCB, do inglês Polychlorinated Biphenyls), pesticidas, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e dioxinas foram identificados sorvidos em MP ao redor do mundo (Montagner *et al.*, 2021).

O derrame de petróleo no nordeste brasileiro em 2019, afetou diversas espécies, aves, peixes e entre elas, as tartarugas, afetando dessa forma sua saúde e capacidade reprodutiva (Cabral, 2025).

O petróleo no ambiente marinho causa diversos danos à fauna e flora, como a diminuição da quantidade de oxigênio na água, prejudicando a reprodução de algumas espécies e afetando a qualidade do alimento disponível para os animais marinhos (Oliveira, 2023).

O efeito químico do óleo causa a destruição celular e leva à morte de espécies. Além disso, aves e pequenos animais que se alimentam nas encostas podem morrer sufocados ou presos ao entrarem em contato com o óleo (Moreira e Marques, 2019).

MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Além do seu impacto na diversidade microbiana, os microplásticos alteram significativamente as propriedades do solo, como porosidade, retenção de umidade e aeração, influenciando diretamente a dinâmica das emissões de CO₂, CH₄ e N₂O. Os microplásticos podem impactar ainda mais as propriedades do solo dependendo do seu tamanho e tipo (Navarro, 2024).

O tamanho e o tipo de microplástico são fatores cruciais na determinação de seu impacto ambiental. Partículas menores, como microplásticos nanométricos, têm uma área de superfície maior em relação ao seu volume, permitindo que interajam mais extensivamente com partículas do solo e micróbios. Essa interação pode alterar significativamente as propriedades do solo, como porosidade, retenção de umidade e aeração, que por sua vez afetam a atividade microbiana e a produção de gases de efeito estufa (Navarro, 2024).

Uma expedição ao local mais profundo dos oceanos, a Fossa das Marianas, revelou a presença de lixo plástico na coluna d'água. Foram encontrados MP em organismos dessa e de outras cinco fossas profundas do oceano (Montagner *et al.*, 2021).

Outros estudos recentes revelaram a presença de MP na neve da montanha de maior altitude do planeta, o Monte Everest, bem como no ar de cidades populosas na China (Montagner *et al.*, 2021). Isso mostra que o plástico e seus impactos já estão distribuídos a nível mundial, em toda parte do planeta, até em locais mais remotos e de difícil acesso.

ALTERNATIVAS BIOTECNOLÓGICAS PARA A REDUÇÃO DO USO DE PLÁSTICOS SINTÉTICOS

De acordo com Montagner *et al.* (2021), os microplásticos estão presentes em diversos produtos, como cosméticos (glitter), itens de higiene pessoal (esfoliantes, sabonetes, cremes dentais) e na forma de pellets, que correspondem à matéria-prima utilizada na fabricação de plásticos (Carvalho, 2024).

A presença de microplásticos (MPs) em ambientes aquáticos afeta diretamente organismos marinhos, com registros de contaminação em aproximadamente 267

espécies. Organismos filtradores, como mexilhões, ingerem partículas de 3–10 μm , que se acumulam em seus tecidos por semanas ou meses. Além disso, estudos detectaram polietileno (PE) e polipropileno (PP) em fezes de lobos-marinhos e em tecidos de lagartos, evidenciando a transferência trófica desses contaminantes. A retenção de MPs no trato digestivo de animais favorece a bioacumulação, comprometendo a saúde de espécies em diferentes níveis da cadeia alimentar e o equilíbrio dos ecossistemas (Vargas *et al.*, 2022).

ECONOMIA CIRCULAR E POLÍTICAS PÚBLICAS

Conforme Farias (2025), a economia circular configura-se como um sistema econômico fundamentado em modelos de negócios que substituem a lógica do fim de vida útil pela regeneração de materiais e pela redução do desperdício. Esse modelo busca a utilização eficiente dos recursos, a retenção de valor a longo prazo e a dissociação entre crescimento econômico e degradação ambiental.

A economia circular propõe uma mudança estrutural nos sistemas de produção e consumo atualmente baseados em modelos lineares, que envolvem a extração de recursos naturais, uso e descarte. Em contraste, a economia circular visa fechar os ciclos produtivos, promovendo a reutilização, reciclagem e a regeneração de materiais (Farias, 2025). Essa lógica está representada esquematicamente na figura 4.

Figura 4 - Economia circular.



Fonte: Ambipar environment & grupo muda, 2023.

SOLUÇÕES

Diante da crescente complexidade da crise ambiental impulsionada pelo uso indiscriminado de plásticos, torna-se evidente que soluções pontuais não são

suficientes. É necessário adotar uma abordagem sistêmica, que articule inovação tecnológica, responsabilidade socioambiental e políticas públicas eficazes. A transição para modelos de produção e consumo mais sustentáveis depende, sobretudo, da consolidação de uma economia circular, na qual o ciclo de vida dos materiais seja estendido por meio da reutilização, reciclagem e revalorização energética, com mínima extração de novos recursos.

No campo da inovação, os biopolímeros de nova geração representam uma fronteira promissora. Desenvolvidos a partir de fontes renováveis e projetados para ter biodegradação controlada, esses materiais têm o potencial de substituir os plásticos convencionais em diversas aplicações, especialmente aquelas de uso único. Contudo, seu uso em larga escala ainda enfrenta barreiras técnicas, econômicas e regulatórias, exigindo investimentos em pesquisa e desenvolvimento, bem como critérios rigorosos de certificação ambiental.

A ampliação da infraestrutura de reciclagem, com foco não apenas na reciclagem mecânica, mas também nas tecnologias químicas e térmicas (como pirólise e solvolise), é outra frente crucial. Para que tais processos sejam viáveis e sustentáveis, é fundamental que estejam inseridos em cadeias produtivas eficientes, com logística reversa e incentivos econômicos à coleta seletiva e à triagem de materiais.

Além disso, políticas públicas robustas e integradas são indispensáveis. Medidas como a proibição progressiva de plásticos de uso único, incentivos fiscais à produção sustentável, implementação da responsabilidade estendida do produtor e campanhas de educação ambiental devem caminhar juntas. A mudança cultural em torno do consumo aliada à regulação do mercado e à pressão da sociedade civil, será determinante para remodelar o papel dos plásticos na sociedade contemporânea.

Por fim, as soluções devem considerar a justiça ambiental e social. Comunidades mais vulneráveis são frequentemente as mais afetadas pelos impactos da poluição plástica, seja pelo acúmulo de resíduos em seus territórios, seja pela exposição ocupacional nos setores informais de reciclagem. Portanto, a transição ecológica precisa ser inclusiva, assegurando equidade no acesso aos benefícios e às tecnologias sustentáveis.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente análise evidencia que a produção e o descarte inadequado de plásticos sintéticos representam uma séria ameaça à saúde ambiental e global, com impactos diretos sobre os ciclos biogeoquímicos, a biodiversidade e a saúde humana. A persistência dos micro e nanoplásticos no ambiente revela a dimensão invisível, porém crítica, da crise ambiental contemporânea, exigindo ações urgentes e integradas.

Ao longo do trabalho, foram apresentados os efeitos desses materiais sobre os ecossistemas marinhos e terrestres, com destaque para sua interferência nos ciclos do carbono e do nitrogênio, além da bioacumulação em cadeias alimentares.

A presença de microplásticos em tecidos humanos, inclusive durante a gestação, evidencia o potencial tóxico dessas partículas, tornando essencial a adoção de medidas preventivas e mitigadoras.

Nesse cenário, a transição para uma economia circular, aliada ao desenvolvimento de biopolímeros biodegradáveis, desponta como uma estratégia promissora. A implementação de políticas públicas eficazes, o fortalecimento da legislação ambiental e a conscientização da sociedade são fundamentais para a mudança do modelo atual de produção e consumo.

Por fim, o enfrentamento da poluição plástica requer uma abordagem multidisciplinar, baseada na inovação científica, na responsabilidade socioambiental e na justiça ambiental. Somente assim será possível mitigar os danos já causados e preservar a saúde do planeta para as gerações futuras.

REFERÊNCIAS

AMBIPAR environment e grupo muda. 2023. Disponível em: <https://grupomuda.com/economia-circular/>. Acesso em 30 de abril de 2025.

BARCELOS, T. N. **Presença e impacto de microplásticos em tecidos humanos: uma revisão de escopo**. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: <http://www.bdt.d.uerj.br/handle/1/2375>. Acesso em: 20 de maio de 2025.

BARDAL, M.; PALOTINO, R. C.; DE FRANCISCO, A. L. O. **Carbono Orgânico e Indicadores Microbiológicos do Solo em Diferentes Rotações de Culturas Sob Sistema Plantio Direto (Agronomia)**. Repositório Institucional, v. 3, n. 2, 2025.

BEDUKA. 2019. Disponível em: <https://beduka.com/blog/exercicios/biologia-exercicios/exercicios-sobre-ciclo-do-carbono/>. Acesso em 30 de abril de 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: seção 1, Brasília, DF, ano 147, n. 148, p. 3-7, 3 ago. 2010.

CABRAL, M. V. A.; DE SOUZA, T. N.; BORGES, S. L. **Impactos ambientais e as tartarugas marinhas do litoral norte do Brasil: guia ilustrativo e inclusivo**. Revista Eletrônica Multidisciplinar de Investigação Científica, 2025. ISSN: 2764-4987, Vol. 4 | Nº. 20 | 2025. DOI: <https://doi.org/10.56166/remici.v4n20242425>.

CARVALHO, A. S.; ROSA, C. D.; SILVA, E. A. *et al.* **Mudanças Climáticas Em Avaliação De Impactos Ambientais**. Boletim De Conjuntura (Boca) ano VI, vol. 18, n. 53, Boa Vista, 2024. ISSN: 2675-1488. DOI: doi.org/10.5281/zenodo.11375541.

CARVALHO, D. A.; SILVA, B. D.; LUCENA, É. P. *et al.* **Contaminação invisível**. Revista Tópicos, [S.l.], 2024. Disponível em: <https://revistatopicos.com.br>. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.12614821>. Acesso em: 25 maio 2025. ISSN 2965-6672.

CARVALHO, M. R. **Avaliação de Microplástico no Trato Digestório de Espécies de Peixes no Entorno do Complexo Portuário do Itaqui, São Luís – MA.** Disponível em: <https://tedebc.ufma.br/jspui/handle/tede/6116>. Acessado em: 25 mai. 2025.

COSTA, M. D. **Ecoarqueologia Das Mudanças Climáticas: Da Resiliência Pré-Histórica À Sustentabilidade Contemporânea.** Revista de arqueologia, 2023. Volume 36 No. 2 maio - Agosto 2023. DOI: <https://doi.org/10.24885/sab.v36i2.1035>.

CRUZ, E. M. T.; ALMEIDA, F. R. A. **Exposição A Nano E Microplásticos E Seus Impactos Na Saúde Humana: Uma Revisão Da Literatura.** Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação. São Paulo, v.9.n.06. jun. 2023. DOI: doi.org/10.51891/rease.v9i6.8663.

DIOGO M. COSTA. **Arqueologia Dos Plásticos: Um Estudo Contemporâneo Sobre Os Polímeros.** VESTÍGIOS, Revista Latino-Americana de Arqueologia Histórica, Volume 19, Número 1, junho 2025. ISSN 1981-5875. DOI: <https://doi.org/10.31239/pdv6bg57>.

FARIAS, F. A. **Economia Circular No Setor De Geração De Energia: Proposição De Um Framework Para Adoção De Práticas Em Geradoras Centralizadas De Energia Renovável.** Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru, 2025.

ILSA BRASIL. 2025. Disponível em: <https://ilsabrasil.com.br/ciclo-do-nitrogenio-e-suas-reacoes/>. Acesso em 30 de abril de 2025.

MARTINS, H. L. S.; BORTOLETO, A. P. **Sustentabilidade Do Ciclo De Vida Na Prevenção De Resíduo Plástico E Alimentar Na Cadeia Produtiva Do Leite.** 7º ConReSol, Curitiba, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.7.24.I-025>.

MONTAGNER, C. C.; DIAS, M. A.; PAIVA, E. M. *et al.* **Microplásticos: ocorrência ambiental e desafios analíticos.** Revista Química Nova, Vol. 44, No. 10, 1328-1352, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170791>.

MOREIRA, Í. T. A.; MARQUES, I. M. **Biorremediação de áreas costeiras impactadas por petróleo.** XVIII SEPA - Seminário Estudantil de Produção Acadêmica, UNIFACS, 2019. Disponível em: <http://www.revistas.unifacs.br/index.php/sepa>. Acesso em: 04/05/2025.

NASCIMENTO, F. A. A.; FILHO, J. L. O. P. **Os Impactos Ambientais Dos Resíduos Sólidos Urbanos.** ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer – Jandaia-GO, v.18 n.38; p. 217, 2021. DOI: https://doi.org/10.18677/EnciBio_2021D35.

NAVARRO, A. **Microplastics and Climate Change: Unveiling Ecological Impacts and Addressing Research Gaps.** PrePrints.ogr, 2024. DOI: doi.org/10.20944/preprints202408.1332.v1

OLIVEIRA, J. P. G. **Análise dos impactos à fauna e flora local causados pelo derramamento de petróleo no Nordeste do Brasil.** Revista Ambientale. Revista da Universidade Estadual de Alagoas/UNEAL. e-ISSN 2318-454X, Ano 15, Vol. 15, (nº 2), abril-julho, 2023. DOI: <https://doi.org/10.48180/ambientale.v15i2.454>.

PINTO, L. J. L. B.; SILVA, F.; CAJADO, F. J. L. *et al.* **Microplásticos no oceano: sob a perspectiva da economia azul.** Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.13, n.1, p.263-275, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC21796858.2022.001.0021>.

PRADO CABEZAS, M., **Impacto ambiental de las bolsas de plástico: un análisis del ciclo de vida en el cantón San Lorenzo.** Reincisol, 3(6), pp. 3039-3060. 2024. DOI: [https://doi.org/10.59282/reincisol.V3\(6\)3039-3060](https://doi.org/10.59282/reincisol.V3(6)3039-3060).

REZENDE, C. E.; ALMEIDA, M. C.; ARAÚJO, B. F. *et al.* **A composição física e elementar dos sedimentos marinhos entre a região costeira e o oceano profundo na bacia de campos.** Química Ambiental, Caracterização Ambiental Regional da Bacia de Campos, Atlântico Sudoeste 2017, páginas 229-276 DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-85-352-7563-6.50016-8>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9788535275636500168>. Acesso em: 04/06/2025.

RODRIGUES, T., P., C.; PASTORIZA, B. S., F. **O Conhecimento Didático do Conteúdo Químico de uma Professora/Pesquisadora no Itinerário Formativo Ciclo de Vida dos Materiais.** Tecné, Episteme y Didaxis: ted, (57), 279 - 295, 2025. DOI: <https://doi.org/10.17227/ted.num57-21993>

SANTOS, J. C.; *et al.* **Impactos Ambientais E Vulnerabilidades Na Zona Costeira Do Amapá: Análise Da Poluição Por Resíduos E Efluentes E Suas Consequências Na Saúde Pública.** REVISTA ARACÊ, São José dos Pinhais, v.7, n.3, p.12902-12922, 2025 .DOI: <https://doi.org/10.56238/arev7n3-161>.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Report of the Intergovernmental Negotiating Committee to develop an international legally binding instrument on plastic pollution, including in the marine environment, on the work of its second session.** Paris: UNEP, 2023. Disponível em: <<https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/42953/FinalINC2Report.pdf>>. Acesso em: 25/05/2025.

USMAN, M.; JAHANGER, A.; MAKHDUN, M. S. A. *et al.* **Uma investigação empírica da pegada ecológica usando energia nuclear, industrialização, combustíveis fósseis e investimento estrangeiro direto.** Revista Energies, Neutralidade de Carbono através de Inovações Verdes – o Papel das Energias Renováveis, 2022, ISSN 1996-1073. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15176442>.

VARGAS, J. G. M.; SILVA, V. B.; OLIVEIRA, L. K.; MOLINA, E. F. **Microplásticos: Uso Na Indústria Cosmética E Impactos No Ambiente Aquático.** Quim. Nova, Vol. 45, No. 6, 705-711, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170870>.

YAO, L., ZHAO, S., T., LA *et al.* **Implications of plastic pollution on global carbon cycle.** Carbon Res. 4, 21, 2025. <https://doi.org/10.1007/s44246-024-00188-z>.

ZHANG T.; LUO X.; KUMAR A. *et al.* **Effects of micro-nano plastics on the environmental biogeochemical cycle of nitrogen: A comprehensive review.** **Chemosphere.** 2024 Jun; 357:142079. doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.142079. Epub 2024 Apr 18. PMID: 38642771.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco - FACEPE, Processo IBPG-06052575784, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES Processo nº 88887.156637/2025-00 do Programa PROSUC, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) Processo nº 312241/2022 de G.M.C.T. e a Universidade Católica de Pernambuco.

As professoras orientadoras, Eliana Cristina Barreto Monteiro, Professora Adjunta da Escola de Tecnologia e Comunicação, Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP Universidade de Pernambuco- UPE, Galba Maria de Campos-Takaki Professora Titular da Escola de Tecnologias e Comunicação, Coordenadora do Centro Multiusuário Biomoléculas e Superfície de Materiais-CEMACBIOS, MCTI/ Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP.



Resíduos Plásticos nos Oceanos: Uma Ameaça Global e os Desafios da Sustentabilidade Ambiental

Plastic Waste In The Oceans: A Global Threat And The Challenges Of Environmental Sustainability

Gabriela Oliveira da Silva

Aluna de Graduação em Engenharia Química da Universidade Católica de Pernambuco. ORCID:<https://orcid.org/0009-0006-7430-5861>

Virginia da Silva Batista

Aluna de Pós-Graduação do Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais – UNICAP, Recife-PE, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8007-09>

Adriana Ferreira de Souza

Centro Multiusuário de Análise e Caracterização de Biomoléculas e Superfície de Materiais, CEMACBIOS, MCTI. Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9527-2206>

Marcos Antônio Barbosa de Lima

Departamento de Biologia, Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5987-224X>

Rosileide Fontenele da Silva Andrade

Escola de Saúde e Ciências da Vida. Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP. ORCID:<https://www.orcid.org/0000-0001-8954-7309>

Galba Maria de Campos-Takaki

Centro Multiusuário de Análise e Caracterização de Biomoléculas e Superfície de Materiais, CEMACBIOS, MCTI. Escola de Tecnologia e Comunicação. Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP. ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-0519-0849>

Resumo: A poluição marinha, agravada pelo acúmulo de plásticos nos oceanos, representa um grave desafio ambiental. A produção crescente de plásticos, especialmente o polietileno, foi testada em estimativas que variam entre 75 e 199 milhões de toneladas de resíduos marinhos. Esses resíduos impactam as qualidades da biodiversidade e da segurança alimentar, além de apresentarem riscos à saúde humana ao serem ingeridos por espécies aquáticas e, subsequentemente, entrarem na cadeia alimentar. A pesquisa em gestão e reciclagem de plásticos está sendo intensificada, focando na necessidade de desenvolver tecnologias eficazes para mitigar os impactos ambientais do acúmulo de resíduos. A biorremediação, especialmente através da utilização de microrganismos como fungos, é considerada uma alternativa promissora para a manipulação de plásticos. Fungos com alta capacidade enzimática apresentam potencial de transformação de polímeros sintéticos em substâncias menos tóxicas, abrindo novas possibilidades para a sustentabilidade. Estratégias multidisciplinares e ações públicas voltadas para educação, conscientização e políticas são cruciais na conservação dos oceanos. A implementação de uma economia circular, que enfatiza o reaproveitamento e a reciclagem de materiais, é vital para um futuro sustentável. A colaboração entre pesquisadores, indústrias e sociedade civil é fundamental para enfrentar o problema da poluição plástica e promover inovações que beneficiem o meio ambiente.

Palavras-chave: plástico; poluição marinha; biodegradação; reciclagem; sustentabilidade;

Abstract: Marine pollution, aggravated by the accumulation of plastics in the oceans, represents a serious environmental challenge. The increasing production of plastics, especially polyethylene, has been tested in estimates ranging from 75 to 199 million tons of marine waste. This waste impacts the quality of biodiversity and food security, in addition to posing risks to human health when ingested by aquatic species and subsequently entering the food chain. Research into plastics management and recycling is being intensified, focusing on the need to develop effective technologies to mitigate the environmental impacts of waste accumulation. Bioremediation, especially through the use of microorganisms such as fungi, is considered a promising alternative for the manipulation of plastics. Fungi with high enzymatic capacity have the potential to transform synthetic polymers into less toxic substances, opening up new possibilities for sustainability. Multidisciplinary strategies and public actions aimed at education, awareness and policies are crucial for ocean conservation. The implementation of a circular economy, which emphasizes the reuse and recycling of materials, is vital for a sustainable future. Collaboration between researchers, industries and civil society is essential to address the problem of plastic pollution and promote innovations that benefit the environment.

Keywords: plastic; marine pollution; biodegradation; recycling; sustainability;

INTRODUÇÃO

A produção crescente e a utilização de plásticos têm gerado preocupações ambientais significativas, impactando as qualidades dos ecossistemas marinhos e a saúde humana. O polietileno de baixa e alta densidade se destaca como um dos plásticos mais amplamente utilizados em diversas aplicações, graças às suas propriedades físicas e químicas, como resistência mecânica, leveza e flexibilidade. No entanto, sua durabilidade pode se estender por centenas de anos, devido à sua persistência no meio ambiente após o descarte, contribuindo para a poluição de oceanos, rios e outros ecossistemas aquáticos (Buhari *et al.*, 2024). A gestão e reciclagem de resíduos plásticos tornaram-se uma preocupação crescente nas últimas décadas, impulsionadas pela necessidade de mitigar os impactos ambientais causados pelo acúmulo de resíduos plásticos (Pereira, Gomes e Pacheco, 2023). A durabilidade e resistência à manipulação dos plásticos resultaram em seu acúmulo em ambientes naturais, exigindo o desenvolvimento de tecnologias eficazes para a reciclagem. Os autores destacam que, além das características químicas e físicas dos diferentes tipos de plásticos, fatores econômicos e sociais também influenciam diretamente a eficiência dos processos de reciclagem. Nesse sentido, Brioschi e Pedra (2023) ressaltam o dever das empresas em adotar práticas sustentáveis e responsáveis para mitigar a poluição marinha causada por plásticos.

O acúmulo de plásticos, como o polietileno, em ambientes marinhos representa um grande desafio ambiental global. Estima-se que entre 75 e 199 milhões de toneladas de resíduos plásticos estejam nos oceanos, com 33 bilhões de novos plásticos lançados no ambiente marinho todos os anos. As projeções indicam que, até 2050, a quantidade de plástico nos oceanos poderá superar a dos peixes. Além disso, 17% das espécies afetadas pelo plástico marinho estão na “Lista Vermelha de Espécies Ameaçadas” da União Internacional para a Conservação da Natureza.

Destaca-se que 80% da poluição marinha global provém do escoamento de resíduos da agricultura, esgoto não tratado e descarte inadequado de materiais, contribuindo para a gestão dos ecossistemas aquáticos (Greenmatch.co.uk/ocean-pollution-facts). A governança global, conforme proposta por Leitão (2021), é fundamental para mitigar os efeitos da poluição marinha por plásticos e promover a colaboração internacional na busca por soluções eficazes.

Esses materiais prejudicam a vida marinha e representam uma ameaça à segurança alimentar e à saúde humana, pois podem entrar na cadeia alimentar. Numa análise sobre a eficácia das regulamentações ambientais, Albano (2024) aponta a importância de legislações adequadas para controlar o uso de plásticos e reduzir a poluição marinha, sublinhando a necessidade de monitoramento e avaliação contínua. A busca por alternativas sustentáveis para a redução do problema dos resíduos plásticos torna-se uma prioridade. A biodegradação de plásticos, utilizando tecnologias inovadoras, têm emergido como uma estratégia promissora para reduzir o impacto ambiental dos plásticos. Neste contexto, a pesquisa em engenharia de materiais busca caminhos para o desenvolvimento de soluções eficazes e sustentáveis que abordem a poluição plástica nos oceanos, promovendo a reciclagem e o reaproveitamento de materiais. A implementação de políticas públicas e iniciativas de conscientização também são fundamentais para capitalizar as inovações tecnológicas, trazendo um futuro mais sustentável e equilibrado para os nossos oceanos e o meio ambiente como um todo.

POLUIÇÃO PLÁSTICA NOS OCEANOS

Poluição Marinha

A poluição marinha destaca-se como um dos mais prementes desafios ambientais enfrentados globalmente, resultando de uma convergência de atividades humanas que introduzem substâncias nocivas nos oceanos e impactam severamente os ecossistemas aquáticos e a saúde pública. Este fenômeno é particularmente alarmante no que se refere ao acúmulo de resíduos sólidos, com ênfase nos plásticos. Recentemente, MA *et al.* (2023) realizaram uma ampla revisão sobre os avanços no sensoriamento remoto e no monitoramento da poluição marinha, destacando que essas tecnologias emergentes têm possibilitado uma compreensão mais profunda da magnitude e das causas desse problema. Ao empregar técnicas de sensoriamento remoto, é possível identificar áreas críticas de poluição, facilitando o desenvolvimento de estratégias eficazes para a mitigação do impacto ambiental. A capacidade de monitorar continuamente as condições marinhas e a qualidade da água é essencial, não apenas para rastrear as fontes de poluição, mas também para promover uma abordagem proativa na conservação marinha. Além dos avanços tecnológicos, as políticas públicas desempenham um papel crucial na luta contra a poluição marinha. O estudo de Clayton *et al.* (2021) sobre as respostas políticas voltadas para a redução da poluição por plásticos de uso único nas regiões caribenhas examina como legislações, programas de educação

ambiental e o engajamento comunitário têm se mostrado eficazes. A pesquisa revelou que, embora haja um crescente reconhecimento da seriedade do problema, a implementação dessas políticas deve ser acompanhada por um compromisso contínuo das comunidades para efetivar mudanças significativas. Somente por meio de uma abordagem integrada, que inclua tanto a regulamentação quanto a conscientização, será possível combater a poluição plástica de maneira efetiva e duradoura.

A revisão realizada por Willis *et al.* (2022) enfoca as múltiplas estratégias que podem ser aplicadas para a redução da poluição marinha, ressaltando a importância de práticas de manejo sustentável, especialmente no contexto da indústria pesqueira. O estudo enfatiza que a colaboração intersetorial é vital, assim como a implementação de tecnologias inovadoras e limpas. Tais medidas são fundamentais não apenas para restaurar a qualidade dos ecossistemas marinhos, mas também para garantir que as atividades humanas não comprometam o equilíbrio ecológico. Do ponto de vista jurídico, a pesquisa de Matias e Diógenes (2022) lança luz sobre a poluição marinha por resíduos plásticos, discutindo lacunas na definição e na regulamentação do problema. A análise crítica sugere que um marco legal mais robusto e abrangente é necessário para enfrentar os desafios associados à poluição plástica. A falta de uma legislação clara limita a eficácia das iniciativas de mitigação, sublinhando a necessidade de um enfoque que abarque todas as etapas do ciclo de vida dos plásticos, incluindo a produção, o uso e a disposição final.

A gestão ambiental das atividades navais no Brasil, conforme discutido por De Almeida e de Souza (2022), revela que a conformidade com as normas estabelecidas pela Marinha do Brasil é essencial para evitar que operações navais contribuam negativamente para os ecossistemas marinhos. O estudo argumenta que a gestão integrada, que considera a preservação ambiental como um componente central das atividades marítimas, é indispensável para garantir um futuro sustentável para os oceanos. A poluição marinha é uma questão complexa que exige um esforço colaborativo entre ciência, políticas públicas e a sociedade civil. Com o avanço das tecnologias de monitoramento, a criação de políticas eficazes e a melhoria das regulamentações legais, é possível diminuir os impactos da poluição marinha e proteger os ecossistemas oceânicos para gerações futuras. Essa abordagem holística é necessária não apenas para a preservação ambiental, mas também para assegurar que os oceanos continuem a fornecer recursos essenciais para a humanidade.

POLUIÇÃO PLÁSTICA NOS OCEANOS

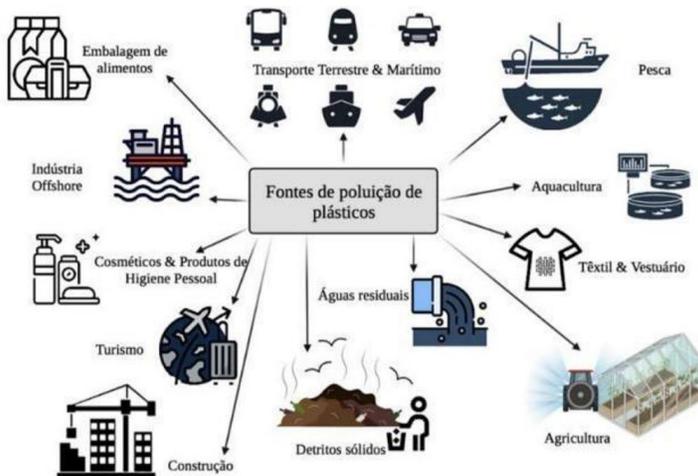
Os microplásticos, que são partículas menores que 5 mm, podem ser ingeridos por uma variedade de organismos, desde plâncton até grandes mamíferos marinhos, afetando a saúde e a sobrevivência dessas espécies. A Figura 2 ilustra como o plástico chega ao oceano, destacando que a maioria provém de fontes terrestres. Isso inclui derrames acidentais ou intencionais e cheias torrenciais que arrastam materiais das margens para os rios, além de sistemas ineficientes de tratamento

de efluentes urbanos e industriais. Estima-se que mais de 10 milhões de toneladas métricas de plástico entram anualmente no oceano, equivalente a um caminhão de lixo cheio de plástico despejado a cada minuto. O plástico de uso único, como sacos plásticos, representa o maior contribuinte para essa contaminação.

A poluição marinha é um problema crescente que afeta a saúde dos ecossistemas aquáticos e a biodiversidade global. Essa poluição é causada por diversas fontes, incluindo resíduos sólidos, produtos químicos e poluentes orgânicos, dos quais os plásticos têm se tornado uma preocupação crítica. A presença de plásticos nos oceanos não apenas degrada a qualidade da água, mas também ameaça a vida selvagem marinha, resultando em consequências que se estendem ao longo da cadeia alimentar e impactam a saúde humana. Os resíduos plásticos, como garrafas, sacolas e microplásticos, representam uma fração significativa da poluição marinha. Leitão (2021) destaca que a poluição por plásticos têm impactos diretos sobre a fauna marinha, incluindo a ingestão de resíduos, que pode levar a consequências adversas, como obstruções intestinais, intoxicação e até morte. A presença de plásticos nos oceanos pode interferir no comportamento e na reprodução de várias espécies marinhas, causando um impacto a longo prazo na biodiversidade.

Além da ingestão, a poluição marinha afeta a fauna através da interação física com os resíduos plásticos. Tartarugas, aves e mamíferos marinhos podem ficar presos em redes de pesca abandonadas ou em outros detritos, causando ferimentos graves ou morte. O estudo de Bellas e Gil (2020) revela que microplásticos podem aumentar a toxicidade de substâncias químicas, como o clorpirifos, para organismos marinhos, como o copépode que são pequenos crustáceos que pertencem ao grupo dos artrópodes, *Acartia tonsa*. Isso levanta preocupações adicionais sobre a segurança da vida marinha e dos ecossistemas, uma vez que esses organismos são fundamentais para a saúde dos oceanos e servem como base da cadeia alimentar. A poluição marinha é um desafio multifacetado que exige uma abordagem integrada. Andrade *et al.* (2024) enfatizam a importância da conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos, conforme estabelecido nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030. Os ODS não apenas reconhecem a necessidade de proteger a biodiversidade marinha, mas também promovem a implementação de políticas robustas para a gestão sustentável dos recursos marinhos. A implementação de políticas de gestão de resíduos e a promoção de práticas de reciclagem são fundamentais para reduzir a quantidade de plástico que chega aos oceanos. Por outro lado, Yao *et al.* (2022) discutem a toxicidade ambiental e a decomposição do polietileno, destacando como a presença de plásticos nos ambientes marinhos pode gerar efeitos adversos sobre a fauna aquática. O estudo revela que a degradação inadequada dos plásticos pode liberar substâncias tóxicas que afetam organismos marinhos e, conseqüentemente, a saúde dos ecossistemas. Um aspecto importante da poluição marinha é a questão dos microplásticos e nanoplásticos. Bebiano, Rosas e Melissa (2021) discutem como esses poluentes chegam aos oceanos e as implicações que têm para a vida marinha.

Figura 2 – Fontes de Plástico nos Oceanos.



Fonte: Fontes principais de plástico para o oceano. A figura é da autoria de Joanna Gonçalves (feita no Biorender.com).

Iniciativas de conscientização pública e programas de educação, como os descritos por Silva *et al.* (2023), têm mostrado eficácia em melhorar a compreensão da poluição marinha e suas consequências. A abordagem de ciência, tecnologia e sociedade permite que educadores abordem a poluição marinha de uma maneira que engaje os alunos e promova a responsabilidade ambiental. Programas educacionais que integram esses conceitos podem equipar as futuras gerações com o conhecimento e as habilidades necessárias para enfrentar os desafios da poluição marinha. Além disso, a colaboração internacional é crucial para o combate à poluição marinha. O compartilhamento de melhores práticas, tecnologias e estratégias de gestão pode ajudar países em desenvolvimento a enfrentar esses desafios de maneira mais eficaz. A implementação de acordos globais que visem a redução do uso de plásticos e a proteção dos oceanos é essencial para garantir a saúde a longo prazo dos ecossistemas marinhos. Vale ressaltar que a poluição marinha representa uma ameaça significativa à saúde dos ecossistemas aquáticos e à biodiversidade. A combinação de esforços de conservação, educação e políticas públicas eficazes é fundamental para desenvolver soluções que possam abordar esse problema global. Somente por meio de uma abordagem integrada e colaborativa foi possível proteger os oceanos e garantir um futuro sustentável para as próximas gerações.

Impactos Ambientais do Polietileno

O polietileno, um dos plásticos mais amplamente utilizados em todo o mundo, é classificado em duas variantes principais: polietileno de alta densidade (PEAD) e polietileno de baixa densidade (PEBD). Ambas as variantes apresentam impactos ambientais significativos. O PEAD, frequentemente utilizado em embalagens rígidas e produtos duráveis, é notoriamente resistente à degradação, resultando em

um acúmulo prolongado no meio ambiente (Buhari *et al.*, 2024). Por outro lado, o PEBD é comumente encontrado em sacolas e embalagens flexíveis, contribuindo igualmente para a poluição, especialmente em ecossistemas aquáticos, onde a leveza facilita o transporte pelas correntes (Silva *et al.*, 2023). O setor de tratamento de resíduos deve ser compreendido como parte essencial do desenvolvimento sustentável, exigindo soluções que considerem os conceitos de produção e consumo sustentáveis. Consoante à Figura 1, o ciclo de vida dos materiais poliméricos depende da rota escolhida, sendo os principais destinos dos polímeros a reciclagem mecânica, a recuperação de energia e o aterro sanitário.

Figura 1 – Etapas do ciclo de vida dos polímeros.



Fonte: adaptado de Plastics Europe et al. 2015.

Gryczak (2020) investigou o uso de polietileno de baixa densidade reciclado na mitigação dos impactos ambientais decorrentes da drenagem ácida gerada pela mineração de carvão no Sul de Santa Catarina. A implementação de práticas de reciclagem não apenas reduz o volume de resíduos plásticos, mas também contribui para a recuperação de áreas afetadas pela atividade mineradora. Ademais, Jeswani *et al.* (2021) abordam os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida do polietileno, oferecendo uma comparação entre a reciclagem química via pirólise, a reciclagem mecânica e a recuperação de energia. Os autores argumentam que, apesar de a reciclagem química apresentar algumas vantagens em termos de eficiência na redução de resíduos, também levanta questões ambientais que necessitam de uma avaliação cuidadosa. Du e Wang (2021) realizaram uma caracterização detalhada dos microplásticos, discutindo seus efeitos adversos sobre o meio ambiente. O estudo revela que os microplásticos, resultantes da degradação de materiais plásticos, como o polietileno, têm impactos negativos significativos sobre a biota aquática, podendo ser ingeridos por organismos marinhos e, conseqüentemente, entrar na cadeia alimentar, representando uma ameaça à saúde dos ecossistemas e dos seres humanos.

A produção de polietileno não apenas resulta na acumulação desse material em ecossistemas terrestres e aquáticos, mas também gera emissões significativas de gases de efeito estufa durante o ciclo de vida. A análise da cadeia de produção e descarte deste material indica que, além de se fragmentar em microplásticos, o polietileno pode liberar substâncias tóxicas que afetam a fauna e a flora locais.

A ingestão de microplásticos por organismos marinhos e terrestres tem sido associada a alterações fisiológicas e comportamentais, impactando a biodiversidade e a saúde dos ecossistemas (Kumar *et al.*, 2021). Com o crescente aumento da conscientização sobre os impactos ambientais do polietileno, pesquisadores e ambientalistas têm buscado alternativas mais sustentáveis, incluindo bioplásticos e métodos de reciclagem inovadores, que podem ajudar a mitigar os danos causados por esse material (Zhao *et al.*, 2023). No entanto, a implementação dessas soluções ainda enfrenta barreiras significativas, como a aceitação do consumidor e a viabilidade econômica. Em suma, a análise dos impactos ambientais do polietileno, especialmente em suas formas de baixa e alta densidade, revela a complexidade e a urgência da problemática da poluição plástica. A pesquisa e a implementação de tecnologias de reciclagem, juntamente com uma gestão eficaz de resíduos, são cruciais para mitigar esses impactos e promover um futuro mais sustentável.

AUMENTO DO PLÁSTICO NOS OCEANOS PÓS COVID-19

A pandemia de COVID-19 trouxe à tona uma série de desafios ambientais, entre os quais se destaca o aumento alarmante do descarte de plásticos, especialmente aqueles destinados a dispositivos de proteção, como máscaras, luvas e outros Equipamentos de Proteção Individual (EPIs). O uso intensivo desses materiais durante a crise sanitária, impulsionado pela necessidade de proteger a saúde pública, resultou em um gerenciamento inadequado de resíduos plásticos na maioria das comunidades, contribuindo significativamente para a poluição nos oceanos. De acordo com a pesquisa de Borges-Paluch *et al.* (2023), a falta de infraestrutura adequada para o descarte apropriado desses plásticos foi um fator crucial nesse processo. As redes de coleta de resíduos em muitos países, já sobrecarregadas antes da pandemia, não estavam preparadas para lidar com o aumento drástico na geração de resíduos plásticos. Além disso, a falha em promover a conscientização sobre o impacto ambiental desses materiais impactou ainda mais a situação. Essa combinação de fatores culminou em um aumento perceptível da poluição marinha, evidenciado pelo aparente crescimento de plásticos em ecossistemas aquáticos.

A pesquisa de Barbosa Sá, Leitão e Di Pasquale (2022) acrescenta uma nova camada a essa discussão ao enfatizar que a poluição marinha por plásticos acarreta custos econômicos significativos, estimados em bilhões de dólares anualmente. Esses custos incluem os danos à vida marinha, à pesca, ao turismo e à saúde pública. A pesquisa ressalta a emergência de estratégias eficazes que possam ser inspiradas em modelos da União Europeia, que historicamente apresentaram abordagens mais proativas e robustas para a gestão de resíduos plásticos, incluindo a proibição de plásticos de uso único, incentivo à reciclagem e à pesquisa de novos materiais sustentáveis. A implementação de políticas públicas robustas e campanhas de conscientização ambiental se revelam essenciais para mitigar o uso de plásticos descartáveis e aumentar a eficiência da reciclagem. Um exemplo dessas políticas é a diretiva da União Europeia sobre plásticos descartáveis que visa reduzir a quantidade de resíduos plásticos, incentivando a transição para alternativas sustentáveis e adoção de práticas de economia circular.

A análise da poluição marinha por plásticos também é abordada em um estudo de Rosa (2023), que foca na modelagem automática de tópicos em textos jornalísticos. O aumento da cobertura da mídia sobre a poluição marinha confirma o crescente interesse do público em compreender como a pandemia influenciou as questões de poluição, especialmente o aumento do uso de plásticos descartáveis. Esse foco da mídia é vital para elevar a conscientização pública e encorajar mudanças de comportamento que possam contribuir para a redução da poluição. Vanapalli *et al.* (2021) discutem os desafios para a gestão eficaz de resíduos plásticos durante e após a pandemia. Eles observam que, embora a crise de saúde pública tenha gerado um aumento no uso de plásticos, também criou uma oportunidade única para fomentar inovações em gestão de resíduos, incluindo tecnologias de reciclagem e compostagem, e o desenvolvimento de novos paradigmas que priorizam a economia circular. Benson, Basse e Palanisami (2021) destacam a “pegada” de resíduos plásticos resultante da pandemia, apontando que o aumento significativo no descarte de plásticos de uso único resulta em consequências de longo alcance para o meio ambiente. Sua pesquisa sugere que a recuperação da economia pós-pandemia deve ser acompanhada pela implementação de práticas sustentáveis que considerem o ciclo de vida completo dos plásticos. Li *et al.* (2023) abordam o conceito de “upcycling” de plásticos, que se torna uma estratégia promissora tanto durante quanto após a pandemia. O upcycling refere-se à transformação de plásticos comuns em produtos de maior valor agregado, contribuindo para um ciclo de vida mais sustentável e diminuindo a necessidade de novos plásticos. Isso reflete não apenas a necessidade de reduzir o consumo de plásticos descartáveis, mas também de encontrar soluções inovadoras que reimaginem seu uso dentro de uma economia circular.

A análise de Eraslan *et al.* (2023) caracteriza a era da pandemia como marcada por um aumento significativo no uso de plásticos de uso único. Os autores argumentam que, para enfrentar essa “pandemia de plásticos”, é crucial estabelecer um compromisso global para reverter a tendência de aumento da poluição plástica nos oceanos. Nesse sentido, Leitão (2021) propõe uma governança global para enfrentar a poluição marinha, sublinhando a importância da colaboração internacional em torno da implementação de políticas que fomentem a educação ambiental, reduzam o consumo de plásticos e incentivem a pesquisa e desenvolvimento de alternativas sustentáveis. Campos da Rocha *et al.* (2024) abordam a questão da poluição plástica em corpos hídricos de Boa Vista, Roraima, salientando a necessidade de educação ambiental para combater esse problema. O estudo enfatiza a importância de engajar a comunidade local em iniciativas que promovam a conscientização sobre os impactos dos plásticos nos rios e oceanos, ideia que é reforçada pela compreensão de que a mudança de comportamento na sociedade é crucial para um futuro mais sustentável. A Pandemia de COVID-19 não apenas acentuou um problema preexistente de poluição plástica nos oceanos, como também revelou a necessidade urgente de uma abordagem integrada. Essa abordagem deve envolver educação contínua, inovação em gestão de resíduos, governança global e políticas públicas eficazes, todas voltadas para enfrentar os desafios impostos por essa crise ambiental e minimizar o impacto da poluição plástica nos ecossistemas marinhos e na saúde do planeta.

ECONOMIA CIRCULAR E REAPROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS PLÁSTICOS

A economia circular representa uma mudança paradigmática nas abordagens tradicionais de produção e consumo, buscando não apenas a redução do desperdício, mas também a maximização do uso de recursos disponíveis. Essa abordagem é especialmente crítica quando se trata de plásticos, cuja produção e descarte têm gerado preocupações ambientais significativas. O reaproveitamento e a reciclagem de plásticos são, portanto, temas centrais para alcançar a sustentabilidade e minimizar os impactos negativos sobre o meio ambiente. Macedo *et al.* (2020) destacam a importância da reciclagem do Polietileno Tereftalato (PET), um dos plásticos mais utilizados globalmente, especialmente em embalagens. O estudo analisa como o processo de reciclagem do PET não apenas reduz o volume de resíduos que acabam em aterros, mas também promove a economia circular ao permitir que os materiais sejam reintroduzidos na cadeia produtiva. Os autores argumentam que, ao transformar resíduos em novos produtos, é possível diminuir a necessidade de recursos virgens, reduzindo assim a pressão sobre o meio ambiente. Eles também ressaltam a importância de investimentos em infraestrutura e tecnologia para melhorar a eficiência dos processos de reciclagem e aumentar a qualidade dos produtos.

A reciclagem de garrafas plásticas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) é abordada por Sargiani (2020), que investiga o processamento e a caracterização do material reciclado. O autor realiza uma comparação detalhada das propriedades do plástico reciclado em relação ao material virgem, revelando que, em muitos casos, as propriedades mecânicas e físicas do PEAD reciclado podem ser competitivas. Essa descoberta é crucial, pois desafia a percepção de que os materiais reciclados são de qualidade inferior. Além disso, Sargiani discute as aplicações potenciais para o PEAD reciclado, sugerindo que a sua utilização em novas embalagens e produtos pode contribuir significativamente para a redução da demanda por recursos novos e para a promoção de uma economia circular mais robusta. No âmbito da reciclagem química, Nienov *et al.* (2021) oferecem uma análise abrangente sobre a pirólise de polímeros, como o polietileno e o polipropileno. O estudo, que combina uma revisão sistemática da literatura e uma análise bibliométrica, destaca que a reciclagem química pode ser uma solução inovadora para materiais que são difíceis de reciclar mecanicamente. A pirólise permite a quebra dos polímeros em monômeros, que podem ser reutilizados na produção de novos plásticos. Este processo diversifica as opções de reciclagem, mas também aumenta o potencial de recuperação de materiais, alinhando-se perfeitamente aos princípios da economia circular e reduzindo a quantidade de resíduos plásticos que são descartados no meio ambiente.

Silva (2017) contribui para a discussão sobre a economia circular, focando na análise de ciclo de vida (ACV) e no controle de qualidade de blendas poliméricas recicladas. Scremin enfatiza a importância de avaliar o impacto ambiental dos produtos de polietileno, considerando fatores como a pegada de carbono e o uso

de recursos naturais ao longo de todas as etapas de produção. Este tipo de análise é fundamental para entender as verdadeiras implicações ambientais da produção e do uso de plásticos. Por outro lado, Silva investiga métodos quimiométricos para assegurar a qualidade das blendas, o que é essencial para garantir que os produtos reciclados atendam aos padrões industriais exigidos. Ambos os estudos ressaltam que a pesquisa e a inovação são cruciais para aprimorar a eficiência dos processos de reciclagem e garantir a qualidade dos materiais reciclados. Meira (2021) investiga diferentes aditivos que podem ser utilizados para reduzir o odor em polímeros reciclados. O odor é uma característica que pode limitar a aceitação de plásticos reciclados em várias aplicações, especialmente na produção de embalagens. Ao desenvolver soluções que mitigam esse problema, Meira contribui para aumentar a aceitação dos plásticos reciclados no mercado, o que, por sua vez, pode fomentar um maior reaproveitamento e uma maior adesão à economia circular. Portanto, para Reis *et al.* (2022) a confecção de telhas feitas de PEAD reciclado, mostrando uma aplicação prática da reciclagem de plásticos em produtos de construção. O protótipo inicial que os autores desenvolveram não só ilustra a viabilidade do reaproveitamento de plásticos, mas também oferece uma solução inovadora para as necessidades do setor de construção. Este tipo de iniciativa não apenas promove a reciclagem, mas também serve como um exemplo de como a economia circular pode ser aplicada de maneira prática e efetiva em diferentes setores da economia. Desde a reciclagem mecânica até a reciclagem química, evidenciando a necessidade de inovação contínua e pesquisa para otimizar processos e garantir a qualidade dos materiais reciclados. A educação e a conscientização do consumidor também desempenham papéis essenciais na promoção de uma cultura de reaproveitamento, fundamental para o sucesso da economia circular e para a construção de um futuro mais sustentável. A colaboração entre indústrias, pesquisadores e a sociedade civil será crucial para alcançar esses objetivos.

BIODEGRADAÇÃO DE PLÁSTICOS P6.6OR MICROORGANISMOS

A biodegradação de plásticos por microrganismos tem se tornado um tema de crescente relevância no cenário contemporâneo, especialmente em face da crise ambiental causada pelo acúmulo de resíduos plásticos. Com a produção global de plásticos atingindo níveis alarmantes e sua persistência no meio ambiente, a busca por soluções sustentáveis para a gestão desses resíduos é mais urgente do que nunca. Diversos estudos têm investigado a capacidade de diferentes microrganismos, especialmente bactérias e fungos, em degradação de plásticos, oferecendo novas perspectivas para a mitigação dos impactos ambientais associados ao uso inadequado desses materiais. Asiandu *et al.* (2021) focou na biodegradação de plásticos utilizando bactérias degradadoras de plásticos. Os autores destacaram a relevância dessas bactérias em desenvolvimento de soluções tecnológicas para mitigar a umidade plástica, evidenciando casos de sucesso onde cepas bacterianas específicas foram capazes de degradar diferentes tipos de plástico. A exploração

das capacidades dessas bactérias é crucial para a busca de alternativas eficazes e sustentáveis no tratamento de resíduos plásticos.

Além disso, Nadeem *et al.* (2021) concentraram-se no isolamento e identificação de cepas bacterianas novas que degradam polietileno de baixa densidade. A importância dessas cepas reside na sua capacidade de transformar plásticos em compostos menos atraentes, representando uma contribuição valiosa na luta contra a poluição plástica. Atanasova *et al.* (2021) investigaram também a manipulação de plásticos por bactérias extremófilas, ressaltando que esses microrganismos podem sobreviver em ambientes hostis e desempenhar um papel importante na biodegradação de plásticos. O potencial das bactérias extremófilas abre novos caminhos para pesquisas futuras que visam a deterioração dos plásticos em condições adversas, o que pode ser extremamente útil em diversos contextos ambientais. (LV *et al.*, 2024) estudaram a biodegradação de plásticos típicos, desde a diversidade microbiana até os mecanismos metabólicos, ampliando o entendimento sobre como os microrganismos interagem com esses materiais. Esse aprofundamento em mecanismos metabólicos de manipulação é essencial para o desenvolvimento de estratégias de biorremediação mais eficazes.

A bioprospecção de fungos filamentosos isolados de sedimentos de mangue no estado de Pernambuco, focando na biodegradação de petroderivados. Os manguezais são ecossistemas costeiros cruciais, caracterizados por sua rica biodiversidade e importância ecológica, atuando como barreiras naturais contra a erosão e específicos como berçários para diversas espécies marinhas. Os resultados demonstraram que os fungos isolados tiveram atividade significativa na manipulação de compostos orgânicos, especialmente que esses organismos poderiam ser igualmente eficazes na manipulação de plásticos, Da Silva *et al.* (2023). Roessing *et al.* (2023) conduziram uma pesquisa sobre a identificação e filogenia de fungos lignícolas isolados do Bosque do INPA, com foco na biodegradação de plástico LDPE. Este estudo é fundamental, pois amplia o conhecimento sobre as linhagens fúngicas que podem ser aplicadas na biorremediação de resíduos plásticos. A diversidade de fungos lignícolas em florestas tropicais, conforme planejado por esses autores, indica um potencial significativo para a manipulação de plásticos. Arthur Pérez Aguiar (2023) focou na prospecção de fungos filamentosos marinhos na biodegradação de microplásticos. Os fungos marinhos apresentam um grande potencial na manipulação de microplásticos, especialmente em ambientes marinhos, onde a contaminação por plásticos é alarmante. Este estudo é particularmente relevante, pois, como destacado por Aguiar, os microplásticos são partículas pequenas que podem ser ingeridas por organismos marinhos, afetando a cadeia alimentar e a saúde dos ecossistemas aquáticos.

Complementando essa linha de pesquisa, De Souza *et al.* (2020) abordaram a biodegradação de polietileno de alta densidade (PEAD) através de larvas de *Tenebrio molitor*, ressaltando a importância da simbiose entre fungos e outros organismos na biorremediação de plásticos. Essa inter-relação pode potencializar a eficácia dos processos de manipulação, com interesse que uma abordagem integrada, envolvendo fungos e outros organismos degradadores, pode ser mais

eficiente na mitigação da poluição plástica. Cândido *et al.* (2022) discutem o potencial de fungos de podridão branco na manipulação de plásticos, enfatizando como essas espécies podem ser utilizadas em processos biológicos para reduzir a persistência de plásticos no meio ambiente. O estudo revela que esses fungos possuem enzimas específicas, como ligninases e celulases, que quebram estruturas poliméricas complexas, transformando plásticos em compostos menos agressivos. Ao combinar a biotecnologia com uma compreensão aprofundada das capacidades microbianas, é possível desenvolver soluções inovadoras e eficazes para mitigar o impacto ambiental dos plásticos. A inovação nas técnicas de biorremediação e a exploração das capacidades naturais dos microrganismos não apenas oferecem alternativas sustentáveis para o manejo de resíduos plásticos, mas também promovem a conservação dos ecossistemas, contribuindo para um futuro mais sustentável.

INOVAÇÕES EM MATERIAIS E NOVOS PROCESSOS PARA REDUÇÃO DA POLUIÇÃO PLÁSTICA

As inovações em materiais e novos processos para a redução da poluição plástica emergem como soluções essenciais para enfrentar um dos maiores problemas ambientais da atualidade. A busca por alternativas que possam substituir ou minimizar o uso de plásticos convencionais tem sido impulsionada pela crescente conscientização sobre os impactos ambientais desses materiais. Diversos estudos têm explorado diferentes abordagens para promover a sustentabilidade na indústria de plásticos, destacando a importância de inovações que visam tanto a redução da produção de plásticos de uso único quanto o desenvolvimento de produtos que possam ser mais facilmente reciclados ou biodegradáveis. Um estudo significativo realizado por Moshood *et al.* (2022) enfatiza a importância da inovação de produtos verdes na indústria de plásticos biodegradáveis. A pesquisa sugere que a implementação de práticas de inovação de produtos é um caminho promissor para alcançar uma produção mais sustentável e minimizar os resíduos plásticos. A proposta é que a adoção de plásticos biodegradáveis não só mitigue os efeitos ambientais adversos dos plásticos convencionais, mas também promova uma economia circular, onde os materiais têm um ciclo de vida mais eficiente e menos prejudicial ao meio ambiente.

Complementando essa visão, Rajvanshi *et al.* (2023) argumentam que os plásticos bio-based representam uma solução alternativa e inovadora para combater a poluição plástica. Os autores destacam que esses materiais, oriundos de fontes renováveis, não apenas reduzem a dependência de plásticos derivados do petróleo, mas também permitem a incorporação de práticas sustentáveis em diversas indústrias. A pesquisa salienta que, ao promover um modelo de economia circular, onde a reutilização e a reciclagem se tornam primordiais, é possível enfrentar de forma mais eficaz os desafios impostos pela poluição plástica. Enquanto isso, Moshood *et al.* (2022) também exploram as aplicações dos plásticos biodegradáveis e suas contribuições para a sustentabilidade. O estudo aborda as

inovações recentes nos produtos verdes, que não apenas atendem à demanda por alternativas sustentáveis, mas também demonstram desempenho satisfatório em diversas aplicações. Essa trajetória de inovação é essencial para a transição para materiais que não apenas atendem às necessidades do mercado, mas que também são compreensíveis em termos de gestão de resíduos.

A discussão sobre a poluição plástica também é ampliada por Millican e Agarwal (2021), que analisam a natureza do problema de materiais. Eles afirmam que a poluição plástica não é apenas uma questão de quantidade de resíduos, mas também envolve o tipo de materiais utilizados e suas propriedades. A abordagem deles ressalta a necessidade de repensar os materiais plásticos e seus ciclos de vida, incentivando indústrias a considerar a sustentabilidade desde o design até a disposição final dos produtos. Law e Narayan (2022) acrescentam um aspecto crítico ao argumentar que a redução da poluição plástica deve incluir o projeto de polímeros para uma gestão adequada do fim de vida. Eles destacam que, ao projetar materiais que sejam mais fáceis de reciclar ou que se biodegradam de maneira controlada, é possível reduzir significativamente a carga de resíduos plásticos no meio ambiente. Este design consciente pode facilitar a economia circular, onde os materiais são reintegrados ao ciclo produtivo, minimizando o desperdício. Além disso, a dissertação de Couto (2021) apresenta um manual prático sobre processos acessíveis para a reciclagem de plástico e a criação de novos produtos. A pesquisa enfatiza a importância da educação e a capacitação de indivíduos e comunidades para que possam adotar práticas sustentáveis de reciclagem, contribuindo para um futuro mais limpo e sustentável.

Por último, Real (2021) apresenta um estudo sobre o comportamento e desempenho de produtos plásticos, discutindo o uso de materiais poliméricos reciclados e biocompósitos na construção. O estudo indica que a aplicação desses novos materiais pode não apenas reduzir a demanda por plásticos virgens, mas também promover práticas de construção mais sustentáveis, que integram conceitos de design e engenharia com respeito ao meio ambiente. Em síntese, as inovações em materiais e as novas abordagens para processos produtivos estão se tornando cada vez mais relevantes na luta contra a poluição plástica. A transição para plásticos biodegradáveis, a utilização de plásticos bio-based, o redesenho dos materiais para facilitar a reciclagem e a educação para a gestão de resíduos são fundamentais para a construção de uma economia circular e sustentável. A colaboração entre pesquisadores, indústrias e formuladores de políticas será vital para implementar essas soluções e mitigar o impacto ambiental da poluição plástica.

CONSIDERAÇÃO FINAIS

A poluição marinha, especialmente causada pelo acúmulo de plásticos nos oceanos, representa um desafio ambiental crítico que afeta a saúde dos ecossistemas aquáticos e a biodiversidade. Tecnologias de monitoramento, políticas públicas rigorosas e iniciativas de educação ambiental são essenciais para mitigar esse problema. A promoção de inovações na reciclagem e o uso de bioplásticos,

assim como a pesquisa sobre a biodegradação por microrganismos, são caminhos promissores para reduzir os impactos negativos da poluição plástica. Portanto, uma abordagem integrada e colaborativa é fundamental para proteger os oceanos e garantir um futuro sustentável.

REFERÊNCIAS

- ALBANO, Márcia de Lurdes. **Avaliação da eficácia Jus ambiental do regulamento de gestão e controlo do uso de saco de plástico (Decreto n.º 16/2015 de 05 de Agosto) na redução da poluição marinha de plástico – Caso de Estudo da poluição plástica da praia da Costa do Sol (2015-2021)**. 2024.
- AGUIAR, Arthur Pérez. **Prospecção de fungos filamentosos marinhos na biodegradação de microplástico**. 2023.
- ANDRADE, Israel de Oliveira *et al.* **Agenda 2030: objetivos de desenvolvimento sustentável: avaliação do progresso das principais metas globais para o Brasil: ODS 14: conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável**. 2024.
- ASIANDU, Angga Puja; WAHYUDI, Agus; SARI, Septi Widiya. **A review: plastics waste biodegradation using plastics-degrading bacteria**. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, v. 9, n. 1, p. 148-157, 2021.
- ATANASOVA, Nikolina *et al.* **Plastic degradation by extremophilic bacteria**. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 22, n. 11, p. 5610, 2021.
- BARBOSA SÁ LEITÃO DI PASQUALE, ADRIANA ISABELLE *et al.* **Os custos econômicos da poluição marinha por plásticos: estratégias para a superação do problema a partir do modelo da União Europeia**. In: *Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável: artigos do IV Encontro Nacional de Pesquisadores em Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável*. Educus, 2022. p. 265-291.
- BEBIANNO, Maria João; ROSAS, Eloah Garcia; MELISSA, Joanna. **O lixo marinho. O que são microplásticos e nanoplásticos? Como chegam ao oceano?**. *Micro e Nanoplásticos: um Macroproblema*, p. 21.
- BENSON, Nsikak U.; BASSEY, David E.; PALANISAMI, Thavamani. **COVID pollution: impact of COVID-19 pandemic on global plastic waste footprint**. *Heliyon*, v. 7, n. 2, 2021.
- BELLAS, J., & GIL, I. **Polyethylene microplastics increase the toxicity of chlorpyrifos to the marine copepod *Acartia tonsa***. *Environmental Pollution*, 2020.
- BRIOSCHI, Livia; PEDRA, Adriano Sant'Ana. **O dever das empresas e da poluição atmosférica**. *Direito e Desenvolvimento*, 2023.

BORGES-PALUCH, Larissa Rolim *et al.* **COVID-19 E OS IMPACTOS DO DESCARTE DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO RESPIRATÓRIA.** Revista Eletrônica Interdisciplinar, v. 15, n. 2, 2023.

BUHARI, Sunusi Bataiya *et al.* **Insights sobre enzimas de degradação de poliéster PET recentemente descobertas, análises de termoestabilidade e atividade.** 3 Biotech, v. 14, n. 1, p. 31, 2024.

BUDHI, Sanjaya; PELLA, Mara; HERAWATI, Leli. **A Comparative Study of Biodegradable Plastics and Conventional Plastics.** Journal of Environmental Science and Sustainable Development, v. 5, n. 3, 2022.

CÂNDIDO, Darlan Sóstenes dos Santos *et al.* **Potencial de fungos da podridão branca na degradação de plásticos: uma revisão.** 2022.

CAMPOS DA ROCHA, Franciele Oliveira *et al.* **Nossos Rios Sem Plástico: Educação Ambiental quanto à poluição plástica em corpos hídricos de Boa Vista, Roraima.** Revista Brasileira de Extensão Universitária, v. 15, n. 1, 2024.

CLAYTON, C. Andrea *et al.* **Policy responses to reduce single-use plastic marine pollution in the Caribbean.** Marine Pollution Bulletin, v. 162, p. 111833, 2021.

COUTO, Tânia Alves. **PLASTIRCULAR: Um manual de processos acessíveis para a reciclagem de material plástico e criação de novos produtos.** 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto (Portugal).

DA SILVA, Paulo Gustavo Otaviano *et al.* **Bioprospecção de fungos filamentosos isolados de sedimentos de mangue do estado de Pernambuco para biodegradação de petroderivados.** Research, Society and Development, v. 11, n. 9, p. e11311931559-e11311931559, 2022.

DE ALMEIDA, Nival Nunes; DE SOUZA, Cláudia C. Torquato. **Uma visão da gestão ambiental de meios navais nacionais a partir das normas da Marinha do Brasil.** Revista da EGN, v. 28, n. 3, p. 723-754, 2022.

DE CARVALHO, Joana Messias. **Biorremediação fúngica dos microplásticos no oceano.** 16º Jornada Científica e Tecnológica e 13º Simpósio de Pós-Graduação do IFSULDEMINAS, v. 15, n. 1, 2023.

DU, Hao; WANG, Jun. **Characterization and environmental impacts of microplastics.** Gondwana Research, v. 98, p. 63-75, 2021.

ERASLAN, Fatma Nur *et al.* **The single-use plastic pandemic in the COVID-19 era.** In: Microplastics in the ecosfera: air, water, soil, and food, p. 65-75, 2023.

FRUTUOSO, Wellison Martins *et al.* **Isolamento e caracterização de bactérias da plastisfera da costa semiárida e avaliação de seu potencial de biodegradação de polietileno.** Revista Eletrônica do Seminário de Iniciação Científica da UFERSA, v. 30, n. 1, 2024.

GRYCZAK, Marcelo; PETZHOLD, Cesar Liberato. **Avaliação ecotoxicológica em resíduos de carvão mineral com Eisenia fetida utilizando como parâmetro perda de biomassa.** Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 9, n. 2, p. 202-213, 2020.

GREENMATCH. (2024 Update: Key Facts and Trends on Ocean Pollution. <https://www.greenmatch.co.uk/ocean-pollution-facts>.

JESWANI, Harish *et al.* **Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery.** Science of the Total Environment, v. 769, p. 144483, 2021.

KUMAR, Sunil *et al.* **Utilization of plastic wastes for sustainable environmental management: a review.** ChemSusChem, v. 14, n. 19, p. 3985-4006, 2021.

LAW, Kara Lavender; NARAYAN, Ramani. **Reducing environmental plastic pollution by designing polymer materials for managed end-of-life.** Nature Reviews Materials, v. 7, n. 2, p. 104-116, 2022.

LEITÃO, Adriana Isabelle Barbosa Lima Sá. **Mitigando os efeitos da poluição marinha por plásticos: uma governança global para superar o problema?.** 2021.

LI, Anni *et al.* **Global plastic upcycling during and after the COVID-19 pandemic: the status and perspective.** Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 11, n. 3, p. 110092, 2023.

LV, Shiwei *et al.* **Biodegradation of typical plastics: from microbial diversity to metabolic mechanisms.** International Journal of Molecular Sciences, v. 25, n. 1, p. 593, 2024.

MA, Jingwu *et al.* **A global review of progress in remote sensing and monitoring of marine pollution.** Water, v. 15, n. 19, p. 3491, 2023.

MACEDO, Indira Maria Estolano *et al.* **Reciclagem do Polietileno Tereftalato.** Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 8, p. 57704-57723, 2020.

MATIAS, João Luis Nogueira; DIÓGENES, Beatriz Nunes. **Poluição Marinha Por Resíduos Plásticos: Identificando Lacunas E Desafios Na (In) Definição De Um Problema Jurídico.** Revista Eletrônica do Curso de Direito da UFSM, v. 17, n. 3, p. e45204-e45204, 2022.

MEIRA, Lorena Martins. **Estudo de diferentes aditivos para redução do odor em polímero polietileno reciclado.** 2021.

MILLICAN, Jonathan M.; AGARWAL, Seema. **Plastic pollution: a material problem?.** Macromolecules, v. 54, n. 10, p. 4455-4469, 2021.

MOSHOOB, Taofeeq D. *et al.* **Biodegradable plastic applications towards sustainability: A recent innovations in the green product.** Cleaner Engineering and Technology, v. 6, p. 100404, 2022.

NADEEM, Habibullah *et al.* **Isolation and identification of low-density polyethylene degrading novel bacterial strains.** Archives of Microbiology, v. 203, n. 9, p. 5417-5423, 2021.

NIENOV, Natália Dewes *et al.* **Estudo de reciclagem química por pirólise dos polímeros polietileno e polipropileno pelo procedimento de revisão sistemática e análise bibliométrica.** 2021.

PEREIRA, Lyne Sussuarana; GOMES, Thiago Santiago; PACHECO, Elen Beatriz Acordi Vasques. **Métodos de alocação de impactos ambientais para avaliação do ciclo de vida na reciclagem de resíduos plásticos.** Peer Review, v. 5, n. 19, p. 303- 324, 2023.

RAJVANSHI, Jayana *et al.* **Perceiving biobased plastics as an alternative and innovative solution to combat plastic pollution for a circular economy.** Science of The Total Environment, v. 874, p. 162441, 2023.

REAL, L. P. **Comportamento e desempenho de produtos plásticos, materiais poliméricos com reciclados e biocompósitos com aplicação na construção (ECOPOL)-TAREFA T2.** 3–Produtos poliméricos e compósitos de matriz plástica contendo reciclados com aplicação na construção. 2021.

REIS, Caio Cesar Vicente; DE OLIVEIRA ANDRADE, Paulo Eduardo; DE ALMEIDA DUARTE, Luis Felipe. **Confecção de telha de plástico PEAD (Polietileno de Alta Densidade) reciclado: um protótipo inicial.** Anais do Encontro Nacional de Pós-graduação, v. 6, n. 1, p. 144-148, 2022.

ROSA, Gustavo Presa. **Modelagem automática de tópicos em textos jornalísticos referentes a poluição marinha.** 2023.

ROESSING, Daniel Saraiva *et al.* **Identificação, filogenia e biodegradação de plástico LDPE por fungos lignícolas isolados do Bosque do INPA (Basidiomycota Ascomycota).** 2023.

SARGIANI, André Braga. **Reciclagem de garrafas plásticas de polietileno de alta densidade: processamento e caracterização do material reciclado, e comparação com as propriedades do material virgem.** 2020.

SILVA, Angie *et al.* **From waste to sustainable materials management: Three case studies of the transition journey.** Waste management, v. 61, p. 547-557, 2017.

SILVA, Marjorie Jasper. **Biodegradação do microplástico polietileno por fungos filamentosos de manguezal e apicum.** 2023.

VANAPALLI, Kumar Raja *et al.* **Challenges and strategies for effective plastic waste management during and post COVID-19 pandemic.** Science of the Total Environment, v. 750, p. 141514, 2021.

WILLIS, Kathryn A. *et al.* **Cleaner seas: reducing marine pollution.** Reviews in Fish Biology and Fisheries, v. 32, n. 1, p. 145-160, 2022.

YAO, Linyi *et al.* **Environmental and economic assessment of collective recycling waste plastic and reclaimed asphalt pavement into pavement construction: A case study in Hong Kong.** Journal of Cleaner Production, v. 336, p. 130405, 2022.

ZHAO, Xianhui *et al.* **Sustainable bioplastics derived from renewable natural resources for food packaging.** Matter, v. 6, n. 1, p. 97-127, 2023.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), Bolsa da FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco) Processo nº IBPG 2215-3.06/22 de V.B. Processo nº 312241/2022-4 G.M.C.T, a Universidade Católica de Pernambuco pela disponibilização dos laboratórios do CEMACBIOS-UNICAP e a Universidade de Pernambuco- UPE, pelo incentivo à pesquisa e por disponibilizar a servidora Gabriela Oliveira da Silva. Aluna de Graduação.

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Processo número 312241/2022 e ao CEMACBIOS-UNICAP pelo fornecimento de laboratórios, equipamentos, microrganismos e reagentes.



Produção de Modelo Conceitual de Solos e Águas Subterrâneas Potencialmente Contaminados por Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos

Conceptual Model Development of Soils and Groundwater Potentially Contaminated by Municipal Solid Waste Disposal

Miqueias de Castro da Silva

Universidade Federal da Fronteira Sul, Laboratório de Águas e Ecotoxicologia.

Amanda Mendonça Azambuja

Universidade Federal da Fronteira Sul, Laboratório de Águas e Ecotoxicologia.

Kauanny Schirmer Siveris

Universidade Federal da Fronteira Sul, Laboratório de Águas e Ecotoxicologia.

Kalyem Rafaela Antunes dos Santos

Universidade Federal da Fronteira Sul, Laboratório de Águas e Ecotoxicologia.

Alcione Aparecida de Almeida Alves

Universidade Federal da Fronteira Sul, Laboratório de Águas e Ecotoxicologia.

Resumo: Um dos maiores desafios para a qualidade ambiental atualmente enfrentada pela sociedade moderna não está somente na grande quantidade de resíduos sólidos gerados, mas sim na sua disposição final. Problemas decorrentes da disposição final inadequada, agravam ainda mais essa situação, pois a formação de chorume é uma das principais consequências dessa prática, este poluente contamina os solos e as águas subterrâneas por meio do seu lixiviado que penetra nas camadas mais profundas do solo. Estudos de áreas contaminadas possuem relevância quando se trata de resolver estes problemas que assolam nosso país, que ainda possui a prática do uso de lixões. Este estudo objetiva a produção de mapas conceituais a partir de dados de uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos desativado de um município da região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, quanto às suas características ambientais decorrentes das atividades passadas atuantes como local de disposição de resíduos sólidos sem nenhum comprometimento com a qualidade ambiental. O estudo teve vigência entre março e junho de 2025. O estudo extensionista se baseou em relatórios de qualidade ambiental emitidos pelo responsável legal, seguindo as etapas de avaliação preliminar, investigação confirmatória, investigação detalhada e a remediação de área degradada. Sendo a última etapa de proposta de técnica para tratamento, medida mitigadora para melhorar as condições ambientais frente às disposições legais. Os resultados foram estruturados resumidamente em modelos conceituais que permite uma visão geral de todas as etapas e medidas mitigadoras sugeridas para a área de estudo.

Palavras-chave: controle de poluição; resíduos sólidos urbanos; técnica de remediação.

Abstract: One of the greatest challenges to environmental quality currently faced by modern society is not only the large amount of solid waste produced, but also its final disposal. Problems arising from inadequate final disposal further aggravate this situation, as leachate formation is one of the main consequences of this practice. This pollutant contaminates soil and groundwater through its leachate, which penetrates the deepest layers of the soil. Studies

of contaminated areas are relevant when it comes to solving these problems that plague our country, which still practices the use of landfills. This study aims to produce conceptual maps based on data from an urban solid waste disposition area in a municipality in the northwestern region of the state of Rio Grande do Sul, regarding its environmental characteristics resulting from past activities as a solid waste disposal site without any commitment to environmental quality. The research was carried out between March and June 2025. The study was based on environmental quality reports issued by the legal representative, following the stages of preliminary assessment, confirmatory investigation, detailed investigation, and remediation of the degraded area. The last stage was a proposal for a treatment technique, a mitigating measure to improve environmental conditions by legal provisions. The results were summarized in conceptual models that provide an overview of all stages and mitigation measures suggested for the study area.

Keywords: municipal solid waste; contaminates soil; remediation technique.

INTRODUÇÃO

Em 2023, cerca de 31,9% das cidades do Brasil ainda recorriam a lixões para descartar resíduos sólidos urbanos (RSU), método considerado o menos adequado ambientalmente. Naquele mesmo ano, aproximadamente 28,6% dos municípios utilizavam aterros sanitários, enquanto 18,7% optavam por aterros controlados para o tratamento dos resíduos sólidos (IBGE, 2023).

Para os municípios estarem adequados com às exigências de qualidade ambiental quanto a disposição final de resíduos sólidos urbanos, no que preconiza a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) pela Lei nº 12.305 de 2010, que exigiu a uso de aterros sanitários como uma solução de adequação ambientalmente correta quanto a esta prática bem como a extinção de lixões, além da promoção a recuperação de áreas degradadas no país (Brasil, 2010).

Mas antes mesmo da PNRS existir a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 420 de dezembro de 2009, tratou da valores norteadores para contaminantes acometidos no solo, além de diretrizes para o gerenciamento e medidas em áreas contaminadas devido a presença de certos contaminantes preconizados na mesma. A resolução exigiu uma avaliação preliminar das áreas como um meio de obtenção de todas as informações pertinentes da área ao passivo ambiental, para a identificação e caracterização da pluma de contaminação (CONAMA, 2009).

No Rio Grande do Sul, a Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler (FEPAM) é o órgão responsável por coordenar e orientar as ações de recuperação de áreas degradadas. O processo seguiu etapas bem definidas, começando por uma avaliação inicial do local, seguida de investigações mais aprofundadas que confirmou e detalhou os impactos ambientais. Por fim, foram desenvolvidos projetos específicos para a remediação dessas áreas, com foco especial nos locais destinados à disposição de resíduos sólidos urbanos. Dessa forma, a FEPAM estabeleceu as diretrizes necessárias para garantir a recuperação ambiental de maneira eficiente e sustentável (Fepam, 2017).

A Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009, nomeou a elaboração de modelos conceituais que foram realizados ao final de cada fase de investigação ambiental, tanto na avaliação preliminar, na investigação confirmatória ou na etapa detalhada. Essa abordagem permitiu consolidar todos os dados coletados, organizando as informações de maneira clara e facilitando a análise dos resultados. Dessa forma, foi possível ter uma visão mais completa e precisa das condições da área avaliada, garantindo uma interpretação mais fiel dos relatórios técnicos (CONAMA, 2009).

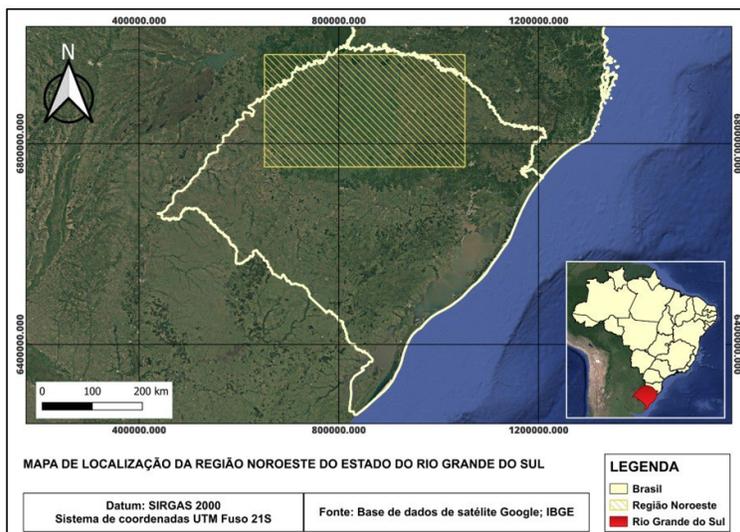
Neste sentido, o objetivo geral deste estudo foi produzir modelos conceituais de solos e águas subterrâneas potencialmente contaminados em áreas à disposição de resíduos sólidos urbanos conforme o preconizado pela Resolução CONAMA nº 420/2009, cada modelo perpassou pelos resultados adquiridos em cada etapa da área de disposição de resíduos sólidos de um município da região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, e ao final uma proposta de técnica de remediação para a recuperação da qualidade ambiental.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

A área compreendida está localizada em um município da região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (figura 1), região composta por 216 municípios, de economia diversificada que vai desde a produção leiteira a indústria de aves e suínos, além das produções agrícolas diversa, com destaque para as culturas de soja, milho e trigo (Olade; Raas, 2017, IBGE, 2017).

Figura 1 - Mapa de localização da região noroeste do RS.



Fonte: elaborado pelos autores, 2025.

Fases Vinculadas a Produção dos Modelos Conceituais

De acordo com Resolução CONAMA nº 420/2009, de 28 de dezembro de 2009 as fases da licença única são: avaliação preliminar, investigação confirmatória, investigação detalhada e projeto de remediação de área degradada. Na etapa de avaliação preliminar ocorre o levantamento de todos os indícios e evidências possíveis do local suspeito de contaminação. Na etapa de investigação confirmatória objetivou a comprovação da presença da contaminação com base nos dados levantados na fase anterior (Fepam, 2017).

Por fim, na etapa de investigação detalhada o aprofundamento da análise da contaminação para compreender sua origem, extensão e comportamento no ambiente. Mapeando desta forma, a pluma de contaminação, para fins de descartar ou confirmar a presença de substâncias, para posteriormente definir planos de remediação eficazes. Todas as etapas possuíam como produto final em detalhe um modelo conceitual (CETESB, 2025), respectivo a etapa.

Proposição de Técnica de Remediação para a Área Desativada de Deposição de Resíduos Sólidos

Para a área de estudo a estratégia para remediação mais apropriada deve ser a atenuação natural monitorada (ANM) está sendo um processo presente em aterros sanitários no qual os contaminantes oriundos do chorume passaram por uma redução gradativa ao longo do tempo através de processos físicos, químicos, e biológicos, decorrentes de biodegradação, diluição, adsorção, reações redox que ocorreram sem intervenções diretas (Helene; Moreira; Bovi, 2020).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação Preliminar

A fase inicial da pesquisa consistiu em um levantamento de informações sobre a área em análise. Por meio de documentos oficiais fornecidos pela prefeitura municipal, foi possível obter dados essenciais para a caracterização ambiental do local. Esses registros abrangeram desde medidas legais aplicadas à área até suas particularidades geográficas, aspectos hidrogeológicos relevantes e a composição dos resíduos sólidos urbanos depositados no local conforme solicitado pela Fepam (2017).

Esta etapa documental constituiu a base fundamental para o desenvolvimento subsequente do estudo, permitindo uma compreensão abrangente das condições ambientais pré-existentes e fornecendo subsídios técnicos indispensáveis para as fases de investigação que se seguiram. A sistematização dessas informações primárias mostrou-se crucial para o embasamento científico de todo o trabalho exatamente como exige a CETESB (2025).

Na avaliação preliminar houve a constatação da contaminação pela disposição de RSU no solo, em consequência do lixiviado. Por meio de dados pré-existentes da área de estudo foi possível caracterizar a célula de disposição, além das características da composição dos resíduos sólidos depositados no aterro, permitindo descrição do passivo ambiental (CONAMA, 2009).

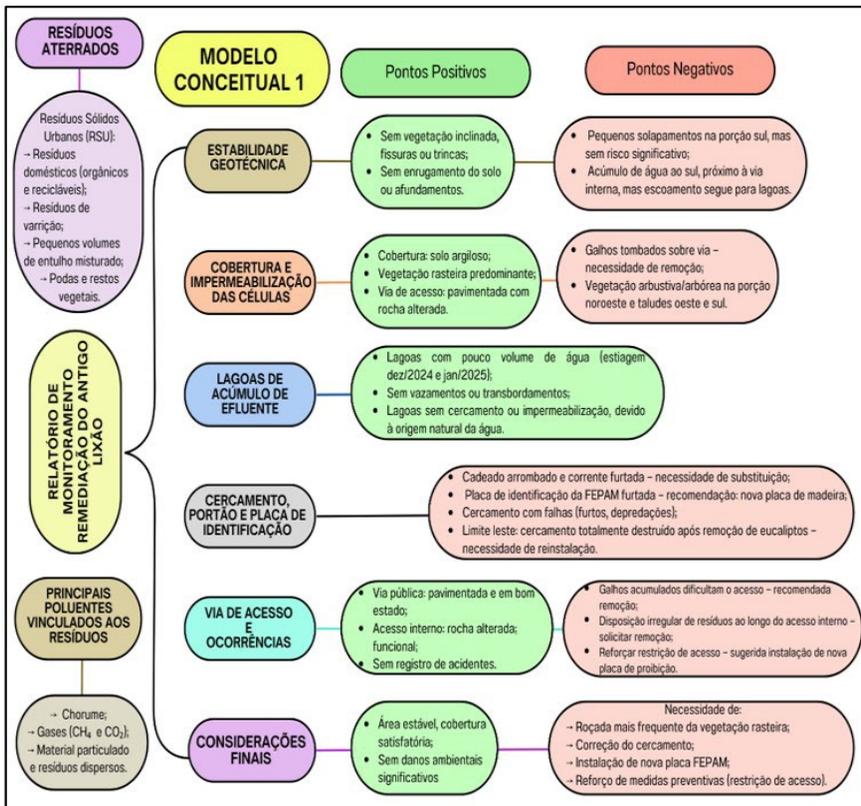
Estudos preliminares confirmaram a contaminação do solo devido ao descarte inadequado de RSU em um antigo lixão. Como consequência, verificou-se a infiltração de lixiviado nas águas subterrâneas, comprometendo a qualidade ambiental da região. Com base em dados históricos da área, foi possível identificar a extensão da célula de disposição de resíduos, bem como a composição dos materiais depositados no local.

Conforme estabelecido pela Conama 420/2009 e pela Diretriz Técnica nº 07/2017 da FEPAM, tais evidências classificam a área como passivo ambiental, demandando intervenções urgentes. A compreensão detalhada da dinâmica da contaminação foi fundamental para dimensionar estratégias de remediação eficazes, assegurando não apenas a reabilitação do ecossistema, mas também a proteção dos recursos hídricos contra danos irreversíveis, como descreve o estudo de Kühn *et al.* (2024).

Modelo Conceitual 1

Este modelo conceitual 1 (figura 2) não apenas sintetiza os achados da investigação preliminar, mas também serviu como base técnica para as etapas posteriores, principalmente a investigação confirmatória, garantindo que as ações futuras sejam eficientes e ambientalmente sustentáveis. A adoção de tais medidas foi imprescindível para assegurar a proteção dos ecossistemas afetados e a conformidade regulatória do projeto perante os órgãos fiscalizadores.

Figura 2 - Modelo conceitual 1.



Fonte: elaborado pelos autores, 2025.

Conforme pode ser observado no Modelo Conceitual 1, este contou com um local de resíduos aterrados e mostra uma avaliação dividida em pontos positivos e negativos, onde os pontos positivos na estabilidade geotécnica foram sem vegetação inclinada, fissuras ou trincas e os negativos foram acúmulo de água, próximo a via interna, mas escoamento segue para as lagoas. Na cobertura e impermeabilização das células os pontos positivos foram cobertura solo argiloso, vegetação rasteira predominante e os negativos galhos tombados sobre a via, na lagoa de acúmulo de efluente os pontos positivos que ela está sem vazamento ou transbordamentos. Referente ao cercamento, portão e placa de identificação só tem pontos negativos pois a corrente e cadeado foram furtados e a placa também. Na via de acesso e ocorrências os pontos positivos foram que ela é uma via pública, pavimentada e em bom estado e os pontos negativos são galhos acumulados que dificultam o acesso e as considerações finais positivas são que a área é estável e sem danos ambientais significativos e os pontos negativos é preciso uma correção no cercamento e instalar uma nova placa de identificação.

A elaboração do Modelo Conceitual 1, conforme normas CETESB é uma representação geral das hipóteses de liberação de materiais ou substâncias a partir das fontes de contaminação localizadas na Área com Potencial de Contaminação (AP) e dos caminhos de exposição que essas podem percorrer nos compartimentos do meio ambiente até atingirem os bens a proteger (CETESB, 2025).

Modelo Conceitual 2

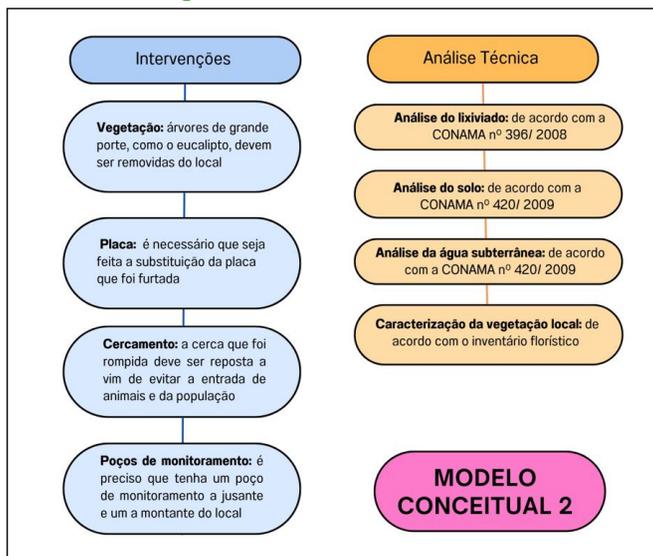
Identificado possível contaminação no solo conforme descrito no modelo conceitual 1, após seguiu para a elaboração do modelo conceitual 2. A presença de resíduos sólidos enterrados configurou a principal fonte de contaminação, com potencial para gerar lixiviado e comprometeu a qualidade do solo e da água subterrânea. A migração de poluentes ocorreu tanto por infiltração no subsolo quanto por escoamento superficial, exigindo monitoramento sistemático. Poços de monitoramento posicionados a montante e jusante do local foram fundamentais para avaliar a dispersão de contaminantes, conforme estabelecido pela CONAMA nº 396/2008 (Madeira, Gonçalves; Almeida, 2022).

O solo, por sua vez, requer análise específica para identificar metais pesados e compostos orgânicos, seguindo os parâmetros da CONAMA nº 420/2009. A vegetação local, incluindo espécies como eucalyptus, deve ser caracterizada por meio de inventário florístico, uma vez que sua presença pode indicar alterações no ecossistema ou até mesmo interferir na estabilidade do terreno, estudos mostraram correlações entre concentrações de metais pesados no solo e espécies vegetais, indicando potenciais riscos de bioacumulação (Mendonza Hernández *et al.*, 2016).

Quanto às intervenções imediatas, destacam-se a remoção de árvores de grande porte, a reposição de cercas danificadas e a reinstalação de placas de sinalização (FEPAM, 2009). Essas medidas visam não apenas conter o acesso de pessoas e animais ao local, mas também prevenir a dispersão de materiais contaminados. Conforme o Manual do Saneamento da FUNASA, no item 6.14.7.1, onde consta sobre o controle operacional, no local de disposição de resíduo é necessário o isolamento da área com cerca ou muro (FUNASA, 2019).

A análise técnica deve priorizar a segurança da população do entorno e a preservação dos recursos naturais, integrando dados ambientais e legais para embasar decisões futuras. A consolidação dessas informações estão contidas no Modelo Conceitual 2 (figura 3) e permite avançar para etapas subsequentes, como a remediação ou o monitoramento de longo prazo, sempre com base em evidências científicas e normativas.

Figura 3 - Modelo conceitual 2.



Fonte: elaborado pelos autores, 2025.

Conforme pode ser observado no Modelo Conceitual 2, este contou com a divisão de intervenções e análise técnica. A intervenção fala sobre a vegetação que tem árvores de grande porte e devem ser removidas do local, sobre a placa tem que ser feita uma substituição pois a que tinha foi furtada, o cercamento a cerca que tinha foi rompida e deve ser reposta a fim de evitar a entrada de animais e população e os poços de monitoramento é preciso que tenha mais um poço a jusante e um a montante do local. E a análise técnica, fala da análise do lixiviado de acordo com a CONAMA nº 396/2008, análise do solo, da água subterrânea de acordo com a CONAMA nº 420/2009 e a caracterização da vegetação local de acordo com o inventário florístico.

A elaboração do Modelo Conceitual 2, conforme normas CETESB é uma atualização do primeiro modelo conceitual da área, realizada com base nos resultados obtidos na etapa de Investigação Confirmatória.

Sua concepção busca representar, de forma geral, as fontes de contaminação potenciais ou primárias cuja existência foi confirmada, assim como os compartimentos do meio ambiente onde foi constatada contaminação. Também devem ser registrados no modelo conceitual 2 as fontes de contaminação, os compartimentos do meio ambiente e os bens a proteger que necessitam investigações na etapa de Investigação Detalhada para caracterizar os caminhos de exposição potenciais ou reais (CETESB, 2025).

Modelo Conceitual 3

Os resultados deste diagnóstico detalhada evidenciam a urgência na implementação de medidas mitigadoras, as quais devem estar estritamente

alinhadas com os parâmetros legais estabelecidos pela atual legislação ambiental. Como produto final desta etapa, obteve-se o Modelo Conceitual 3, devidamente validado conforme os critérios técnicos definidos pela CETESB (2025).

A cobertura vegetal local apresenta dupla relevância ecológica: atua como bioindicador sensível e receptor vulnerável. Embora a regeneração natural indique processos espontâneos de recuperação, alterações como compactação do solo e contaminação por metais pesados podem inibir a sucessão ecológica e desestabilizar o ecossistema. Conforme a Resolução CONAMA n° 420/2009, a vegetação serve como importante ferramenta de monitoramento, auxiliando na identificação de contaminantes e na avaliação da qualidade ambiental (Oliveira *et al.*, 2013).

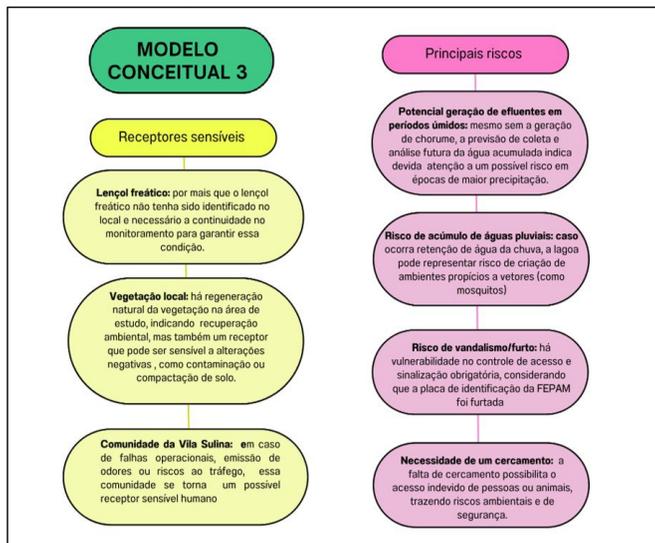
A proximidade de moradores à área de estudo demanda especial atenção aos riscos de exposição humana a contaminantes via ar, água superficial e outros vetores. A potencial emissão de odores, atração de vetores e impactos na mobilidade urbana caracterizam essa comunidade como receptor humano vulnerável. Conforme o método de avaliação de risco à saúde (ARSH), padrão internacional adotado no Brasil, torna-se imperativa a avaliação quantitativa de riscos à saúde pública, assegurando a proteção desta população (MMA, 2010).

A etapa destaca a formação de lagoas pluviais em depressões do terreno como risco ambiental relevante, podendo favorecer a proliferação de vetores durante estações chuvosas. Apesar da ausência de chorume detectado, recomenda-se análise periódica dessas águas paradas devido ao risco potencial de lixiviação superficial. Essa abordagem preventiva, respaldada por estudos geofísicos em aterros, enfatiza a necessidade de monitoramento contínuo da zona não saturada para antecipar rotas de contaminação, alinhando-se aos princípios de precaução na gestão ambiental (Lago, 2004).

A área apresenta fragilidades críticas, como falta de cercamento e remoção de placas de identificação, agravando riscos ambientais e de segurança pública. Essas deficiências facilitam acesso não autorizado, elevando a probabilidade de vandalismo e exposição acidental a material potencialmente contaminado. A implementação imediata de cercas, sinalização e barreiras físicas torna-se imperativa, conforme diretrizes da CETESB e manuais técnicos, visando assegurar o controle adequado do local e mitigar potenciais danos (Marques *et al.*, 2021).

Portanto, o Modelo Conceitual 3 (figura 4) oferece uma representação fiel da situação da área em investigação detalhada, associando elementos técnicos e precauções regulatórias. Sua elaboração robusta, ancorada em dados de campo, observações ambientais e marcos normativos, permite subsidiar a tomada de decisão quanto à necessidade de remediação, contenção ou monitoramento contínuo, sempre priorizando a proteção da saúde humana e a integridade ambiental da região.

Figura 4 - Modelo conceitual 3.



Fonte: elaborado pelos autores, 2025.

A construção do Modelo Conceitual 3 representa uma etapa crucial na investigação ambiental detalhada, integrando dados sobre fontes de contaminação, vias de dispersão e receptores potenciais. Embora análises não tenham detectado lençol freático no local, recomenda-se seu monitoramento preventivo através de poços de observação, conforme normas CETESB e ABNT NBR 15.495-1. Esta abordagem permite antecipar a migração vertical de contaminantes, assegurando proteção aos recursos hídricos subterrâneos (Riyis *et al.*, 2019).

Técnica de remediação

A escolha como estratégia da ANM está intrinsecamente relacionada a condições físicas da área de estudo, tais como a ausência de riscos imediatos que podem comprometer a saúde humana e o meio ambiente que permeiam a área pretendida. A área deve mostrar através de estudos que sejam capaz de cumprir com o propósito da remediação (Gadiparthi, 2020). É importante o uso de indicadores *in situ*, pois estes podem medir espécies redox e residual de degradação, são recomendadas para demonstrar a diminuição da pluma de contaminação (Baun *et al.*, 2003).

É importante também avaliar a necessidade de bioestimulação que precisa da adição de nutrientes essenciais ou modificadores ambientais para a aceleração do desenvolvimento microbiológico, nutrientes como nitrogênio, fósforo e carbono. São estimulantes para os microrganismos que em consequência degradam mais rápido os contaminantes, com resultados superiores se comparados a atenuação natural (Er *et al.*, 2018). Para um aproveitamento eficiente da bioestimulação é preciso atentar-se a alguns fatores da área pretendida, estudos prévios sobre o topo

dos microrganismos presentes, além das características do contaminante como composição e nível de toxicidade (Megharaj *et al.*, 2011).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio deste estudo foi possível elaborar modelos conceituais de solos e águas subterrâneas em áreas impactadas pela disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos, seguindo as diretrizes da Resolução CONAMA nº 420/2009. A pesquisa foi desenvolvida em um município da região noroeste do Rio Grande do Sul, onde foram aplicadas as etapas metodológicas fundamentais: Avaliação Preliminar, Investigação Confirmatória, Investigação Detalhada e Proposta de Remediação.

Os modelos conceituais produzidos representam uma ferramenta essencial para compreender a dinâmica da contaminação, permitindo o direcionamento adequado das ações de remediação. Cada etapa do estudo contribuiu para a caracterização precisa do passivo ambiental, culminando na seleção de uma técnica de remediação eficaz para a recuperação da qualidade do solo e dos recursos hídricos.

A aplicação dessa metodologia não apenas atende às exigências legais, mas também assegura o controle da poluição e a restauração ambiental, reforçando a importância de um planejamento técnico rigoroso em áreas contaminadas. Os resultados obtidos demonstram que a integração entre diagnóstico e intervenção é fundamental para a gestão sustentável de impactos causados por resíduos urbanos.

REFERÊNCIAS

BAUN, Anders; REITZEL, Lotte A.; LEDIN, Anna; *et al.* **Natural attenuation of xenobiotic organic compounds in a landfill leachate plume (Vejen, Denmark).** Journal of contaminant hydrology, v. 65, n. 3–4, p. 269–291, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-7722\(03\)00004-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-7722(03)00004-4).

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009.** Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Diário Oficial da União, Brasília, 30 dez. 2009.

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 República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2025). **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas.** Disponível em: <https://cetesb.sp.gov>.

br/areas-contaminadas/documentacao/manual-de-gerenciamento-de-areas-contaminadas/informacoes-gerais/apresentacao-2/. Acesso em: 04 jul. 2025.

ER, X. Y.; SEOW, T. W.; LIM, C. K.; IBRAHIM, Z. **Natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation of landfill leachate management**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, [s. l.], v. 140, p. 012034, abr. 2018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/140/1/012034>.

FEPAM. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler. **Diretriz técnica nº 07/2017**. Diretriz técnica para atividade de remediação de áreas degradadas pela disposição de resíduos sólidos urbanos, resíduos da construção civil e resíduos dos serviços de saúde. Porto Alegre, 2017. Disponível em: <https://ww3.fepam.rs.gov.br/CENTRAL/DIRETRIZES/DT-007-2017.PDF>. Acesso em: 30 jun. 2025.

FEPAM. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler. **Portaria n.º 17/2009**. Estabelece a obrigatoriedade da colocação de placas de identificação da Licença Ambiental para empreendimentos de porte médio, grande e excepcional Porto Alegre, 2009. Disponível em: <https://www.fepam.rs.gov.br/legislacao-ambiental>. Acesso em: 07 jul. 2025.

FUNASA. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de saneamento**. 5. ed. p. 324. Brasília: Funasa, 2019. Disponível em: <https://www.funasa.gov.br/biblioteca-eletronica/publicacoes/engenharia-de-saude-publica>. Acesso em: 07 jul. 25.

GADIPARTHI, Srinivasa Rao. **Assessment of monitored natural attenuation as a remedial option at Savannah River site's sanitary landfill using the biochlor model**. Florida International University, 2020. <https://dx.doi.org/10.25148/etd.FI15101469>.

HELENE, Livia Portes Innocenti; MOREIRA, César Augusto; BOVI, Renata Cristina. **Identification of leachate infiltration and its flow pathway in landfill by means of electrical resistivity tomography (ERT)**. Environmental monitoring and assessment, v. 192, n. 4, p. 249, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-020-8206-5>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Agropecuário 2017. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). MUNIC 2023. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/41994-munic-2023-31-9-dos-municipios-brasileiros-ainda-despejam-residuos-solidos-em-lixoes>. Acesso em: 12 de jun. 2025.

KÜHN, V. O. *et al.* **Review and future perspectives on soil and groundwater inorganic contamination by non-sanitary landfills in Latin America**. International journal of environmental science and technology: IJEST, [s. l.], v. 22, n. 8, p. 7271–7296, 2025.

LAGO, Alexandre Lisboa. **Aplicação integrada de métodos geofísicos em área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP**. Revista Brasileira de Geofísica, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 272–272, 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-261x2004000300006>.

MADEIRA, Geraldo Ramos; GONÇALVES, José Augusto Costa; ALMEIDA, Milena Stefany Lage. **A contaminação das águas subterrâneas do aterro sanitário de Itabira (MG)**. Revista Brasileira de Geografia Física, [S. l.], v. 15, n. 4, p. 1902–1925, 2022. DOI: 10.26848/rbgf.v15.4.p1902-1925. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/253422>. Acesso em: 6 jul. 2025

MARQUES, Rosângela Francisca de Paula Vitor; SILVA, Antônio Marciano da; RODRIGUES, Luciano dos Santos; MENDES, Luana Ferreira; OLIVEIRA, Alisson Souza de. **Impactos da disposição de resíduos sólidos urbanos no solo em municípios de Minas Gerais – Brasil**. Revista Brasileira de Geografia Física, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 1382–1392, 2021. DOI: 10.26848/rbgf.v14.3.p1382-1392. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/245105>. Acesso em: 6 jul. 2025.

MEGHARAJ, Mallavarapu; RAMAKRISHNAN, Balasubramanian; VENKATESWARLU, Kadiyala; *et al.* **Bioremediation approaches for organic pollutants: a critical perspective**. Environment international, v. 37, n. 8, p. 1362–1375, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2011.06.003>.

MENDOZA HERNÁNDEZ, José Carlos *et al.* **Análisis de metales pesados en parque estatal “Flor del Bosque”**. Ra Ximhai, [s. l.], p. 43–56, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.35197/rx.12.01.e1.2016.03.jm>.

OLALDE, Alicia Ruiz; HAAS, Jaqueline Mallmann. **Estrutura agrária e desenvolvimento humano: uma análise comparativa das mesorregiões Sudoeste e Noroeste do Rio Grande do Sul**. Ensaios FEE, Porto Alegre, v. 37, n. 4, p. 975-1004, mar. 2017. Disponível em: <https://revistas.planejamento.rs.gov.br/index.php/ensaios/article/view/3437/3837>. Acesso em: 30 jun. 2025.

RIYIS, Marcos Tanaka *et al.* **A importância da amostragem de solo de perfil completo (ASPC) para a investigação de alta resolução em áreas contaminadas**. Águas Subterrâneas, [s. l.], v. 33, n. 4, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v33i4.29735>.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Universidade Federal da Fronteira Sul por possibilitar a realização da ação de extensão vinculada à disciplina de Controle de Poluição dos Solos do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária.



Tratamento de Águas Residuais por Wetlands Comparando os Sistemas de Leitos Construídos, Sistema Automatizado e Wetland Compacta

Wastewater Treatment Using Wetlands: A Comparison of Constructed Beds, Automated System, and Compact Wetland

Leidson Ramos de Sousa

Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais – Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP). ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8358-9821>

Adriana Ferreira de Souza

Biomoléculas e Superfície de Materiais-CEMACBIOS,MCTI / Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9527-22>

Sergio Carvalho de Paiva

Universidade Federal Rural de Pernambuco(UFRPE). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0934-7102>

Eduardo Antônio Maia Lins

Ambiental (Engenharia) Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP).: Recife, PE, . ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9108-4179>

Valderice Pereira Alves Baydum

Analista Saneamento (Qualidade) Compesa: Recife, Pernambuco,ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6536-6028>

Galba Maria de Campos Takaki

Biomoléculas e Superfície de Materiais-CEMACBIOS,MCTI/ / Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP). Recife, PE, ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-0519-0849>

Resumo: O tratamento de águas residuais é um desafio ambiental e sanitário que exige soluções eficientes e sustentáveis. Investigações foram realizadas comparando os métodos Leitos Construídos (Wetlands Construídas), que utilizam processos naturais de fitorremediação, e um Sistema Autônomo Automatizado, baseado em sensores e processos físico-químicos. Além disso, atividades experimentais foram realizadas utilizando Wetland Compacta, composta por filtros de areia, brita, plantas aquáticas e micro-organismos. As atividades avaliadas foram: parâmetros físico-químicos da água, como pH, turbidez, condutividade, dureza, salinidade e cor, além de comparar a eficiência dos sistemas. Os resultados indicaram que os Leitos Construídos e a Wetland Compacta constituem alternativas sustentáveis e de baixo custo. No entanto, o sistema autônomo oferece maior controle dos parâmetros, porém com elevado custo e necessidade de manutenção especializada. Os estudos realizados contribuíram para a integração entre Wetlands construídas e automatizadas favorecendo a otimização e a eficiência dos sistemas, combinando sustentabilidade com precisão no tratamento de efluentes.

Palavras-chave: wetlands construídas; biorremediação; sistemas autônomos; parâmetros físico-químicos; tratamento de águas residuais.

Abstract: Wastewater treatment is an environmental and sanitary challenge that requires efficient and sustainable solutions. This study compares two distinct methods: Constructed

Wetlands, which rely on natural phytoremediation processes, and an Autonomous Automated System, based on sensors and physicochemical processes. Additionally, an experimental compact wetland was analyzed, consisting of sand and gravel filters, aquatic plants, and microorganisms. Physicochemical parameters of the water, such as pH, turbidity, conductivity, hardness, salinity, and color, were evaluated to compare the efficiency of the systems. The results indicated that both the Constructed Wetlands and the compact wetland are sustainable and low-cost alternatives, while the autonomous system offers greater control over the parameters but requires higher costs and specialized maintenance. The study suggests that integrating constructed wetlands with automation may optimize system efficiency by combining sustainability with precision in wastewater treatment.

Keywords: constructed wetlands; phytoremediation; autonomous systems; physicochemical parameters; wastewater treatment.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por água potável e a intensificação da poluição hídrica tornam essenciais a busca por métodos eficientes e sustentáveis para o tratamento de águas residuais. Diferentes abordagens têm sido desenvolvidas, variando desde sistemas naturais, como os Leitos Construídos (Wetlands Construídas), até tecnologias automatizadas, como os sistemas autônomos de tratamento de água. Cada um desses métodos possui características específicas que influenciam sua eficiência, custo e aplicabilidade.

Os Leitos Construídos utilizam processos naturais de fitoremediação, nos quais plantas aquáticas e microrganismos atuam na remoção de contaminantes, promovendo uma solução ecológica e de baixo custo para o tratamento de efluentes domésticos e industriais (Kziozek e Lorscheider, 2024). No entanto, a eficiência desses sistemas pode ser influenciada por fatores ambientais, como temperatura, variação climática e composição dos efluentes.

Por outro lado, os sistemas autônomos empregam processos físico-químicos e automação para purificar a água, permitindo um maior controle sobre a qualidade do tratamento (Santos *et al.*, 2023). Esses sistemas podem alcançar níveis elevados de remoção de contaminantes, mas apresentam desafios relacionados ao custo de implementação e à necessidade de manutenção especializada.

Diante disso, este estudo tem como objetivo comparar a eficiência dos Leitos Construídos e dos sistemas autônomos no tratamento de águas residuais, analisando suas vantagens, desvantagens e aplicabilidade em diferentes contextos. Além disso, busca-se relacionar essas abordagens com os resultados obtidos em experimentos próprios, que avaliam o impacto de plantas e microrganismos nos parâmetros físico-químicos da água tratada. A comparação entre esses métodos contribui para a escolha de alternativas mais eficazes e sustentáveis para o tratamento descentralizado de efluentes.

Tratamento de Águas Residuais: Desafios e Alternativas

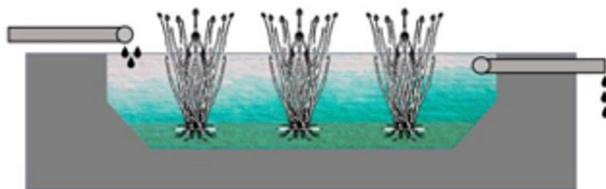
A poluição hídrica causada pelo descarte inadequado de efluentes domésticos e industriais representa um dos principais desafios ambientais da atualidade. O tratamento adequado dessas águas é essencial para minimizar impactos ambientais e promover a reutilização sustentável do recurso. Entre as alternativas existentes, destacam-se os Leitos Construídos (Wetlands Construídas), wetland compacta e os sistemas autônomos de tratamento, cada um com características próprias de funcionamento, eficiência e aplicabilidade, o sistema de wetland construída de lâmina livre que por seu sistema promove o tratamento de água residual por macrófitas no espelho d'água. O sistema de wetland compacta é composto por um filtro formado com areia, cascalho e brita associado com plantas e micro-organismos para ter melhor eficiência no tratamento de águas residuais, não precisando de muito espaço para ser instalada a wetland compacta é de fácil manutenção. O sistema autônomo é um conjunto de três etapas interligadas por tubos, cada etapa com sistema de decantação e separador de misturas por meio da gravidade de modo que a água tratada fique livres de impurezas.

Leitos Construídos (Wetlands Construídas) e Fitorremediação

Os Leitos Construídos são sistemas artificiais projetados para simular processos naturais de purificação da água, utilizando plantas e micro-organismos para remover contaminantes. Esses sistemas são considerados soluções de baixo custo e ecologicamente corretas, sendo amplamente empregados no tratamento de efluentes domésticos, industriais e agrícolas (Kziozek e Lorscheider, 2024).

A eficiência dos Leitos Construídos está diretamente ligada à ação das plantas aquáticas, que desempenham um papel fundamental na absorção de nutrientes, estabilização da matéria orgânica e remoção de metais pesados. Além disso, os micro-organismos presentes no sistema atuam na degradação de compostos orgânicos, contribuindo para a purificação da água como mostra a imagem abaixo.

Figura 1 - Representação de lâmina livre com macrófitas emergentes.



Fonte: Macário et al., 2018.

Embora sejam eficientes, os Leitos Construídos apresentam algumas limitações, como a impossibilidade de padronização dos resultados devido à influência de fatores ambientais, a produção excessiva de biomassa e a suscetibilidade a variações climáticas (Kziozek e Lorscheider, 2024). Portanto, estudos como o seu são fundamentais para compreender o comportamento das plantas em diferentes condições e otimizar a eficiência desses sistemas.

Sistemas Autônomos de Tratamento de Águas Residuais

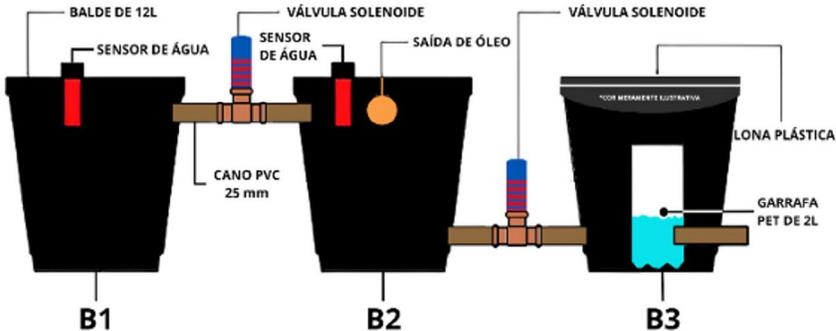
Os sistemas autônomos de tratamento de água utilizam uma abordagem tecnológica e automatizada, combinando processos físico-químicos com sensores eletrônicos para purificação eficiente (Santos *et al.*, 2023). Esses sistemas são especialmente úteis em regiões onde a escassez de água exige métodos avançados de reutilização, como observado no semiárido brasileiro.

O estudo de Santos *et al.* (2023) apresentou um protótipo de tratamento autônomo, que opera em três fases principais:

- Separação de sólidos e resíduos lipídicos por meio de decantação e sifonamento.
- Filtragem e remoção de impurezas utilizando sensores e válvulas solenoides.
- Ciclo biogeoquímico da água, no qual a exposição ao sol permite a evaporação e posterior condensação da água, tornando-a potável.

A principal vantagem desse sistema é a precisão no controle dos parâmetros de qualidade da água, garantindo uma remoção eficiente de contaminantes. Além disso, o uso de sensores e automação reduz a necessidade de manutenção constante. No entanto, esses sistemas podem apresentar custos elevados de implementação e dependem de infraestrutura tecnológica para funcionamento contínuo, a imagem abaixo mostra o funcionamento.

Figura 2 - Esquema do protótipo autônomo.



Fonte: Santos *et al.* 2023.

Wetland Compacta

O tratamento de águas residuais é essencial para a preservação ambiental e a reutilização segura dos recursos hídricos. As wetlands compacta surgem como uma alternativa eficiente e sustentável, combinando processos naturais de filtração, absorção e degradação de poluentes a imagem abaixo mostra a wetland compacta.

Figura 3 – Wetland Compacta.

Fonte: autoria própria, 2025.

A presente tecnologia propõe um sistema inovador que integra substratos filtrantes, plantas aquáticas e micro-organismos benéficos para otimizar a remoção de contaminantes químicos e biológicos. A seleção criteriosa de espécies vegetais e micro-organismos potencializa a eficiência do sistema, reduzindo parâmetros como pH, cor, turbidez, condutividade, salinidade, dureza, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Oxigênio Dissolvido (OD). Além disso, o uso de micro-organismos específicos favorece a degradação de compostos orgânicos e o controle microbiológico.

Comparação Entre os Sistemas

Ao comparar os Leitos Construídos com os sistemas autônomos, observa-se que ambos possuem vantagens e desvantagens. Enquanto os Leitos Construídos se destacam pela simplicidade, baixo custo e integração com o meio ambiente, os sistemas autônomos oferecem maior controle e eficiência na remoção de poluentes, mas requerem maior investimento inicial e manutenção técnica especializada.

Ao avaliar a influência de diferentes espécies vegetais e micro-organismos na qualidade da água residual tratada. A introdução de *Trichoderma*, *Bacillus cereus* e *Bacillus subtilis* no sistema podem representar um diferencial na eficiência da fitorremediação, tornando os Leitos Construídos ainda mais eficazes no tratamento de águas residuais.

Perspectivas para o Tratamento Descentralizado de Efluentes

Diante da necessidade de soluções sustentáveis, é fundamental considerar a integração entre métodos naturais e tecnológicos. A combinação de Leitos Construídos com sensores para monitoramento da qualidade da água pode resultar em sistemas híbridos, unindo a capacidade de purificação biológica com o controle e precisão da automação.

Além disso, a regulamentação desses sistemas no Brasil ainda é um desafio. Segundo Kziozek e Lorscheider (2024), não há uma norma específica para dimensionamento dos Leitos Construídos, o que dificulta sua implementação em larga escala. Portanto, futuras pesquisas devem focar na otimização desses sistemas e no desenvolvimento de diretrizes para seu uso seguro e eficiente.

Estrutura do Estudo

Este estudo tem como objetivo comparar dois sistemas de tratamento de águas residuais — Leitos Construídos (Wetlands Construídas) e um Sistema Autônomo Automatizado — e relacioná-los com os resultados obtidos em um experimento próprio de wetland compacta. Para isso, foram analisados dois artigos científicos que abordam essas tecnologias e seus impactos no tratamento de efluentes.

Além da revisão bibliográfica, foi realizada uma investigação experimental utilizando um sistema de wetland moderno, composto por filtro de areia, brita e plantas aquáticas, para avaliar sua eficiência na remoção de contaminantes e comparar os resultados com os estudos analisados.

Seleção e Análise dos Artigos Científicos

- Vantagens e desvantagens da utilização de Leitos Construídos para fitorremediação” (Kziozek e Lorscheider, 2024) – Explora a aplicação dos wetlands construídos no tratamento de efluentes, destacando as vantagens e desvantagens do sistema.
- “Sistema Autônomo para Tratamento de Água Residual Contaminada” (Santos *et al.*, 2023) – Apresenta um sistema automatizado que combina processos físico-químicos e sensores para purificação de águas residuais.
- Tratamento de águas residuais de pôr filtro natural em associação entre plantas e micro-organismo em wetland compacta (Kziozek e Lorscheider, 2024).

Comparação entre os Sistemas de Tratamento

Os resultados obtidos no experimento de wetland moderna foram comparados com as informações dos artigos analisados, considerando a eficiência na remoção de contaminantes, as vantagens e desvantagens de cada sistema e sua aplicabilidade em diferentes contextos, abaixo a tabela dos parâmetros químico-físico mostra a eficiência da wetland moderna em associação entre filtro natural, plantas e micro-organismos.

Tabela 1 - Parâmetros Químico Físico da Wetland Compacta.

| Data | Cor | pH | Dureza (mg/L) | Turbidez (NTU) | Condutividade ($\mu\text{S/cm}$) | Salinidade (ppm) |
|------------|-----|------|---------------|----------------|------------------------------------|------------------|
| 04/11/2024 | 70 | 7,01 | 250 | 29,2 | 120,6 | 60,3 |
| 02/12/2024 | 70 | 6,8 | 44 | 16,1 | 335,4 | 167,7 |
| 27/01/2025 | 60 | 6,45 | 78 | 11,14 | 607,6 | 303,8 |
| 10/02/2025 | 60 | 7,25 | 222 | 12,86 | 1348 | 674 |
| 24/02/2025 | 65 | 6,28 | 70 | 24,34 | 789,3 | 394,65 |

Fonte: autoria própria, 2025.

Os parâmetros destacam a eficácia do sistema da wetland compacta:

- Cor da água

Os valores de cor na nova tabela variam de 60 a 70. Estes são valores relativamente baixos, indicando uma boa clarificação da água e menor presença de partículas em suspensão.

- pH

O pH varia entre 6,28 e 7,25.

A maioria das medições está próxima de 7, o que indica um pH equilibrado, ideal para a maioria dos ecossistemas aquáticos. O valor mais alto foi em 10/02/2025, com 7,25, e o mais baixo foi em 24/02/2025, com 6,28.

- Dureza

A dureza variou de 44 mg/L a 250 mg/L.

Em 02/12/2024, a dureza foi a mais baixa (44 mg/L), enquanto em 04/11/2024, foi a mais alta (250 mg/L).

Valores moderados de dureza indicam uma boa presença de minerais dissolvidos sem causar problemas de incrustações ou dificuldades para a biota aquática.

- Turbidez

A turbidez variou entre 11,14 NTU e 29,2 NTU.

A turbidez mais baixa foi registrada em 27/01/2025 com 11,14 NTU, e a mais alta em 04/11/2024 com 29,2 NTU.

A turbidez mais baixa indica melhor qualidade da água, já que menos partículas estão em suspensão.

- Condutividade

A condutividade variou de 120,6 $\mu\text{S/cm}$ a 1348 $\mu\text{S/cm}$.

A condutividade mais baixa foi registrada em 04/11/2024 (120,6 $\mu\text{S/cm}$) e a mais alta em 10/02/2025 (1348 $\mu\text{S/cm}$).

O aumento da condutividade em algumas datas pode indicar maior presença de sais dissolvidos na água.

- Salinidade

A salinidade variou entre 60,3 ppm e 674 ppm.

A salinidade mais baixa foi em 04/11/2024 (60,3 ppm), e a mais alta em 10/02/2025 (674 ppm).

O aumento da salinidade pode indicar mudanças na composição da água, possivelmente relacionadas à evaporação ou adição de sais externos.

A tabela 2 mostra a eficiência do tratamento de água residual com os parâmetros físico-químico.

Tabela 2 - Parâmetros químico físico do sistema de tratamento autônomo.

| Análise físico-química das amostras de água bruta e tratada | | | | |
|--|-------------------|---------------------|---------------|-----------------|
| Parâmetros | Água Bruta | Água Tratada | VMP MS | Unidades |
| Cor aparente | 15 | 3 | 15 | Pr/L(Hansen) |
| Condutibilidade | 1500 | 2000.0 | 1 | µS/cm |
| pH | 8 | 7 | 8a9 | pH |
| Turbidez | 80 | 20 | 100 | NTU |
| Sólidos totais | 1000 | 5 | 100 | mg L-1 |
| Dureza total | 550 | 30 | 500 | mg L-1 |
| Cloretos | 200 | 100 | 250 | mg L-1.Cl-1 |
| Fluoretos | 1 | 1 | 1 | mg L-1.F-1 |
| Oxigênio dissolvido | 2 | 3 | 2a5 | mg L-1.O2 |
| Amônia | 3 | 1 | 2 | mg L-1.N-NH3 |

Fonte: Santos et al. 2023.

- Cor Aparente

A redução da cor de 15 para 3,0 indica um tratamento eficiente na remoção de compostos que causam coloração. O valor final está bem abaixo do limite permitido.

- Condutividade

A condutividade aumentou após o tratamento, ultrapassando o limite máximo permitido. Isso sugere a presença de sais dissolvidos, possivelmente devido a processos químicos no tratamento.

- pH

O pH reduziu ligeiramente, ficando dentro da faixa permitida. Essa redução pode estar relacionada a processos de neutralização no tratamento.

- Turbidez

Houve uma redução significativa na turbidez, indicando uma boa remoção de partículas em suspensão. O valor final está dentro do limite permitido.

- Sólidos Totais

Houve uma grande redução nos sólidos totais, melhorando a qualidade da água. O valor final está muito abaixo do limite permitido.

- Dureza Total

O tratamento reduziu drasticamente a dureza da água, tornando-a menos mineralizada. O valor final está bem abaixo do limite permitido, indicando um bom controle da presença de íons como cálcio e magnésio.

- Cloretos

A redução para 100 mg/L está dentro dos limites permitidos, indicando remoção parcial de sais de cloro.

- Fluoretos

A redução dos fluoretos mantém a água dentro do limite estabelecido, garantindo que não haja excesso, o que poderia ser prejudicial.

- Oxigênio Dissolvido

O aumento do oxigênio dissolvido indica uma melhora na qualidade da água, tornando-a mais adequada para a vida aquática e reduzindo condições anaeróbicas.

- Amônia

Houve uma remoção significativa da amônia, ficando bem abaixo do limite permitido, o que reduz riscos de toxicidade.

A tabela 3 mostra a comparação dos parâmetros com a eficiência de cada sistema no tratamento de água residual.

Tabela 3 – Comparação da Eficiência dos Sistemas de Tratamento.

| Parâmetro | Wetland compacta (Este estudo) | Leitos Construídos (Kziozek & Lorscheider, 2024) | Sistema Autônomo (Santos <i>et al.</i> , 2023) |
|---------------|---|---|--|
| pH | Estabilização próxima à neutralidade (6,28 e 7,25.) | Variação dependendo da planta utilizada | Controle preciso via automação |
| Turbidez | Redução significativa (>70%) | Alta remoção, mas variável conforme o meio filtrante | Remoção eficiente por filtração e sedimentação |
| Condutividade | Diminuição gradual | Pode aumentar devido à liberação de metabólitos das plantas | Controlada por processos físico-químicos |
| Dureza | Redução moderada | Pouco abordada no estudo analisado | Redução eficiente com remoção de íons |
| Salinidade | Pequena redução | Dependente das espécies vegetais utilizadas | Controle por ajuste químico |
| Cor | Remoção significativa (>80%) | Alta eficiência para compostos orgânicos | Eficiência elevada por processos químicos |

Fonte: autoria própria.

Os resultados indicam que a wetland moderna, com filtro de areia, brita e plantas aquáticas, apresentou eficiência na redução de turbidez, cor e estabilização do pH, sendo comparável aos Leitos Construídos descritos por Kziozek & Lorscheider

(2024). No entanto, o Sistema Autônomo de Santos *et al.* (2023) demonstrou maior controle sobre a condutividade e a remoção de dureza, devido ao uso de sensores e processos físico-químicos.

Desempenho das Plantas no Sistema de Wetland

A introdução de diferentes espécies vegetais no sistema de wetland influenciou diretamente a qualidade da água tratada. O Papiro-guarda-chuva (*Cyperus alternifolius*) apresentou maior crescimento e predominância no sistema, favorecendo a remoção de contaminantes e melhorando a estabilidade do pH. Por outro lado, as Helicônias (*Heliconia psittacorum* e *Heliconia rostrata*) não resistiram às condições do meio, sugerindo que essas espécies podem não ser adequadas para sistemas de tratamento de águas residuais.

Além disso, a adição de microrganismos específicos (*Trichoderma*, *Bacillus cereus* e *Bacillus subtilis*) pode ter influenciado positivamente a degradação da matéria orgânica e a remoção de poluentes. Essa abordagem, não mencionada nos artigos analisados, representa um diferencial do presente estudo, indicando que a combinação entre fitorremediação e microbiota pode potencializar a eficiência dos Leitos Construídos.

Vantagens e Desvantagens dos Sistemas

Os três sistemas analisados apresentam vantagens e desafios distintos, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação das Vantagens e Desvantagens dos Sistemas.

| Critério | Wetland Moderna (Este estudo) | Leitos Construídos (Kziozek & Lorscheider, 2024) | Sistema Autônomo (Santos <i>et al.</i> , 2023) |
|------------------------------------|--|--|---|
| Baixo custo de implantação | Sim | Sim | Não |
| Baixa necessidade de manutenção | Sim | Sim, mas depende do tipo de macrófita utilizada | Não, requer manutenção frequente |
| Sustentabilidade | Alta (uso de plantas e micro-organismos) | Alta (baseado em processos naturais) | Média (uso de componentes eletrônicos) |
| Eficiência na remoção de poluentes | Alta para matéria orgânica e turbidez | Alta para nutrientes como fósforo e nitrogênio | Alta para metais pesados e dureza |
| Controle de variáveis | Média (influência de clima e sazonalidade) | Baixa (variação na eficiência de remoção) | Alta (controle via automação) |
| Aplicabilidade em larga escala | Sim, em locais com disponibilidade de área | Sim, mas depende da regulação ambiental | Sim, desde que haja infraestrutura para automação |

Fonte: autoria própria.

Os Leitos Construídos e a wetland moderna se destacam pela sustentabilidade e baixo custo de manutenção, sendo soluções acessíveis para tratamento de efluentes em áreas descentralizadas. Entretanto, sua eficiência pode ser variável, dependendo das condições ambientais e do tipo de planta utilizada.

Por outro lado, o Sistema Autônomo se destaca pelo controle preciso dos parâmetros de qualidade da água, garantindo um tratamento altamente eficiente. No entanto, os custos mais elevados e a necessidade de manutenção especializada podem dificultar sua aplicação em comunidades de baixa renda.

Aplicabilidade e Perspectivas Futuras

Os resultados indicam que os Leitos Construídos e a wetland compacta são alternativas promissoras para o tratamento de águas residuais, especialmente em locais onde a infraestrutura de saneamento é limitada. No entanto, a falta de padronização e regulamentação específica para esses sistemas no Brasil dificulta sua implementação em larga escala (Kziozek & Lorscheider, 2024).

Uma abordagem híbrida, combinando wetlands construídas com sensores automatizados, pode ser uma solução viável para aumentar a eficiência e reduzir as limitações desses sistemas. Estudos futuros podem explorar a integração entre fitorremediação, microbiota e automação, ampliando a aplicabilidade dessas tecnologias para diferentes tipos de efluentes.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A comparação entre os Leitos Construídos (Wetlands Construídos), o Sistema Autônomo Automatizado e o sistema de wetland moderna utilizado neste estudo demonstrou que cada abordagem possui vantagens e limitações distintas, dependendo do contexto de aplicação.

Os Leitos Construídos destacam-se como uma alternativa sustentável e de baixo custo, aproveitando processos naturais para remover contaminantes de águas residuais. No entanto, sua eficiência pode ser variável, sendo influenciada por fatores ambientais e pelo tipo de vegetação utilizada. Em contrapartida, o Sistema Autônomo Automatizado mostrou-se altamente eficiente no controle dos parâmetros físico-químicos da água, garantindo maior previsibilidade na remoção de poluentes, mas com um custo mais elevado e necessidade de manutenção especializada.

O experimento realizado com a wetland moderna, composta por filtro de areia, brita e plantas aquáticas, demonstrou que a combinação entre substratos filtrantes, plantas e microrganismos pode ser uma estratégia eficaz para o tratamento de águas residuais. A introdução de Papiro-guarda-chuva (*Cyperus alternifolius*) como planta predominante e a adição de microrganismos (*Trichoderma*, *Bacillus cereus* e *Bacillus subtilis*) mostraram potencial para aumentar a eficiência do sistema, reduzindo turbidez, cor e estabilizando o pH da água.

Diante dos resultados obtidos, sugere-se que futuras pesquisas explorem a integração entre wetlands construídos e tecnologias automatizadas, visando otimizar

a eficiência dos sistemas naturais sem comprometer sua sustentabilidade. Além disso, a padronização e regulamentação dos sistemas de Leitos Construídos são fundamentais para sua aplicação em larga escala, garantindo maior previsibilidade e segurança no tratamento de efluentes.

Portanto, a escolha entre os diferentes sistemas deve considerar fatores como disponibilidade de recursos, necessidades específicas do tratamento e viabilidade econômica, garantindo que a solução adotada seja eficiente, acessível e ambientalmente responsável.

REFERÊNCIAS

ALONGI, D. M. **Impact of climate change on mangrove forests**. Current Climate Change Reports, v. 6, p. 1-17, 2020.

APPLEYARD, Maria Gabriela Cunha. **Sistema de alagados construídos: framework para elaboração de projetos para performance na prestação de serviços ecossistêmicos**. 2024.

ASSIS, Orlando *et al.* **Saneamento rural: a experiência com as wetlands construídas em oficinas pedagógicas**. Cadernos de Agroecologia, v. 19, n. 1, 2024.

BRIX, H. *et al.* **Constructed wetlands for water pollution control**. Water Research, v. 197, p. 117080, 2021.

CARDOSO, Alice Rodrigues; POLETO, Cristiano. **SUDS: Environmental remediation applied to urban drainage**. Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação, v. 9, n. 3, p. 377-396, 2024.

CHEN, Y. *et al.* **Advances in microbial interactions in constructed wetlands: a review**. Science of the Total Environment, v. 903, p. 165432, 2024.

COUNDOUL, Falilou *et al.* **Ecological wastewater treatment system in a school environment using a horizontal flow biological reactor: the case of Typha**. Journal of Environmental Protection, v. 15, n. 1, p. 1-12, 2024.

DE OLIVEIRA, Fabrynne Mendes *et al.* **O avanço do uso de wetlands construídos para tratamento de cursos d'água urbanos**. Revista Políticas Públicas & Cidades, v. 13, n. 2, p. e993-e993, 2024.

FOCHI, Deison Antonio Taufer. **Sequência de wetlands de fluxo vertical saturado com unidade de fluxo compartimentado de superfície livre associados com filtro concêntrico de argila expandida e material cerâmico para tratamento de efluente urbano**. 2024.

GLICK, B. R. **Beneficial plant-bacterial interactions**. Cham: Springer, 2015. DOI:

HUSSAIN, A.; ALI, S. **The synergistic effect of plants and microorganisms in the bioremediation of wastewater: a review**. Environmental Science and Pollution Research, v. 29, p. 8230-8245, 2022.

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. D. **Treatment wetlands: theory and implementation.** Boca Raton: CRC Press, 2020.

KUMAR, M.; SINGH, S. **Recent advancements in the design and performance of constructed wetlands for wastewater treatment.** Bioresource Technology Reports, v. 17, p. 100866, 2022.

KZIOZEK, L.; LORSCHIEDER, C. A. **Vantagens e desvantagens da utilização de leitos construídos para os processos de fitorremediação com foco na educação ambiental e tratamento de esgotos.** Luminária, União da Vitória, v. 26, n. 1, p. 22-35, 2024.

LI, J. *et al.* **Use of industrial by-products as alternative substrates in constructed wetlands.** Journal of Environmental Management, v. 350, p. 118207, 2024.

LIU, X. *et al.* **Nutrient removal efficiency of different macrophytes in constructed wetlands.** Ecological Engineering, v. 184, p. 106787, 2023.

LIU, Y.; YANG, L.; ZHANG, J. **Microbial communities in constructed wetlands: a comprehensive review of their diversity and roles in wastewater treatment.** Science of the Total Environment, v. 807, p. 150748, 2022.

MIKLOS, M.; RÓZSA, K. **Performance of constructed wetlands in removing heavy metals from wastewater: a review.** Journal of Environmental Management, v. 303, p. 113856, 2022.

MITSCH, W. J.; GOSSELINK, J. G. **Wetlands.** Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

MORAIS, Ruyter Thyago Lemos; OLIVEIRA, Patrick Peres. **Sistemas de tratamento de água cinza: diferentes métodos de tratamento.** Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, v. 5, n. 1, 2024.

RUBIM, Cristiane. **Tratamento de efluentes com wetlands e jardins filtrantes construídos artificialmente.** [S. l.], 2017. Acesso em: nov. 2017.

SAEED, T.; SUN, G. **Innovations in constructed wetland technology for improving wastewater treatment efficiency.** Environmental Technology & Innovation, v. 26, p. 102321, 2022.

SALATI, Eneida; SALATI FILHO, Eneas; SALATI, Eneida. **Utilização de sistemas de wetlands construídas para tratamento de águas.** Biológico, São Paulo, v. 65, n. 1/2, p. 113-116, 2003.

SANTOS, C. L. *et al.* **Sistema autônomo para tratamento de água residual contaminada.** Revista Ceará Científico, Ceará, p. 128-138, 2023.

SANTOS, F. C.; VIANA, M. M. **Integrated constructed wetlands as a sustainable approach for treating domestic wastewater: a review.** Journal of Cleaner Production, v. 368, p. 132817, 2022.

SEZERINO, P. *et al.* **Wetlands construídos: uma análise de seu potencial no tratamento de águas residuais urbanas.** 2021.

- TAN, X. *et al.* **Biochar as an amendment in constructed wetlands: recent advances and future perspectives.** *Bioresource Technology*, v. 376, p. 128968, 2023.
- TEIXEIRA, Daniel Brinckmann. **Avaliação de wetlands construídos no tratamento terciário de esgoto doméstico em residência unifamiliar.** 2024.
- VON SPERLING, M.; SEZERINO, P. H. **Introdução ao tratamento de esgotos por processos anaeróbios e sistemas alagados construídos.** Belo Horizonte: UFMG, 2018.
- VYMAZAL, J. **Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience.** *Environmental Science & Technology*, v. 45, n. 1, p. 61-69, 2010. DOI: [INSERIR DOI SE HOUVER].
- VYMAZAL, J. **The role of macrophytes in constructed wetlands for wastewater treatment: a review.** *Water Science & Technology*, v. 88, n. 5, p. 1132-1146, 2023.
- WANG, Q. *et al.* **Hydraulic and pollutant removal performance of different substrates in constructed wetlands.** *Environmental Pollution*, v. 319, p. 120924, 2023.
- WANG, X. *et al.* **Modeling approaches for optimizing constructed wetlands performance.** *Journal of Hydrology*, v. 625, p. 129785, 2024.
- WU, H. *et al.* **Temperature effects on microbial communities and pollutant removal in cold-climate constructed wetlands.** *Science of the Total Environment*, v. 847, p. 157356, 2023.
- ZHANG, W.; HE, S. **The roles of plants and microorganisms in the remediation of wastewater: a critical review.** *Environmental Pollution*, v. 292, p. 118363, 2022.
- ZHANG, X. *et al.* **Surface and subsurface flow constructed wetlands: a comparative analysis.** *Environmental Science & Technology*, v. 56, n. 14, p. 8872-8885, 2022.
- ZHAO, Y. *et al.* **Hybrid constructed wetlands: innovations and applications for emerging contaminants removal.** *Chemosphere*, v. 332, p. 138729, 2024.
- ZHU, T. *et al.* **Microbial community dynamics in constructed wetlands treating different wastewater types.** *Water Research*, v. 235, p. 119823, 2023.



Características, Toxicidade e Processos de Remoção de Metais Pesados no Ambiente

Characteristics, Toxicity and Removal Processes of Heavy Metals in the Environment

André Felipe Santos Lima

Mestrando do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5399-3053>

Adeildo de Oliveira Filho

Mestrando do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0192-4982>

Raquel Luiza Alves de Araújo

Mestranda do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4242-6021>

Eliana Cristina Barreto Monteiro

Professora Adjunta da Escola Tecnologia e Comunicação, Universidade Católica de Pernambuco e Universidade de Pernambuco. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0842-779>

Galba Maria de Campos Takaki

Professora Titular da Escola Tecnologia e Comunicação, Coordenadora do Centro Multiusuário Biomoléculas e Superfície de Materiais- CEMACBIOS, Universidade Católica de Pernambuco. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0519-0849>. Autor correspondente.

Resumo: Chumbo, mercúrio, cádmio e arsênio são metais pesados reconhecidos por sua alta persistência no ambiente e potencial de bioacumulação. A exposição a esses elementos representa uma ameaça significativa à saúde humana e ao equilíbrio dos ecossistemas, afetando organismos em diferentes níveis tróficos. Este trabalho analisa os principais métodos de remoção desses contaminantes, com ênfase em técnicas físico-químicas e biotecnológicas, destacando suas vantagens, limitações e potencial de aplicação. A proposta visa subsidiar o desenvolvimento de estratégias mais eficientes para o monitoramento, controle e mitigação da poluição ambiental por metais pesados.

Palavras-chave: poluentes inorgânicos; tecnologias limpas; contaminação ambiental; biorremediação; tratamento de efluentes.

Abstract: Lead, mercury, cadmium, and arsenic are heavy metals known for their high environmental persistence and bioaccumulation potential. Exposure to these elements poses a significant threat to human health and ecosystem balance, affecting organisms across different trophic levels. This study examines the main methods for removing these contaminants, with emphasis on physicochemical and emphasis on physicochemical and biotechnological techniques, highlighting their advantages, limitations, and potential applications. The proposed approach aims to support the development of more efficient strategies for monitoring, controlling, and mitigating environmental pollution caused by heavy metals.

Keywords: inorganic pollutants; clean technologies; environmental contamination; bioremediation; effluent treatment.

INTRODUÇÃO

Os seres humanos são parte integrante dos ecossistemas e, por meio de suas atividades antrópicas, liberam resíduos no ambiente, impactando diretamente a qualidade da água, do solo e do ar. Essa interferência não só desequilibra os ecossistemas, mas também afeta significativamente a biota em diversos níveis tróficos (Argon *et al.*, 2024).

A contaminação ambiental por metais pesados constitui uma preocupação crescente devido à elevada persistência no ambiente, capacidade de bioacumulação e biomagnificação ao longo da cadeia alimentar, afetando plantas, animais e, conseqüentemente, os seres humanos (Khan *et al.*, 2022). Embora, elementos como zinco e cobre sejam micronutrientes essenciais em concentrações de traço, outros metais, como chumbo, mercúrio, cádmio, cromo e arsênio, são reconhecidamente tóxicos, mesmo em níveis muito baixos (Silva *et al.*, 2023). Esses elementos apresentam elevada estabilidade química, baixa biodegradabilidade e estão associados a efeitos adversos à saúde humana, incluindo doenças crônicas e carcinogenicidade (Rocha *et al.*, 2023).

O aumento das atividades antropogênicas decorrentes da industrialização e do avanço tecnológico, aliado ao crescimento acelerado da urbanização e da população global, tem contribuído significativamente para a intensificação da contaminação de águas e solos. No contexto brasileiro, assim como em diversas regiões globais, as principais fontes de contaminação do solo por metais pesados incluem processos mineratórios, descarte inadequado de resíduos sólidos, aplicação intensiva de fertilizantes e defensivos agrícolas, bem como a liberação de efluentes industriais (Guarda *et al.*, 2021). Além da mineração, setores industriais como siderurgia, metalurgia, galvanoplastia, queima de combustíveis fósseis e tratamento de resíduos e efluentes industriais representam fatores críticos para a poluição ambiental por metais pesados (Dong *et al.*, 2010). Adicionalmente, práticas agrícolas podem ocasionar contaminação do solo e corpos hídricos superficiais e subterrâneos devido à aplicação de fertilizantes, pesticidas e lodos provenientes de estações de tratamento de esgoto, constituindo fontes significativas de metais pesados no ambiente (European Environment Agency, 2000).

Estudos recentes demonstram que metais como arsênio, cádmio, mercúrio e chumbo podem acumular-se em organismos aquáticos e terrestres, afetando negativamente funções fisiológicas essenciais, como a atividade enzimática, a integridade estrutural de proteínas e a homeostase celular (Saidon *et al.*, 2023). Os impactos resultantes dos efeitos adversos, incluem redução da atividade metabólica, diminuição da diversidade biológica e, em casos extremos, morte celular. Além disso, a biomagnificação desses metais ao longo dos níveis tróficos pode comprometer a saúde de predadores de topo, incluindo seres humanos, por meio da ingestão de organismos contaminados (Ghosh *et al.*, 2022).

Considerando os impactos adversos da contaminação por metais pesados nos ecossistemas, nas atividades socioeconômicas e na saúde humana, há um crescente interesse no desenvolvimento de estratégias de remediação ambiental

(Sharma *et al.*, 2023). Essas estratégias visam reduzir a concentração, a toxicidade e os riscos associados à poluição por metais pesados (Panda *et al.*, 2025). Entre as abordagens de remediação, destaca-se a biorremediação, que utiliza organismos vivos ou seus processos metabólicos para descontaminar ambientes contaminados (Pouresmaieli *et al.*, 2022).

Uma alternativa promissora é o uso de plantas, especialmente as hiperacumuladoras, que possuem a capacidade de absorver, translocar e acumular metais pesados em concentrações significativamente superiores às encontradas em plantas comuns. Essas plantas desempenham um papel crucial na fitorremediação, processo que envolve a remoção ou estabilização de contaminantes do solo e da água, utilizando mecanismos como fitoextração, fitoestabilização, fitodegradação e fitovolatilização (Bhat *et al.*, 2022).

Diante do aumento da contaminação crescente por metais pesados, é essencial entender suas propriedades químicas e biológicas, os mecanismos de toxicidade nos organismos vivos, e suas principais fontes e impactos ambientais. Esse conhecimento é crucial para desenvolver estratégias eficazes de prevenção, controle e remediação (Zhou *et al.*, 2023).

CONCEITO SOBRE METAIS PESADOS

Os metais pesados são elementos químicos conhecidos por sua elevada densidade e peso atômico, mas o que mais preocupa é o seu potencial tóxico mesmo em pequenas quantidades. Embora não exista uma definição única para eles, geralmente são identificados por características como densidade acima de 5 g/cm³. O grande problema é que, em contato com seres vivos, esses metais podem causar sérios danos à saúde (Lima *et al.*, 2024). Alguns metais pesados, como chumbo (Pb), mercúrio (Hg) e cádmio (Cd), são extremamente perigosos mesmo em quantidades mínimas, pois não têm nenhuma função benéfica no organismo. Outros, como arsênio (As) – que, tecnicamente, é um metaloide, mas age de forma similar –, cromo (Cr), níquel (Ni) e zinco (Zn), podem ser essenciais em pequenas quantidades, contudo, tornam-se prejudiciais se acumulados no corpo. Essa diferença é crucial, pois mostra que nem todos os metais pesados agem da mesma forma: alguns são sempre tóxicos, enquanto outros só se tornam um risco em excesso (Apambiente, 2023; Tuasaude, 2024).

O CICLO HIDROLÓGICO DA ÁGUA EM RELAÇÃO AOS METAIS PESADOS NO AMBIENTE

O ciclo hidrológico desempenha um papel fundamental não apenas na sustentação da vida na Terra, mas também na mobilização e redistribuição de substâncias químicas, incluindo metais pesados (Ondrasek *et al.*, 2025). Esses elementos, caracterizados por sua elevada densidade e potencial tóxico, podem ser transportados por meio de processos hidrológicos como precipitação, escoamento

superficial, infiltração e fluxo subterrâneo (Quiao *et al.*, 2023). Durante eventos de precipitação, por exemplo, metais pesados presentes na atmosfera ou em superfícies terrestres podem ser incorporados à água da chuva e depositados em corpos d'água ou solos, influenciando sua distribuição espacial e temporal (Li *et al.*, 2025). Além disso, fatores hidrológicos podem influenciar a especiação química e a biodisponibilidade de metais pesados, afetando diretamente os ecossistemas aquáticos e terrestres. Compreender esses processos é fundamental para avaliar os riscos ambientais associados à contaminação por metais e para desenvolver estratégias eficazes de monitoramento e remediação (Yao *et al.*, 2022).

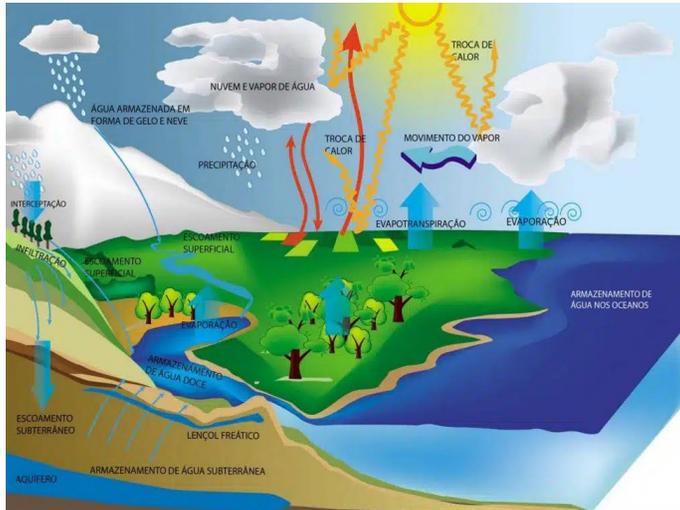
A água é um elemento essencial para a manutenção da vida e desempenha um papel vital no funcionamento adequado dos ecossistemas terrestres e aquáticos (Ana, 2023). O planeta Terra é único no sistema solar por apresentar água nos três estados físicos, sólido, líquido e gasoso sob condições naturais, característica que sustenta o ciclo hidrológico global. Esse ciclo é composto por processos como evaporação, condensação, precipitação, infiltração e escoamento superficial, que não apenas garantem a disponibilidade de água doce, mas também regulam o clima e influenciam diretamente os ciclos biogeoquímicos, como os do carbono e do nitrogênio, essenciais para a produtividade dos ecossistemas, como ilustrado na figura 1 (Yang *et al.*, 2021).

Além de sua importância ecológica, a água é o meio principal de transporte desses materiais poluentes na maioria dos ecossistemas. Cada rio ou lago possui, até certo ponto, uma capacidade natural de receber poluentes. Essa capacidade de neutralização da matéria poluidora através dos processos de diluição, sedimentação e estabilização química é denominada autodepuração (CONNOR *et al.*, 2022). O equilíbrio está diretamente relacionado à capacidade do corpo d'água de assimilar os lançamentos, não conflitando com a sua utilização. Nos cursos d'água poluídos ocorre uma transformação gradual dos componentes orgânicos em sais minerais e gás carbônico, restabelecendo-se lentamente a limpidez das águas naturais (De Sousa, 2025).

A solução adotada para o despejo de esgoto doméstico é o lançamento, na maioria das vezes sem tratamento prévio, dos efluentes em corpos d'água; a poluição de um rio devido ao lançamento de efluentes não fica restrita ao trecho onde ocorre o lançamento, mas compromete toda a sua bacia hidrográfica, bem como a sua região estuarina onde lança suas águas. A capacidade de autodepuração do corpo d'água é bastante afetada pelas variações de vazão presentes nos lançamentos desses efluentes. Se a mesma quantidade de matéria orgânica é lançada diluída é de se esperar uma melhor resposta do corpo d'água (Cunha; Ferreira, 2006).

Dentre as várias formas de contaminação do meio ambiente resultantes das diversas atividades industriais e agrícolas, a contaminação da água com metais pesados tem sido uma das que tem trazido mais preocupação aos pesquisadores e órgãos governamentais envolvidos no controle de poluição. É que a água, além de ser um dos mais importantes fatores da preservação da vida em vias de se tornar escassa no mundo, está sendo contaminada com o despejo de rejeitos industriais e urbanos e várias outras atividades humanas. (Oliveira *et al.*, 2001).

Figura 1 - O descarte de metais pesados nos corpos hídricos.



Fonte: AcquaBlog , 2025.

FONTES DE CONTAMINAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA

A poluição por metais pesados no meio ambiente pode ter origem tanto em fontes naturais quanto em atividades humanas. No entanto, são as ações do homem que, atualmente, contribuem mais significativamente para os altos níveis desses poluentes encontrados em diversos ecossistemas (Lima *et al.*, 2024; Guarda *et al.*, 2021). As fontes naturais de metais pesados incluem processos como a erosão de rochas e minerais, que liberam esses elementos no ambiente, além de erupções vulcânicas, que lançam partículas metálicas no ar, no solo e na água de acordo com Fadigas *et al.* (2002), embora, anterior a 2021, é uma referência clássica sobre níveis naturais no Brasil).

Os metais pesados ocorrem naturalmente no meio ambiente, no entanto, devido as ações humanas é que contribuem para acelerar significativamente a liberação e dispersão dos metais. Entre as principais fontes de contaminação antropogênica, destacam-se as indústrias nos processos como mineração, metalurgia, galvanoplastia e produção química liberam metais pesados por meio de efluentes líquidos, resíduos sólidos e emissões atmosféricas. Setores como o têxtil e o de curtumes também contribuem para esse problema (Schneider *et al.*, 2025; APAMBIENTE, 2023). Na agricultura O uso de fertilizantes fosfatados (que podem conter cádmio), pesticidas antigos (com arsênio, cobre ou mercúrio) e até mesmo a aplicação de lodo de esgoto como adubo introduzem metais tóxicos no solo (EcoDebate, 2025). O descarte inadequado de lixo eletrônico causados por resíduos urbanos e industriais, pilhas, tintas e plásticos em aterros sanitários ou lixões permite que metais pesados vazem para o solo e corpos d'água, contaminando ecossistemas (Franco e Lala, 2021).

A poluição atmosférica representa importante via de dispersão de metais pesados no ambiente. A queima de combustíveis fósseis e as emissões industriais lançam partículas metálicas no ar, que posteriormente se depositam no solo e na água, muitas vezes a quilômetros de distância da fonte original (APAMBIENTE, 2023). Além dessas, outras fontes menos evidentes também contribuem para a contaminação, campos de tiro (com projéteis de chumbo) e o uso de água contaminada na irrigação, especialmente aquela proveniente da ambas configurando riscos ambientais (Schneider *et al.*, 2025). Uma vez introduzidos no ambiente, os metais pesados podem permanecer no ambiente por décadas, devido à sua natureza não degradável. Além disso, tendem a se acumular nos tecidos de seres vivos, potencializando seus efeitos ao longo da cadeia alimentar (Guarda *et al.*, 2021; Lima *et al.*, 2024).

CONCENTRAÇÕES DE METAIS PESADOS EM SOLO E ÁGUA

A presença de metais pesados no solo e na água pode variar muito de um local para outro. Isso depende, em parte, da composição natural do solo (seus níveis de fundo), mas também – e principalmente – da ação humana, como atividades industriais e outras fontes de poluição (Guarda *et al.*, 2021; Fadigas *et al.*, 2002). No Brasil, ainda é difícil estabelecer parâmetros de referência para esses metais, o que complica a avaliação precisa de áreas contaminadas (Fadigas *et al.*, 2002) Embora, anterior a 2021, é uma referência clássica sobre níveis naturais no Brasil).

No entanto, pesquisas recentes mostram que o problema é mais grave do que se imagina. Em escala global, estima-se que de 14% a 17% dos solos agrícolas estejam contaminados por metais pesados, afetando mais de um bilhão de pessoas que dependem dessas terras para se alimentar (EcoDebate, 2025). No Brasil, regiões impactadas por indústrias ou desastres ambientais – como Brumadinho, após o rompimento da barragem – registraram níveis alarmantes desses metais, ultrapassando os limites considerados seguros (UFF, 2025). Em bacias hidrográficas, como a do Rio Formoso (TO), pesquisas detectaram a presença de bário, cromo, cobre, zinco, níquel, chumbo, ferro e alumínio na água, no solo e nos sedimentos, reforçando a necessidade de monitoramento constante (Guarda *et al.*, 2021).

Quando se trata de água potável, órgãos como a Organização Mundial da Saúde (OMS) e o Ministério da Saúde brasileiro estabelecem limites rígidos para metais pesados. A Portaria GM/MS Nº 888/2021, que atualiza a antiga Portaria 2914/2011, define esses parâmetros para garantir a segurança da população. Metais como chumbo, cádmio, mercúrio e arsênio, quando presentes acima do permitido, representam um risco direto à saúde (Angon *et al.*, 2024). Além disso, a contaminação de rios e lagos prejudica a vida aquática e pode inviabilizar o uso da água para irrigação e lazer. O pior é que esses metais persistem no ambiente por décadas, exigindo ações de descontaminação mesmo depois que a fonte de poluição é eliminada (APAMBIENTE, n.d.).

FONTES DE CONTAMINAÇÃO

Os metais pesados são inseridos no ambiente através de diversas fontes naturais, agrícolas, industriais, de efluentes domésticos, atmosféricos e outros, sendo a mais importante fonte, de origem natural, caracterizada como material de origem geológica ou afloramentos rochosos, portanto a contaminação por metais pesados continua sendo um problema ambiental e de saúde pública significativo, com fontes diversas, incluindo atividades industriais, agrícolas e urbanas. Entre os metais mais preocupantes estão o chumbo (Pb), cádmio (Cd), arsênio (As), mercúrio (Hg) e cromo (Cr), devido à sua toxicidade, persistência e bioacumulação (Weber *et al.*, 2022). As indústrias como a mineração, siderurgia e fabricação de baterias são grandes emissoras de metais pesados. Os resíduos industriais são os que mais contaminam solos e corpos hídricos (Tchounwou *et al.*, 2021). Um estudo de Wang *et al.* (2022) destacou que o descarte inadequado de resíduos eletrônicos contribui para a liberação de Pb, Cd e Hg no ambiente.

Fertilizantes como fosfatados e pesticidas contêm (Cd) e (As), que se acumulam no solo e são absorvidos por cultivos (Antoniadis *et al.*, 2020). A irrigação com água contaminada, é comum em regiões com pouca regulamentação, e agrava a contaminação do meio ambiente (Ullah *et al.*, 2023). O escoamento urbano carrega metais como Zn e Cu de veículos e infraestruturas para rios e lagos (Ondrasek *et al.*, 2025). Aterros sanitários mal gerenciados liberam lixiviados com altas concentrações de metais (Khalid *et al.*, 2020). Eventos extremos, como enchentes, dispersam metais de áreas industriais para regiões antes não contaminadas.

Portanto, além da contaminação do solo, impedindo a sua fertilização, também agrava grandes consequências nos mananciais impedindo a fotossíntese (Weber *et al.*, 2023). Na figura 1 ilustra o descarte de metais pesados nos corpos hídricos.

IMPACTOS AMBIENTAIS À SAÚDE HUMANA E ANIMAL

A contaminação por metais pesados acarreta diversos impactos negativos, tanto no meio ambiente quanto na saúde humana e animal. Esses elementos, mesmo em concentrações relativamente baixas, apresentam toxicidade persistente, bioacumulativa e de difícil remediação, configurando-se como um dos principais desafios para a sustentabilidade dos ecossistemas e a proteção da saúde pública (Rocha *et al.*, 2023).

Impactos Ambientais

No ambiente, os metais pesados podem degradar significativamente a qualidade do solo, alterando suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Essas alterações comprometem a fertilidade e inibem a atividade microbiana essencial à ciclagem de nutrientes, tornando o solo impróprio para a agricultura (EcoDebate, 2025). Além disso, a lixiviação desses metais ou o descarte inadequado de efluentes contaminam corpos hídricos superficiais e subterrâneos, como rios, lagos

e aquíferos, afetando diretamente a qualidade da água utilizada para consumo humano, irrigação e preservação da vida aquática (Guarda *et al.*, 2021).

Esses processos impactam diretamente a biodiversidade, uma vez que plantas e animais aquáticos ou terrestres expostos aos metais pesados apresentam toxicidade elevada, o que pode resultar em inibição do crescimento, distúrbios reprodutivos, alterações fisiológicas e comportamentais, além de morte de organismos expostos (APAMBIENTE, 2023).

Impactos à Saúde Humana e Animal

Os metais pesados também representam um risco substancial à saúde humana e de outras espécies, uma vez que tendem a se acumular nos tecidos dos organismos ao longo da cadeia alimentar (bioacumulação) e podem atingir concentrações elevadas em predadores de topo da cadeia alimentar, incluindo os seres humanos (biomagnificação) (Guarda *et al.*, 2021; Lima *et al.*, 2024).

A exposição humana pode ocorrer por ingestão de água e alimentos contaminados, inalação de poeira e vapores, ou ainda por contato dérmico, os efeitos adversos à saúde variam conforme o tipo de metal, sua dose, tempo e via de exposição (Lima *et al.*, 2024), e podem ser classificados como:

- **Toxicidade Aguda:** Elevadas exposições podem causar sintomas imediatos, como irritação gastrointestinal, problemas respiratórios, choque e falência renal aguda (Lima *et al.*, 2024).
- **Toxicidade Crônica:** Exposições prolongadas, mesmo em baixas concentrações, são mais comuns e insidiosas. Os metais acumulam-se em órgãos vitais como rins, fígado, ossos e sistema nervoso central, resultando em danos progressivos, muitas vezes irreversíveis (Lima *et al.*, 2024).

A exposição ocupacional em setores indústrias e a exposição populacional em áreas contaminadas (por desastres ambientais ou proximidade com fontes poluidoras) constituem focos relevantes de estudos epidemiológicos e de biomonitoramento humano (Oliveira *et al.*, 2025; Campos *et al.*, 2021). A tabela 1, mostra especificamente os efeitos tóxicos dos metais pesados mais estudados no ambiente.

Tabela 1 - Principais efeitos tóxicos em organismos humanos por metais pesados.

| Metais Pesados | Efeitos Tóxicos |
|----------------|--|
| Chumbo (Pb) | Danos ao sistema nervoso, especialmente em crianças; problemas de desenvolvimento cognitivo e motor; danos renais e hematológicos. |
| Mercúrio (Hg) | Danos ao sistema nervoso central; problemas de coordenação, equilíbrio e memória; danos renais e fetais |
| Cádmio (Cd) | Danos renais e ósseos; problemas de desenvolvimento ósseo; aumento do risco de câncer. |

| Metais Pesados | Efeitos Tóxicos |
|----------------|---|
| Arsênio (As) | Aumento do risco de câncer de pele, pulmão e outros órgãos; problemas de pele e vascularização. |
| Cromo (Cr) | Danos renais e hepáticos; problemas respiratórios; aumento do risco de câncer. |
| Níquel (Ni) | Problemas de pele e respiratórios; aumento do risco de câncer; danos renais e hepáticos. |

Fonte: Autoria própria.

SOLUÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

O enfrentamento da contaminação ambiental por metais pesados demanda uma abordagem multifacetada, que integre ações de prevenção, monitoramento contínuo e tecnologias de remediação. As Principais perspectivas futuras e soluções em desenvolvimento incluem:

- **Prevenção na Fonte:** Trata-se da estratégia mais eficaz e sustentável, baseada na redução ou eliminação da liberação de metais pesados no ambiente. Para isso, é fundamental implementar tecnologias industriais mais limpas, realizar o controle rigoroso de emissões e efluentes, além de substituir materiais tóxicos por alternativas menos agressivas. A gestão adequada de resíduos (inclusive com logística reversa de produtos eletrônicos e baterias) e a promoção de práticas agrícolas mais sustentáveis, com menor uso de insumos contaminantes, também são essenciais (Milkiewicz *et al.*, 2025).
- **Políticas e Regulamentação:** O fortalecimento e a fiscalização das legislações ambientais, a partir da RESOLUÇÃO DA DIRETORIA COLEGIADA - RDC Nº 222/2018 da ANVISA, que regulamenta as Boas Práticas de Gerenciamento dos Resíduos de Serviços de Saúde e dá outras providências, portanto, indispensáveis para o controle efetivo dos metais pesados em efluentes, solos, águas superficiais e subterrâneas, alimentos e produtos de consumo. Iniciativas como os planos nacionais de economia circular têm potencial para impulsionar uma gestão mais eficiente dos recursos e resíduos no Brasil.
- **Monitoramento Contínuo:** Sistemas robustos de monitoramento ambiental são imprescindíveis para identificação precoce de áreas contaminadas, avaliação de riscos à saúde e ao ambiente e verificação da eficácia das medidas de controle e remediação. A utilização de organismos bioindicadores (plantas, animais) pode complementar esse processo, sendo uma ferramenta de baixo custo para avaliar a biodisponibilidade e os efeitos ecotoxicológicos dos metais pesados (Guarda *et al.*, 2021).
- **Tecnologias de Remediação:** Diversas técnicas de remediação têm sido estudadas e aplicadas para o tratamento de áreas contaminadas. Dentre as principais, destacam-se:

a) Fitorremediação: Uso de plantas capazes de extrair (fitoextração), acumular (fitoacumulação) ou estabilizar (fitoestabilização) metais pesados no solo.

b) Biorremediação: Aplicação de microrganismos (como bactérias e fungos) com capacidade de imobilizar ou transformar metais pesados em formas menos tóxicas.

c) Adsorção: Emprego de materiais adsorventes (como carvão ativado, biochar, zeólitas, argilas, resíduos agroindustriais modificados) para remover metais da água ou imobilizá-los no solo (Lima *et al.*, 2024; Carneiro *et al.*, 2024).

d) Técnicas Físico-Químicas: Incluem métodos como precipitação química, troca iônica, eletroremediação, lavagem de solos e vitrificação. Esses métodos têm como objetivo remover ou imobilizar os contaminantes, contribuindo para a redução de sua mobilidade e toxicidade no ambiente (APAMBIENTE, S.D.).

Importante destacar que essas técnicas diferenciam quanto a eficiência, custo e aplicabilidade (tabela 2). Essas técnicas oferecem abordagens sustentáveis para a remediação de ambientes contaminados por metais pesados. A escolha entre biorremediação e fitorremediação deve considerar fatores específicos do local contaminado, tipo de contaminante, condições ambientais e objetivos do projeto de remediação.

Tabela 2 - Análise de eficiência, custo e aplicabilidade da biorremediação e fitorremediação.

| Critério | Métodos Físico-Químicos | Métodos Biológicos |
|-----------------|---|--|
| Eficiência | Elevada eficiência, especialmente em altas concentrações, | Elevada eficiência em baixas e moderadas concentrações ;pode ser limitada em altas concentrações devido à toxicidade. |
| Custo | Geralmente alto, devido aos reagentes químicos, energia e descarte de resíduos. | Mais baixo, especialmente em processos com biomassas residuais ou micro-organismos; menor consumo de energia. |
| Aplicabilidade | Ampla, aplicável a diversos tipos de efluentes e condições; processos rápidos e controláveis. | Mais sustentável, aplicável principalmente em efluentes com baixas concentrações; pode ser sensível às variações ambientais (pH, temperatura, toxicidade). |

Fonte: autoria própria.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da crescente demanda por soluções eficazes para a remoção e tratamento de metais pesados, vêm sendo desenvolvida e aprimorada diversas tecnologias emergentes com potencial para mitigar os impactos ambientais à saúde humana, dentre essas, destacam-se os processos biotecnológicos como:

biorremediação, fitorremediação, biossorção, aplicação de nanotecnologia, uso de materiais alternativos em sistemas de adsorção, membranas seletivas e processos eletroquímicos. E ainda, a integração dessas abordagens representa um avanço significativo frente às limitações dos métodos físico-químicos convencionais, promovendo soluções mais limpas, eficazes e adaptáveis a diferentes contextos ambientais. Portanto, os impactos ambientais e sanitários decorrentes da presença de metais pesados no ambiente, torna-se imprescindível o fortalecimento de políticas públicas voltadas ao monitoramento e controle ambiental, o estímulo à adoção de práticas industriais mais limpas, ao reaproveitamento e à reciclagem de resíduos metálicos. Nesse contexto, é fundamental o incentivo ao investimento contínuo em educação ambiental, na formação técnica especializada na preservação e manutenção dos serviços ecossistêmicos para a consolidação de um modelo de desenvolvimento sustentável, garantindo ambientes ecologicamente equilibrados livres de contaminantes tóxicos, visando assegurar a resiliência dos ecossistemas e o bem-estar das gerações presentes e futuras.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023: Informe anual**. Brasília: ANA, 2023.

Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/conjuntura-dos-recursos-hidricos>. Acesso em: 11 jun. 2025.

ANGON, Prodipto Bishnu *et al.* **Sources, effects and present perspectives of heavy metals contamination: Soil, plants and human food chain**. Heliyon, v. 10, n. 7, 2024.

ANTONIADIS, Vasileios *et al.* **A critical prospective analysis of the potential toxicity of trace element regulation limits in soils worldwide: Are they protective concerning health risk assessment? — A review**. Environment International, v. 127, p. 819-847, 2019.

ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária). RDC Nº 222/2018 COMENTADA.

APAMBIENTE. **Metais pesados**. Agência Portuguesa do Ambiente, 2023. Disponível em: <https://apambiente.pt/ar-e-ruído/metais-pesados>. Acesso em: 02 jun. 2025.

BHAT, Shakeel Ahmad *et al.* **Fitorremediação de metais pesados no solo e na água: Uma abordagem ecológica, sustentável e multidisciplinar**. Chemosphere, v. 303, p. 134788, 2022.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. **PLANO NACIONAL DE ECONOMIA CIRCULAR 2025 – 2034**. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/enec/plano-nacional/plano-nacional-de-economia-circular-2025-2034.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2025.

CAMPOS, E. A. *et al.* **Exposição a metais em população adulta residente em área urbana industrial no Brasil: revisão sistemática.** *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 26, Suppl. 2, p. 3865-3878, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csc/a/DNJdCvGmLY5Kt3QyFWkMPvG/?lang=pt>. Acesso em: 02 jun. 2025.

CARNEIRO, A. O. *et al.* **Bioadsorventes de resíduos da agroindústria na remoção de contaminantes emergentes em águas: uma revisão.** *Química Nova*, v. 47, n. 2, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/fwCXbnBLT8Fz8v8stN3MXHP/?lang=pt>. Acesso em: 02 jun. 2025.

CONNOR, Richard *et al.* **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2022: águas subterrâneas: tornar visível o invisível; resumo executivo.** 2022.

COSTA, Luciana de Luna; CEBALLOS, Beatriz S. O.; MEIRA, Celeide M. B. S.; CAVALCANTI, Mário Luiz Farias. **Eficiência de wetlands construídos com dez dias de detenção hidráulica na remoção de colílagos e bacteriólagos.** *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v. 3, n. 1, 2003. Disponível em: <http://www.uepb.edu.br/eduep/rbct/sumarios/pdf/wetlands.pdf>. Acesso em: 25 maio 2025.

CUNHA, Cynara de Lourdes da Nóbrega; FERREIRA, Aldo Pacheco. **Mathematical modeling to assess the effects of organic waste dumping on sanitary conditions of environmental waters.** *Cadernos de Saúde Pública*, Rio de Janeiro, v. 22, n. 8, 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102311X2006000800020&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 27 maio 2025.

DE OLIVEIRA, G. A. C. **Purificação do carbonato de lítio utilizando a técnica de troca iônica.** 2020. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2020.

DE SOUSA, Gleison; MENDES, Jonas Jansen. **Avaliação da capacidade de autodepuração da bacia do Rio Tibiri, São Luís–MA.** *Brazilian Journal of Development*, v. 11, n. 2, p. e77999-e77999, 2025.

DONG, Xiaoqing *et al.* **A novel approach for soil contamination assessment from heavy metal pollution: A linkage between discharge and adsorption.** *Journal of Hazardous Materials*, v. 175, n. 1-3, p. 1022-1030, 2010.

ECO DEBATE. **Metais pesados contaminam 17% das terras agrícolas globais.** 19 abr. 2025. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2025/04/19/metais-pesados-contaminam-17-das-terras-agricolas-globais/>. Acesso em: 02 jun. 2025.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **Down to earth: soil degradation and sustainable development in Europe: a challenge for the 21st century.** Office for Official Publications of the European Communities, 2000.

EVENTOS PGSSCOGNA. **Contaminação por Metais Pesados: Impactos, Riscos à Saúde e Estratégias de Remediação.** Anais de Evento, s.d. Disponível

em: <https://eventos.pgsscogna.com.br/anais/trabalho/19640>. Acesso em: 02 jun. 2025.

FRANCO, A. dos S.; LALA, E. R. **Danos causados à saúde humana pelos metais tóxicos presentes no lixo eletrônico**. *Diversitas Journal*, v. 6, n. 2, p. 2685-2697, 2021. Disponível em: https://diversitasjournal.com.br/diversitas_journal/article/view/1626. Acesso em: 02 jun. 2025.

GHOSH, Devanita; GHOSH, Anwasha; BHADURY, Punyasloke. **Arsenic through aquatic trophic levels: effects, transformations and biomagnification — a concise review**. *Geoscience Letters*, v. 9, n. 1, p. 20, 2022.

GUARDA, P. M. *et al.* **Concentrações de metais tóxicos em água, solo e sedimento do rio Formoso, TO**. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 10, e391101018897, 2021.

KHALID, S. *et al.* **Heavy metal contamination from landfill leachates**. *Waste Management*, v. 105, p. 1-12, 2020.

KHAN, S.; REHMAN, S.; SHAHID, M.; NAEEM, A.; MAHMOOD, T. **Toxicity of heavy metals and their bioremediation strategies: A review**. *Environmental Research*, v. 212, p. 113123, 2022.

LI, Tianxiao *et al.* **Freeze-thaw cycles affect hydrothermal and heavy metal transport mechanisms in porous media: Closed and transient flooded system conditions**. *Science of The Total Environment*, v. 966, p. 178750, 2025.

LIMA *et al.*, **Revisão Integrativa: Avaliação Da Adsorção De Metais Pesados Em Solo**. *Revista FT*. 2024. DOI:10.5281/zenodo.12043775

MICROAMBIENTAL (13 mar. 2024). **Análise de metais pesados na água**. Disponível em: [https://microambiental.com.br/analises-de-agua/analise-de-metais-pesados\[1\]na-agua/](https://microambiental.com.br/analises-de-agua/analise-de-metais-pesados[1]na-agua/) (Acesso em: 02 jun. 2025).

MILKIEVICZ, Indianara Ignacio *et al.* **Logística reversa de medicamentos no Brasil: impactos ambientais e legais**. *REVISTA DELOS*, v. 18, n. 65, p. e4489-e4489, 2025.

MONIB, Abdul Wahid *et al.* **Heavy metal contamination in urban soils: Health impacts on humans and plants: A review**. *European Journal of Theoretical and Applied Sciences*, v. 2, n. 1, p. 546-565, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114295>.

OLIVEIRA, Juraci Alves; CAMBRAIA, José; CANO, Marco Antonio Oliva; JORDÃO, Cláudio Pereira. **Absorção e acúmulo de cádmio e seus efeitos sobre o crescimento relativo de plantas de aguapé e de salvinia**. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, v. 13, n. 3, p. 329-341, 2001.

ONDRASEK, Gabor *et al.* **Metal contamination—a global environmental issue: sources, implications & advances in mitigation**. *RSC advances*, v. 15, n. 5, p. 3904-3927, 2025.

ONDRASEK, Gabrijel *et al.* **Metal contamination—a global environmental issue: sources, implications & advances in mitigation.** RSC advances, v. 15, n. 5, p. 3904-3927, 2025.

PANDA, Ashok; FATNANI, Dhara; PARIDA, Asish Kumar. **Uptake, impact, adaptation mechanisms, and phytoremediation of heavy metals in plants: Role of transporters in heavy metal sequestration.** Plant Physiology and Biochemistry, p. 109578, 2025.

POTHARAJU, Raju; ARUNA, M. **Heavy metal effect on aquatic environment and soil.** 2024

POURESMAIELI, Mahdi *et al.* **Recent progress on sustainable phytoremediation of heavy metals from soil.** Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 10, n. 5, p. 108482, 2022.

QIAO, Pengwei *et al.* **Process, influencing factors, and simulation of the lateral transport of heavy metals in surface runoff in a mining area driven by rainfall: A review.** Science of the Total Environment, v. 857, p. 159119, 2023.

ROCHA, Janaína Sobreira *et al.* **Bioacumulação De Metais Pesados Em Peixes: Impactos Sobre A Saúde Humana E Meio Ambiente.** Ciência Animal, v. 33, n. 1, p. 40-43, 2023.

ROCHA, Janaína Sobreira *et al.* **Bioacumulação De Metais Pesados Em Peixes: Impactos Sobre A Saúde Humana E Meio Ambiente.** Ciência Animal, v. 33, n. 1, p. 40-43, 2023.

SABREENA *et al.* **Fitorremediação de metais pesados: um recurso indispensável na tecnologia de remediação verde.** Plants , v. 11, n. 9, p. 1255, 2022.

SAIDON, Nadhirah B. *et al.* **Trophic transfer and biomagnification potential of environmental contaminants (heavy metals) in aquatic ecosystems.** Environmental pollution, v. 340, p. 122815, 2024.

SCHNEIDER, Marcio Roberto; BORTOLASSI, Ana Claudia Canalli. **Impactos sobre o solo e a água subterrânea e recomendações de boas práticas para estandes de tiro.** Águas Subterrâneas, v. 39, n. 1, p. e30302-e30302, 2025.

SHARMA, Jitendra Kumar *et al.* **Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment.** Frontiers in Plant Science, v. 14, p. 1076876, 2023.

SILVA, R. L.; SANTOS, M. A.; OLIVEIRA, P. S. **Heavy metal contamination health: A Brazilian perspective.** Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 248, p. 114295, 2023.

TCHOUNWOU, P. B. *et al.* **Industrial emissions and public health risks.** International Journal of Environmental Research, v. 15, n. 3, p. 445-456, 2021.

TUASAUDE. **Metais pesados: o que são e sintomas de intoxicação.** 2024.

Disponível em: <https://www.tuasaude.com/principais-sintomas-de-contaminacao-por-metais-pesados/>. Acesso em: 02 jun. 2025.

UFF. **Avaliação do solo em Brumadinho indica altas quantidades de metais pesados.** 09 jan. 2025. Disponível em: <https://www.uff.br/09-01-2025/avaliacao-do-solo-em-brumadinho-indica-altas-quantidades-de-metais-pesados/>. Acesso em:

02 jun. 2025.

ULLAH, A. *et al.* **Irrigation water quality and crop contamination.** Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 325, p. 107735, 2023.

WANG, J. *et al.* **E-waste and heavy metal pollution.** Environmental Science and Technology, v. 56, n. 8, p. 4321-4330, 2022.

WEBER, Alexandra *et al.* **The risk may not be limited to flooding: polluted flood sediments pose a human health threat to the unaware public.**

Environmental Sciences Europe, v. 35, n. 1, p. 1-19, 2023.

WEBER, J.; JAMROZ, E.; KOCOWICZ, A. *et al.* **Método otimizado de isolamento da fração de humina de material mineral do solo.** Environmental Geochemistry and Health, v. 44, p. 1289–1298, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01037-3>. Acesso em: 02 jun. 2025.

WU, X. *et al.* **Global trends in heavy metal pollution.** Nature Reviews Earth & Environment, v. 1, n. 3, p. 173-185, 2020.

YANG, Dawen; YANG, Yuting; XIA, Jun. **Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review.** Geography and Sustainability, v. 2, n. 2, p. 115-122, 2021.

YAO, Qinglu *et al.* **Co-effects of hydrological conditions and industrial activities on the distribution of heavy metal pollution in Taipu River, China.**

International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 19, n. 16, p. 10116, 2022.

YIN, K. *et al.* **Bioremediation strategies for heavy metals.** Trends in Biotechnology, v. 43, n. 1, p. 45-60, 2025.

ZHANG, Jie *et al.* **Critical review on ultrasound lysis-cryptic growth for sludge reduction.** Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 9, n. 5, p. 106263, 2021.

ZHOU, Y.; WANG, J.; LI, M. **Advances in sustainable technologies for heavy metal removal from wastewater: A review.** Journal of Cleaner Production, v. 411, p. 137284, 2023.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPESP) e ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais, pelo apoio acadêmico, científico e institucional que possibilitou a realização deste trabalho, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) Processo nº 312241/2022 de G.M.C.T.



Contribuições ao Estudo Anatômico do Caimbé (*Curatella Americana*)

Contributions to the Anatomical Study of Caimbé (*Curatella americana*)

Diego Lima de Souza Cruz

Professor doutor do curso de agronomia da Universidade Federal de Roraima (UFRR)

Anna Bárbara de Souza Cruz

Doutorado em ciências pela Universidade de São Paulo (USP)/ESALQ

Resumo: O presente estudo analisa as adaptações anatômicas do *Curatella americana* (caimbé), espécie nativa das savanas de Roraima, reconhecida por sua resistência a condições ambientais extremas, como solo pobre, clima seco e radiação solar intensa. A pesquisa foi conduzida no laboratório de microscopia da UFRR, com amostras coletadas em ambiente natural. O objetivo foi identificar características anatômicas foliares que contribuem para a sobrevivência da planta frente a estresses abióticos típicos da região. As análises revelaram estruturas adaptativas relevantes, como cutícula espessa impregnada de sílica e presença abundante de tricomas tectores e estrelados em ambas as faces da folha. Essas estruturas desempenham papel fundamental na redução da perda de água por transpiração, na reflexão da luz solar, e na proteção contra herbivoria e ação do fogo. A epiderme apresentou organização uniestratificada na face abaxial e biestratificada não contínua na adaxial. Foram identificados estômatos paracíticos localizados densamente entre as nervuras da face abaxial, muitas vezes protegidos por tricomas, o que favorece o controle da transpiração. Também foram observados idioblastos contendo cristais de oxalato de cálcio na forma de ráfides, que possuem função defensiva contra herbívoros e podem estar relacionados ao controle de íons de cálcio na planta. A folha de *C. americana* apresenta mesofilo isobilateral, diferente da organização dorsiventral observada em outras regiões do Brasil, indicando uma possível adaptação local. Esses dados anatômicos ajudam a explicar a alta eficiência hídrica da planta e sua persistência em ambientes adversos. O estudo contribui para o conhecimento morfoanatômico da espécie, fornece subsídios para futuras pesquisas taxonômicas e ecológicas e destaca a importância de compreender as adaptações vegetais para promover a conservação e o manejo sustentável das savanas tropicais.

Palavras-chave: estômatos paracíticos; *C. americana*; lâmina de bisturi.

Abstract: This study analyzes the anatomical adaptations of *Curatella americana* (commonly known as caimbé), a species native to the savannas of Roraima, recognized for its resilience to extreme environmental conditions such as poor soil, dry climate, and intense solar radiation. The research was conducted at the microscopy laboratory of UFRR, using samples collected from the natural environment. The objective was to identify leaf anatomical characteristics that contribute to the plant's survival under the typical abiotic stresses of the region. The analyses revealed significant adaptive structures, such as a thick cuticle impregnated with silica and an abundant presence of both tector and stellate trichomes on both leaf surfaces. These structures play a crucial role in reducing water loss through transpiration, reflecting solar radiation, and providing protection against herbivory and fire. The epidermis exhibited a uniseriate organization on the abaxial surface and a discontinuous biseriate organization on the adaxial surface. Paracytic stomata were densely located between the veins on the abaxial surface, often shielded by trichomes, facilitating effective transpiration control.

Idioblasts containing calcium oxalate crystals in the form of raphides were also observed, serving a defensive function against herbivores and potentially contributing to calcium ion regulation within the plant. The leaf of *C. americana* displays an isobilateral mesophyll, differing from the dorsiventral organization observed in other regions of Brazil, indicating a possible local adaptation. These anatomical data help explain the plant's high water-use efficiency and persistence in adverse environments. The study contributes to the morpho-anatomical understanding of the species, provides a basis for future taxonomic and ecological research, and underscores the importance of understanding plant adaptations to promote the conservation and sustainable management of tropical savannas.

Keywords: paracytic stomata; *C. americana*; scalpel blade.

INTRODUÇÃO

O *Curatella americana* (L.) G. Don, popularmente conhecido como caimbé, lixeira, pau-de-lixa ou sambaíba, é uma planta nativa das savanas de Roraima, um bioma que se destaca pela diversidade biológica e pela importância ecológica que exerce nas regiões tropicais do Brasil. Caracterizada por sua adaptabilidade a condições de solo pobre e clima semiárido, essa espécie tem se tornado um foco de estudos, especialmente no que se refere à sua ecologia e fisiologia. O caimbé é uma planta de importância fundamental para a manutenção da biodiversidade local, oferecendo suporte alimentar e habitat para diversas espécies da fauna da região. Contudo, a compreensão dos mecanismos biológicos que sustentam a sobrevivência do caimbé, particularmente a nível anatômico, ainda carece de investigações mais profundas, especialmente no contexto das savanas de Roraima.

O estudo anatômico de espécies vegetais, como o *C. americana*, é crucial para entender os mecanismos de adaptação das plantas a ambientes com alta variabilidade climática e de solo. A anatomia vegetal, ao revelar a estrutura interna das plantas, fornece informações valiosas sobre como as espécies lidam com estresses ambientais, como a seca, a radiação solar intensa e a escassez de nutrientes. No caso do caimbé, o estudo anatômico pode elucidar características de sua resistência à seca, como a presença de tecidos especializados no armazenamento de água, bem como as adaptações nas células de fotossíntese e nos sistemas vasculares responsáveis pela condução de água e nutrientes. Esse tipo de investigação não só auxilia no entendimento da biologia funcional da planta, mas também tem implicações diretas para a conservação de ecossistemas tropicais e para o manejo sustentável das áreas de savana.

Diversos estudos anatômicos realizados em espécies nativas de Roraima e de outras regiões tropicais têm destacado a importância da anatomia para a adaptação ao clima e ao solo da Amazônia. Por exemplo, estudos de Azevedo *et al.* (2017) sobre a anatomia da *Vochysia tucanorum*, outra planta das savanas, evidenciam como estruturas anatômicas, como a espessura da epiderme e a presença de tecidos de reserva, são determinantes para a sobrevivência em ambientes com altas taxas de insolação e baixa umidade. Da mesma forma, pesquisas como a de Tavares *et al.* (2019) sobre o *Mauritia flexuosa* ressaltam a importância das adaptações

anatômicas ao ambiente de várzea, sugerindo que esses estudos podem servir de modelo para plantas de ecossistemas similares, como o caimbé.

Portanto, o estudo anatômico do *Curatella americana* não é apenas uma oportunidade para entender as características biológicas dessa planta, mas também um passo fundamental para promover a conservação e o manejo adequado de suas populações, que são essenciais para o equilíbrio ecológico das savanas de Roraima. Este estudo busca explorar as adaptações anatômicas do caimbé, com ênfase em suas possíveis relações com a resistência a estresses abióticos típicos da região, além de discutir suas implicações para o entendimento dos processos ecológicos e ambientais da savana roraimense.

METODOLOGIA

O estudo foi realizado no laboratório de microscopia óptica do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Roraima (CAA-UFRR) conforme Imagem 01. Foram coletadas amostras de folhas de plantas de *C. americana* (Imagem 02) em ambiente natural de savana no município de Boa Vista, estado de Roraima, nas seguintes coordenadas geográficas (02°52'18.17"N e 60°42'36.11"O).

Imagem 1 - Contextualização geográfica da área de estudo.



Fonte: própria.

Imagem 2 - Espécime de *C. americana* selecionado para a coleta das folhas.



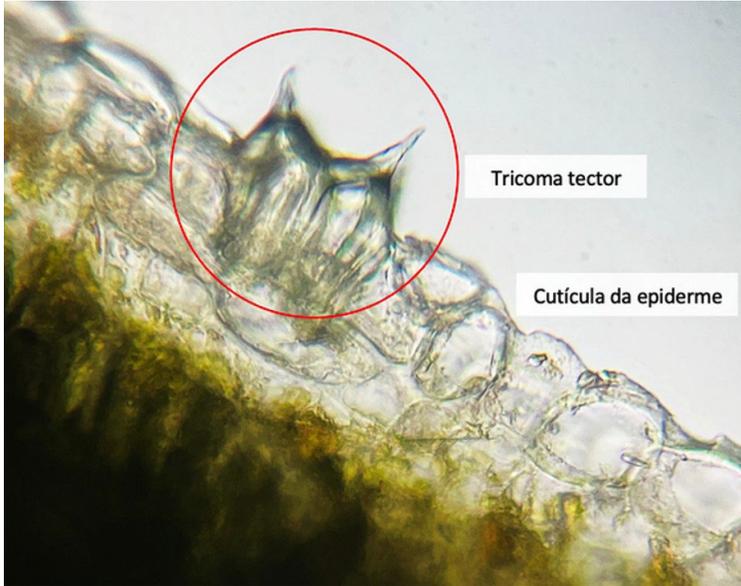
Fonte: própria.

Foram coletadas 15 folhas e folhas foram acondicionadas em recipientes plásticos evitando-se qualquer tipo de dano mecânico. Estas folhas foram levadas imediatamente ao laboratório de microscopia. Foram feitos cortes paradérmicos e transversais no limbo e no pecíolo foliares à mão livre utilizando-se uma lâmina de bisturi. Logo em seguida foi feita a preparação da lâmina e visualização das estruturas anatômicas desta espécie com um microscópio óptico de aumento de até 400 vezes. As fotografias foram obtidas por meio de câmera de celular.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

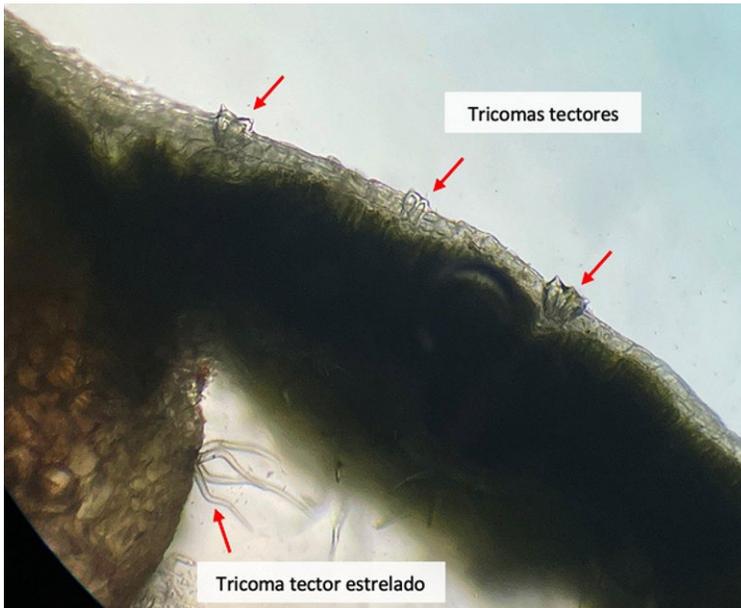
A identificação das estruturas foi baseada em comparações com estudos científicos sobre a anatomia desta espécie. As imagens 03 e 04 trazem uma das características adaptativas mais importantes desta espécie. A aspereza de suas folhas está relacionada com uma cutícula impregnada de sílica e repleta de tricomas que podem ser do tipo tector e estrelado (estes com braços curtos ou longos). O corte transversal mostrou uma cutícula espessa cobrindo a face adaxial. Em *C. americana*, a epiderme é uniestratificada na face abaxial e biestratificada não contínua na face adaxial (FERREIRA *et al.*, 2015).

Imagem 3 - Detalhe do tricoma tector e cutícula da epiderme do limbo foliar adaxial de *C. americana* obtida por corte transversal.



Fonte: própria.

Imagem 4 - Corte transversal da folha de *C. americana* mostrando o tricoma tector na face adaxial, tricoma estrelado na face abaxial e a cutícula das células da epiderme.



Fonte: própria.

A epiderme é um tecido multifuncional formado por diferentes tipos de células especializadas, como as que constituem os estômatos e os tricomas, cuja estrutura e localização influenciam nas relações hídricas e nas trocas gasosas que ocorrem nas folhas (Rasmunssen, 1987).

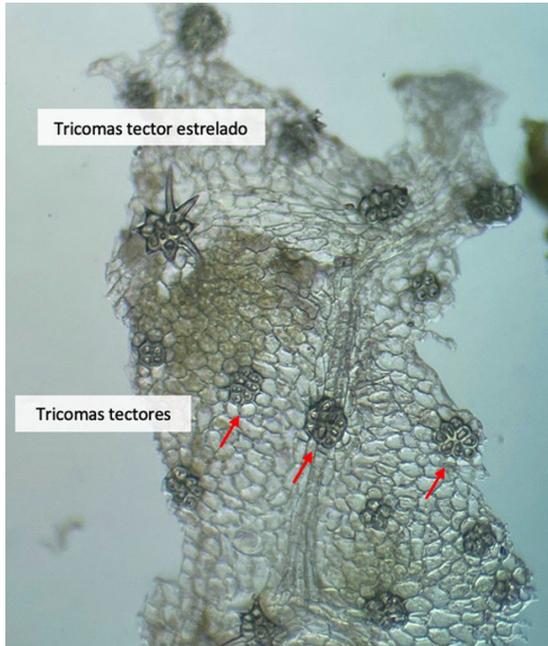
Tricomas tectores estão também presentes na lâmina foliar de oito espécies, sendo que em cinco delas, *By. crassifolia*, *By. verbascifolia*, *Bo. vigilioides*, *Cu. americana* e *X. aromatica*, estas estruturas ocorrem em ambas as faces (Ferreira *et al.*, 2015) evidenciando uma estratégia de sobrevivência comum de espécies submetidas ao fogo como o lavrado.

Este tipo de tricoma e cutícula altamente silicificados estão relacionadas a uma estratégia evolutiva de impedimento à herbivoria e proteção contra o fogo. Mesmo assim, em alguns locais da Amazônia, existem épocas do ano em que *C. americana* é altamente atacada por lagartas desfolhadoras (Ferreira *et al.*, 2015). A sua aspereza faz com que suas folhas sejam empregadas como papel de lixa, no polimento e desgaste de objetos de madeira (Guimarães *et al.*, 1980)

Em *C. americana* a presença de densos indumentos na epiderme pode representar uma importante adaptação a ambientes xéricos, tendo em vista que essas estruturas aumentam a reflexão da irradiação solar (Holmes; Keiler, 2002) e podem, portanto, contribuir para a diminuição da temperatura foliar (Ehleringer; Mooney 1978; Ehleringer 1983). A presença de tricomas na epiderme também contribui para um aumento da espessura da camada de ar parado revestindo a superfície da folha e, como consequência, restringe a perda de vapor de água dos estômatos para a atmosfera (Fahn; Cutler 1992; Larcher, 2006). Adicionalmente, pode oferecer proteção contra herbivoria (Woodman; Fernandes, 1991) ou ao ataque de patógenos (Valkama *et al.*, 2005).

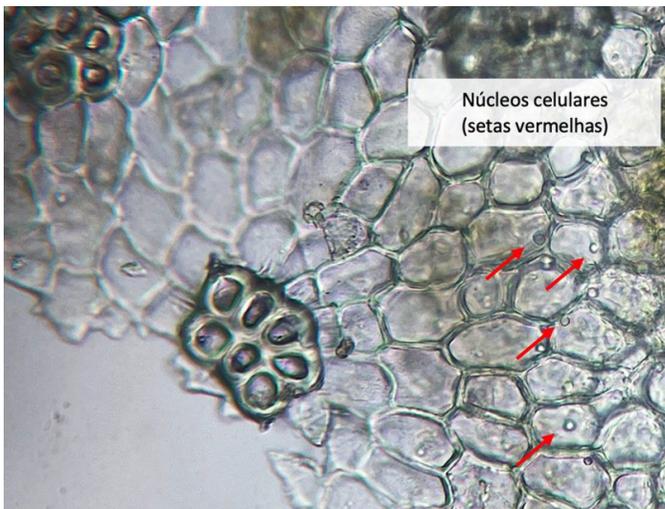
O conhecimento sobre a anatomia das plantas, além de subsidiar estudos taxonômicos e de refletir aspectos filogenéticos, é essencial para o melhor entendimento das adaptações das plantas a um determinado ambiente. A estrutura e organização da lâmina foliar afeta os processos de regulação e a magnitude dos fluxos foliares de água e CO₂. Alterações no tamanho e na forma da lâmina foliar, bem como seu grau de esclerofilia, são características que estão comumente associadas com a história de vida, distribuição da espécie e requerimentos de recursos pelas plantas e, portanto, estão sob forte pressão de seleção (Ferreira *et al.*, 2015).

Imagem 5 - Corte paradérmico do limbo foliar de *C. americana* evidenciando os tricomas tectores e estrelados na face abaxial.



Fonte: própria.

Imagem 6 - Corte paradérmico do limbo foliar de *C. americana* evidenciando o formato das células vegetais, o tricoma tector e os núcleos celulares. Esta espécie possui células epidérmicas com parede delgada, de formato retangular a arredondado em ambas as faces (Ferreira *et al.*, 2015).



Fonte: própria.

Imagem 7 - Idioblastos contendo cristais de oxalato de cálcio na forma de ráfides.

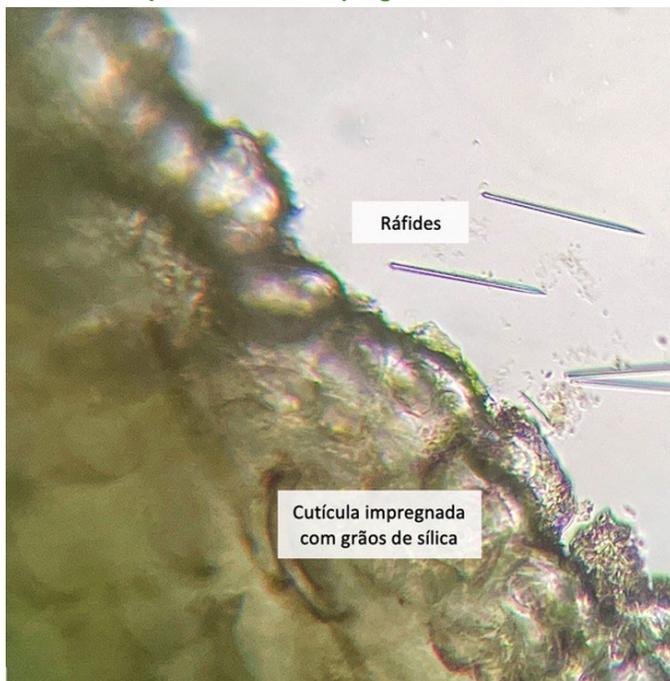
Fonte: própria.

Outra característica importante desta espécie do ponto de vista ambiental é a presença de idioblastos de reserva de cristais de oxalato de cálcio. Idioblastos são células vegetais que se diferenciam das células vizinhas, podendo ter várias funções. Eles podem ser encontrados em qualquer tecido ou sistema de tecidos das plantas. Podem possuir função de armazenar reservas, materiais excretórios, pigmentos e minerais, conferir rigidez ou capacidade de suporte, como nas folhas e caules de plantas, secreção de muco ou de outras substâncias, armazenamento de óleos essenciais ou de lipídios, defesa contra a herbivoria através da presença de ráfides, podem conter óleo, látex, goma, resina, tanino ou pigmentos, podem conter cristais minerais, como oxalato de cálcio, carbonato ou sílica (Marquiafável *et al.*, 2007).

O acúmulo de cristais de oxalato de cálcio ocorre com frequência nos tecidos foliares das plantas de savanas. Alguns autores sugerem que desempenhem um papel de defesa contra herbivoria, pois reduziriam a digestibilidade das folhas ou, dependendo do tipo/forma, poderiam levar à morte do herbívoro (Konno *et al.*, 2014). Entretanto, vale ressaltar que o papel central dos cristais de oxalato de cálcio em plantas de ambientes sazonais ainda não está totalmente elucidado (Franceschi e Nakata 2005), sendo provável que, para as espécies em estudo, esteja

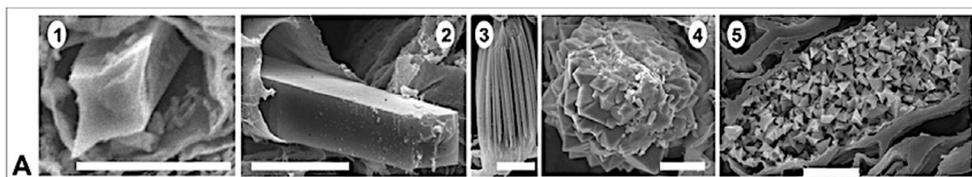
relacionado a mais de uma função na proteção do tecido foliar. É provável que a presença expressiva de cristais nessa região ocorra porque o xilema é o principal tecido de entrada de íons de cálcio (Ca^+), e a precipitação na forma de cristais em torno das nervuras impediria o acúmulo deste nutriente em sua forma iônica na célula, o que poderia comprometer a regulação e a integridade de processos celulares (Franceschi; Nakata 2005). É importante salientar que algumas mudanças anatômicas podem ocorrer de acordo com o ambiente, conferindo adaptações necessárias às condições edafoclimáticas (Ferreira *et al.*, 2015).

Imagem 8 - Cristais de oxalato de cálcio na forma de ráfides e cutícula da epiderme foliar impregnada com sílica.



Fonte: própria.

Figura 9 - Morfologia de cristais de oxalato de cálcio obtidas por microscopia eletrônica de varredura, sendo: 1) Prisma; 2) Estiloide; 3) Ráfides; 4) Drusas; 5) Arena de cristais. Fonte: Perez *et al.* (2017).

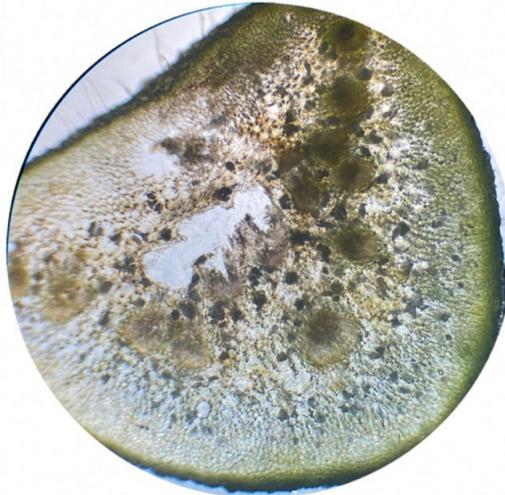


Fonte: própria.

As ráfides são cristais de oxalato de cálcio em formato de agulha que são armazenados como feixes (Saito; Lima, 2009). Por serem perfurantes, quando em

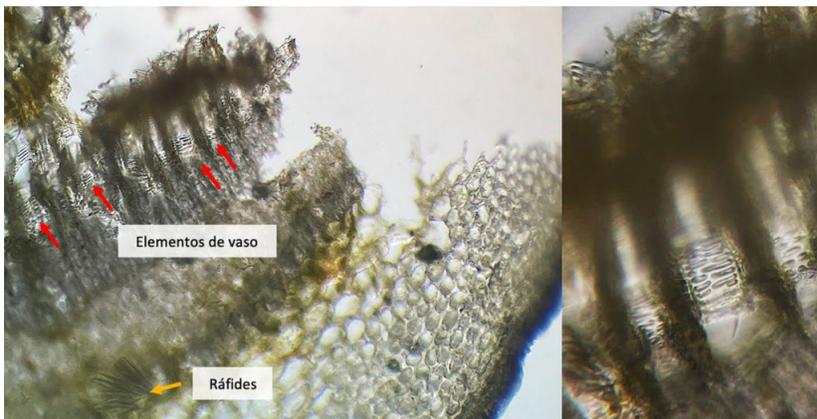
contato com as mucosas, destroem as células causando edemas, dor e queimação de lábios, língua, palato e faringe, sialorreia, disfagia, asfixia, cólicas abdominais, náuseas, vômitos e diarreia. O mecanismo de reação alérgica não é apenas mecânico, possivelmente é mediado pela presença de substâncias irritantes, que atuam juntamente com os cristais de oxalato de cálcio (Saito; Lima, 2009).

Imagem 10 - Corte transversal do pecíolo foliar de *C. americana* evidenciando diversos idioblastos contendo ráfides (pontos escuros).



Fonte: própria.

Imagem 11 - Corte transversal do pecíolo foliar de *C. americana* evidenciando os elementos de vaso do xilema (setas vermelhas) e ráfides de oxalato de cálcio (seta amarela).

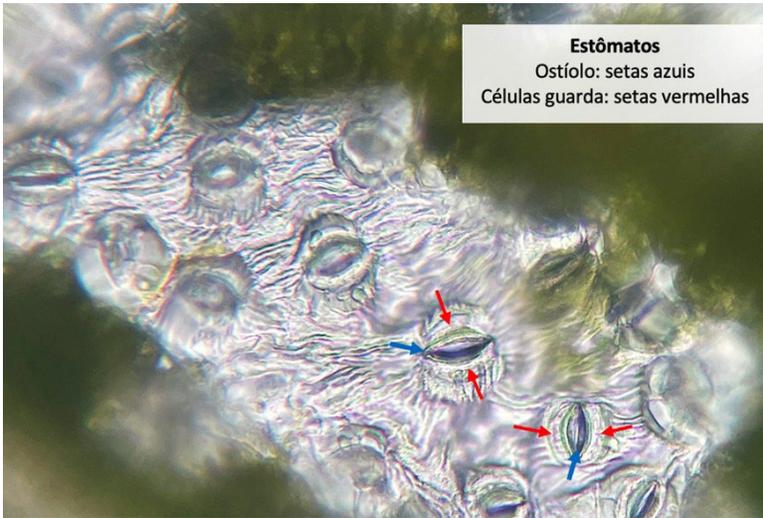


Fonte: própria.

Os elementos de vaso são células que constituem o xilema, o tecido condutor de água e nutrientes das plantas. São também chamados de membros de vaso ou vasos do xilema. Suas características incluem: a) São células alongadas, com

paredes secundárias e perfuradas; b) São mais curtos e mais largos do que os traqueídes; c) São encontrados na maioria das angiospermas (plantas com flores) e em algumas gimnospermas; d) São a principal característica que distingue a “madeira dura” das angiospermas da “madeira macia” das coníferas. Dentre suas funções podemos destacar: 1) Formam grandes tubos chamados vasos, onde a seiva circula livremente através das perfurações; 2) São empilhados extremidade com extremidade, formando um vaso, que é um condutor com paredes terminais abertas; c) São responsáveis pelo transporte de água e nutrientes minerais da raiz até as folhas e outras partes da planta (Montaño-Arias *et al.*, 2013).

Imagem 12 - Detalhamento dos estômatos na face abaxial do limbo foliar de *C. americana* obtida por corte paradérmico.



Fonte: própria.

Imagem 13 - Detalhamento localização dos estômatos entre as nervuras de vasos condutores na face abaxial do limbo foliar de *C. americana* obtida por corte paradérmico.



Fonte: própria.

A classificação dos estômatos mostrou variabilidade entre os tipos existentes, podendo mais de um tipo estar presente na mesma epiderme. Porém, a localização predominante na face abaxial, algumas vezes encobertos por tricomas, ou a formação em determinadas espécies de uma câmara supraestomática, característica geralmente observada em epífitas de ecossistemas secos, é considerada uma estratégia para reduzir a transpiração (Rasmunssen, 1987). Em *C. americana* os estômatos se encontram densamente agrupados entre as nervuras. Estes apresentam uma projeção da parede periclinal externa das células-guarda, que delimita uma pequena câmara supraestomática formada pela presença de proeminentes cristas supraestomáticas (Ferreira *et al.*, 2015).

Seus estômatos são paracíticos, situados no mesmo nível das células epidérmicas. Os estômatos paracíticos, são aqueles que apresentam duas células subsidiárias com seus eixos maiores dispostos paralelamente ao das células-guarda. Os estômatos diacíticos, por sua vez, apresentam suas células subsidiárias dispostas de maneira perpendicular (Ferreira *et al.*, 2015). Importante salientar que este trabalho contribui com novas imagens mais detalhadas. Algumas estruturas identificadas em outros trabalhos não são muito detalhadas.

Entre as arbóreas encontradas nas savanas de Roraima, *C. americana* tem especial destaque pela frequência com que ocorre (Miranda; Absy, 2000; Barbosa; Fearnside, 2004). Estudos realizados nas savanas da Venezuela relatam que essa espécie possui alta eficiência intrínseca no uso da água, especialmente nos períodos de maior déficit hídrico, além de manter a taxa de fotossíntese elevada e resistir a baixos potenciais hídricos foliares (Medina; Francisco, 1994). A análise anatômica de suas folhas esclarece como o arranjo dos tecidos pode auxiliar a enfrentar os distintos estresses do ambiente. *C. americana* coletada em Roraima possui mesofilo isobilateral, diferente do observado para essa espécie em outras savanas do Brasil, em que a organização do mesofilo aparece como dorsiventral (Bieras; Sajo, 2009), com as células paliçádicas ocupando a maior parte do espaço do mesofilo. A posição dos estômatos de *C. americana*, na face abaxial, situados entre as nervuras e dispostos em densos agrupamentos, pode influenciar na condutância estomática e velocidade de perda de água pela planta. A proximidade entre os estômatos e, como consequência, das câmaras subestomáticas pode causar uma sobreposição das rotas de difusão de vapor de água, do interior do mesofilo para a atmosfera, dificultando a saída de água da planta e, como consequência, reduzindo a transpiração (Larcher, 2006). Se por um lado essas características constitutivas presentes nas plantas podem ser utilizadas para diferenciar espécies dentro de um táxon, por outro podem ser vistas como mais um fator que está favorecendo o estabelecimento destas em determinados ambientes (Ferreira *et al.*, 2015).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho traz uma contribuição ao estudo anatômico de *C. americana* ao aumentar a gama de imagens de estruturas importantes desta espécie;

O estudo anatômico de *C. americana* pode elucidar algumas estratégias evolutivas que garantem o bom sucesso desta espécie nos ambientes de savana ou cerrado;

Este estudo anatômico pode subsidiar estudos taxonômicos e morfológicos sobre esta espécie;

Mais estudos são necessários para identificar a herbivoria específica de lagartas que esta espécie sofre mesmo tendo como estratégia o acúmulo de cristais de oxalato de cálcio e a cutícula impregnada com sílica;

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, A. A., ET AL. (2017). “**Anatomical adaptations of *Vochysia tucanorum* to high-light tropical environments.**” *Journal of Tropical Biology*, 35(3), 215-226. doi:10.1016/j.jtbiol.2017.03.005

BIERAS, A. C.; SAJO, M. G. **Leaf structure of the Cerrado (Brazilian savanna) woody plants.** *Trees*, v. 23, p. 451-471, 2009.

EHLERINGER, J. R. **Characterization of a glabrate *Encelia farinosa* mutant: morphology, ecophysiology, and field observations.** *Oecologia*, v. 57, p. 303-310, 1983.

EHLERINGER, J. R.; MOONEY H. A. **Leaf Hairs: Effects on Physiological Activity and Adaptive Value to a Desert Shrub.** *Oecologia*, v. 37, p. 183-200, 1978.

FAHN, A.; CUTLER, D. F. **Xerophytes.** Berlin, Gebrüder Borntraeger, 1992, 176p.

FERREIRA, C. S.; CARMO, W. S. D.; GRACIANO-RIBEIRO, D.; OLIVEIRA, J. M. F. D.; MELO, R. B. D.; FRANCO, A. C. **Leaf anatomy of eleven dominant woody species in the savannas of Roraima.** *Acta Amazonica*, v. 45, p. 337-346, 2015.

FRANCESCHI, V. R.; NAKATA, P. A. **Calcium Oxalate in Plants: Formation and Function.** *Annual Review of Plant Biology*, v. 56, p. 41-71, 2005.

HOLMES, M. G.; KEILLER, D. R. **Effects of pubescence and waxes on the reflectance of leaves in the ultraviolet and photosynthetic wavebands: a comparison of a range of species.** *Plant, Cell and Environment*, v. 25, p.85–93, 2002.

KONNO, K.; INOUE, T. A.; NAKAMURA, M. **Synergistic defensive function of raphides and protease through the needle effect.** *PLOS ONE*, v. 9, p. 30-45, 2014.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal.** São Paulo, RIMA, 2006, 550p.

MARQUIAFÁVEL, F. S.; CANAVACI, G. M. C. B.; DE PÁDUA TEIXEIRA, S. **Idioblastos secretores em espécies brasileiras de *Indigofera* L.(Leguminosae, Papilionoideae).** *Revista Brasileira de Biociências*, v. 5, p. 354-356, 2007.

MEDINA, E.; FRANCISCO, M. **Photosynthesis and water relations of savanna tree species differing in leaf phenology.** *Tree Physiology*, v.14, p. 1367-1381, 1994.

MIRANDA, I. S.; ABSY, M. L. **Fisionomia das Savanas de Roraima.** *Acta Amazonica*, v.30, p. 423-440, 2000.

MONTAÑO-ARIAS, S. A.; CAMARGO-RICALDE, S. L.; PÉREZ-OLVERA, C. de la Paz. **Ecoanatomía de los elementos de vaso de la madera de cinco especies del género *Mimosa* (Leguminosae-Mimosoideae).** *Botanical Sciences*, v. 91, p. 1-10, 2013.

PÉREZ, L.; MASSAFERRO, J.; CORREA-METRIO, A.; SANDOVAL, K. Z. R. **Paleobiomarcadores lacustres neotropicales.** México: CONACYT, 2017, 221 p.

RASMUNSEN, H. **Orchid stomata - structure, differentiation, function, and phylogeny.** In: Arditti, J. (Ed.). *Orchid Biology: Reviews and Perspectives*, IV. Cornell University Press, New York, p.105-138, 1987.

SAITO, S. R. M.; LIMA, V. F. G. **Estudo anatômico e variação na concentração de idioblastos com ráfides em folhas de Araceae, mantidas sob diferentes condições de luminosidade.** Revista Saúde, v. 3, p. 25-32, 2009.

TAVARES, M. S. **Anatomical and ecological adaptations of *Mauritia flexuosa* in Amazonian floodplain ecosystems.** Trees: Structure and Function, v. 33, 1839-1850, 2019. doi:10.1007/s00468-019-01960-4.

VALKAMA, E.; KORICHEVA, J.; SALMINEN, J. P.; HELANDER, M.; SALONIEMI, I.; SAIKKONEN, K.; PIHLAJA, K. **Leaf surface traits: overlooked determinants of birch resistance to herbivores and foliar microfungi?** Trees, v. 19, p. 191-197, 2005.

WOODMAN, R. L.; FERNANDES, G. W. **Differential mechanical defense: herbivory, evapotranspiration, and leaf-hairs.** OIKOS, v. 60, p. 11-19, 1991.



Análise de Processo Erosivo em Talude Urbano-Ambiental na Sub-Bacia do Igarapé Água Branca – Manaus/AM

Analysis of Erosive Processes on an Urban-Environmental Slope in the Sub-Basin of the Água Branca Stream – Manaus, Amazonas

Djalma Almeida Araújo Júnior

Arquiteto e Urbanista, Eng. Civil, Eng. Eletricista, Eng. Seg. do Trabalho, Tecnólogo em Gestão e Saneamento Ambiental. Pós-graduado em Engenharia Elétrica, Eletrônica e Eletromecânica. Técnico Industrial em Eletrotécnica, Eletrônica, Telecomunicações, Automação e Mecânica. Acadêmico do curso Técnico de Mineração. Inscrito nos Conselhos: CREA-AM | CAU/AM | CRQ/AM | CFT/AM

Resumo: Este estudo apresenta uma análise técnico-geotécnica de um processo erosivo ativo em talude localizado na transição entre área urbana e Área de Preservação Permanente (APP) na sub-bacia do igarapé Água Branca, Manaus/AM. A partir de observações de campo e análises laboratoriais de amostras de solo, o estudo identificou fatores como relevo acidentado, solos lateríticos pouco coesivos e ausência de medidas de drenagem como indutores da erosão. Testes microscópicos revelaram estruturas lateríticas, concreções e baixa permeabilidade, classificando os solos como aquitardes. As medidas recomendadas incluem bioengenharia, drenagem, revegetação e recuperação da APP. A pesquisa ressalta a importância do planejamento integrado na gestão de áreas urbanas amazônicas.

Palavras-chave: erosão; APP; estabilidade de taludes; hidrogeologia; laterita.

Abstract: This paper presents a geotechnical analysis of an active erosive process in a slope located in the urban-environmental transition zone in the Água Branca stream sub-basin, Manaus/AM. Through field observation and laboratory testing of soil samples, the study identified steep terrain, poorly cohesive lateritic soils, and lack of drainage as key contributors to erosion. Microscopic analysis revealed lateritic structures, iron concretions, and low permeability, classifying the soils as aquitards. Proposed measures include soil bioengineering, drainage structures, and ecological restoration. The research underscores the need for integrated planning in urban development within the Amazon region.

Keywords: erosion; permanent preservation area; slope stability; hydrogeology; laterite.

INTRODUÇÃO

A urbanização desordenada da zona oeste de Manaus tem gerado desequilíbrios ambientais severos em áreas de transição urbano-naturais. O igarapé Água Branca, um dos últimos cursos d'água com potencial de balneabilidade da cidade, vem sofrendo com processos erosivos intensificados pela supressão vegetal, intervenções sem controle técnico e ausência de infraestrutura de drenagem. O presente estudo objetiva analisar os fatores técnicos e ambientais associados a um talude instável na região e propor medidas sustentáveis de contenção e recuperação.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia compreendeu:

- Levantamento topográfico e planialtimétrico detalhado;
- Análise morfológica por sensoriamento remoto (Google Earth);
- Inspeção técnica in loco;
- Ensaio de microscopia de solo (três pontos de coleta);
- Classificação dos solos segundo o SiBCS, SUCS e MCT;
- Avaliação hidrogeológica (aquitarde/aquiclude);
- Fundamentação normativa (ABNT NBR 11682:2009, Lei nº 12.651/2012, CONAMA 429/2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características Físico-Geotécnicas do Talude Estudado

O talude analisado localiza-se em uma zona de transição urbano-ambiental da sub-bacia do igarapé Água Branca (Manaus/AM), apresentando:

- Declividades superiores a 30%, com cortes não estabilizados;
- Exposição do solo argiloso ou laterítico, sem cobertura vegetal;
- Ausência de estruturas de contenção e drenagem superficial;
- Indícios de erosão laminar e em sulcos, que evoluem para ravinas e assoreamento.

Essas condições geotécnicas agravam o risco de instabilidade e comprometem a funcionalidade ecológica da APP a jusante.

Análise Microscópica dos Solos (3 Pontos de Coleta)

Os testes realizados nas amostras de solo coletadas revelaram:

- Ponto 1: Latossolo Ferrífero/Laterítico com estrutura blocosa, concreções ferruginosas e baixa permeabilidade → Aquitarde;
- Ponto 2: Plintossolo Háplico com aspecto nodular, concreções e drenagem deficiente → Aquitarde/Aquiclude;
- Ponto 3: Latossolo Vermelho-Amarelo, textura argilosa, compactado e altamente intemperizado → Aquitarde.

Em comum, todos os solos apresentam textura fina, baixa porosidade efetiva e elevada retenção superficial de água, favorecendo o escoamento superficial concentrado e contribuindo para a erosão acelerada.

Implicações Hidrogeológicas e Erosivas

- Os solos funcionam como barreiras naturais à percolação profunda, acumulando água nas camadas superficiais.
- A ausência de vegetação e de infraestrutura de drenagem direciona o fluxo pluvial para áreas sensíveis da APP, carreando sedimentos e matéria orgânica.
- Isso gera assoreamento no leito do igarapé, perda de profundidade e aumento do risco de enchentes urbanas.
- A turbidez e a alteração físico-química da água comprometem diretamente a fauna aquática e a função de barreira ecológica da mata ciliar.

Influência de Ações Antrópicas

- Supressão vegetal, movimentação de terra não estabilizada e obras viárias em níveis distintos aumentam a energia do escoamento superficial.
- A ausência de manutenção em canaletas, dissipadores ou PRADs (Planos de Recuperação de Áreas Degradadas) contribui para a evolução de processos erosivos.
- A urbanização desordenada impacta diretamente a recarga dos aquíferos e o equilíbrio hidrológico local.

Diagnóstico Integrado

- A área apresenta potencial erosivo crítico, com solos frágeis, morfologia acidentada e intensa ação de escoamento superficial sem controle.
- Os processos identificados comprometem a sustentabilidade hídrica e ambiental da sub-bacia do igarapé Água Branca, especialmente se não forem adotadas medidas corretivas com urgência.

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E HIDROLÓGICA DOS SOLOS

As análises microscópicas dos solos dos pontos 1, 2 e 3 revelaram as seguintes características:

- Ponto 1 – Latossolo Ferrífero/Laterítico Sol argiloso de alta plasticidade (CH), com coloração vermelho-alaranjada, concreções ferruginosas e estrutura blocosa. Baixa permeabilidade → aquitarde.
- Ponto 2 – Plintossolo Háplico com concreções Granulometria pseudoagregada, presença de ferro-manganês, nodularidade acentuada. Comportamento aquitarde/aquiclude. Risco elevado de encharcamento e concentração de fluxo.
- Ponto 3 – Latossolo Vermelho-Amarelo Textura argilosa, cor intensa,

estrutura compactada e homogênea. Percolação vertical reduzida. Classificação aquitarde.

Esses solos são altamente intemperizados e sensíveis à erosão superficial quando desprotegidos, como observado no local do estudo.

DINÂMICA EROSIVA E CONSEQUÊNCIAS AMBIENTAIS

A ausência de cobertura vegetal e contenções em taludes íngremes favorece processos como:

- Erosão laminar e em sulcos;
- Formação de ravinas;
- Arraste de partículas finas e matéria orgânica;
- Assoreamento e degradação da APP e do igarapé Água Branca.

O transporte contínuo desses sedimentos compromete a profundidade e o fluxo do canal hídrico, aumentando riscos de inundação e perdas ecológicas.

MODELO CONCEITUAL DE FLUXO SUBTERRÂNEO

A sobreposição dos perfis de solo (Ponto 1 → 3) indica formação de camadas com baixa a nula percolação vertical, configurando um perfil de barreira geológica natural à recarga do aquífero.

MEDIDAS PROPOSTAS

Com base nas características levantadas, são recomendadas:

- Bioengenharia de solos: implantação de gramíneas estabilizadoras, biomantas e rip-rap;
- Sistemas de drenagem superficial: canaletas, dissipadores, escadas hidráulicas e caixas de retenção;
- Reflorestamento de APP com espécies nativas;
- Elaboração de PRAD conforme legislação vigente;
- Monitoramento contínuo da turbidez e assoreamento do igarapé;
- Educação ambiental nas comunidades lindeiras.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A interação entre solos tropicais altamente intemperizados, relevo acidentado e pressão urbana desordenada resulta em um cenário de alta vulnerabilidade geoambiental. Os solos analisados, com baixa permeabilidade e comportamento

de aquitarde, favorecem o escoamento superficial concentrado e a instabilidade de taludes. A contenção e recuperação da APP do igarapé Água Branca dependem de intervenções técnicas e ecológicas integradas, sob risco de comprometimento irreversível da bacia hidrográfica.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 11682: **Estabilidade de taludes**. Rio de Janeiro, 2009.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Institui o novo Código Florestal (...). Diário Oficial da União, 25 maio 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 15 jul. 2025.

CONAMA. Conselho Nacional Do Meio Ambiente. **Resolução nº 429, de 28 de fevereiro de 2011**. Dispõe sobre a metodologia de recuperação das Áreas de Preservação Permanente – APPs. Diário Oficial da União, Brasília, DF, nº 43, p. 76, 2 mar. 2011. EMBRAPA. Manual De Recuperação De Áreas Degradadas. 2013.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. 2018.

TRINDADE, W. C.; MORAES, F. A. **Solos Tropicais**. UnB, 2016.

PINTO, C. de S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 4. ed. 2006.

SILVA, R. M. da *et al.* “**Caracterização morfológica e física de solos sob influência de processos erosivos**.” RBCS, v. 34, n. 6, 2010.

RIBEIRO, A. A. *et al.* **Avaliação ambiental da sub-bacia do igarapé Água Branca**. X Congresso ABRH, 2020.

CASTRO, T. M. S. *et al.* Revista Verde, v. 17, n. 1, p. 141–147, 2022.

TUCCI, C. E. M. Drenagem Urbana. 3. ed. ABRH, 2008.

ANEXOS

Anexo A – Registro Fotográfico da Coleta de Amostras

As imagens a seguir documentam o momento da coleta das amostras de solo, realizadas em três pontos distintos da área de estudo, evidenciando a exposição do solo, a ausência de cobertura vegetal e o tipo de material coletado em campo.

- Coleta Ponto 1: solo argiloso exposto, coloração avermelhada intensa.
- Coleta Ponto 2: solo superficial com presença de detritos e cobertura esparsa.
- Coleta Ponto 3: solo amarelo-avermelhado exposto próximo a superfície impermeabilizada.

Coleta ponto 3



Coleta ponto 2

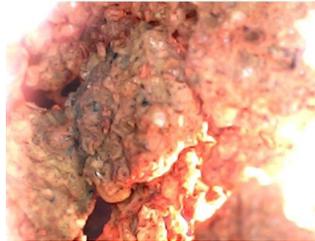


Coleta ponto 1



Anexo B – Microscopia de Solos (Amostras 1, 2 e 3)

Microscopias realizadas com aumento técnico revelam características físico-morfológicas essenciais para a análise da estabilidade e suscetibilidade à erosão dos solos.



B.1 – Ponto de Coleta 1

- Solo com agregados blocosos irregulares.
- Presença de concreções ferruginosas e lateríticas.
- Indicativo de Latossolo Ferrífero de alta coesão quando seco, mas instável quando saturado.



B.2 – Ponto de Coleta 2

- Grânulos escuros com inclusões claras e aspecto nodular.
- Estrutura densa e endurecida, típica de Plintossolo Háplico com oxidróxidos.
- Elevado potencial de encharcamento.



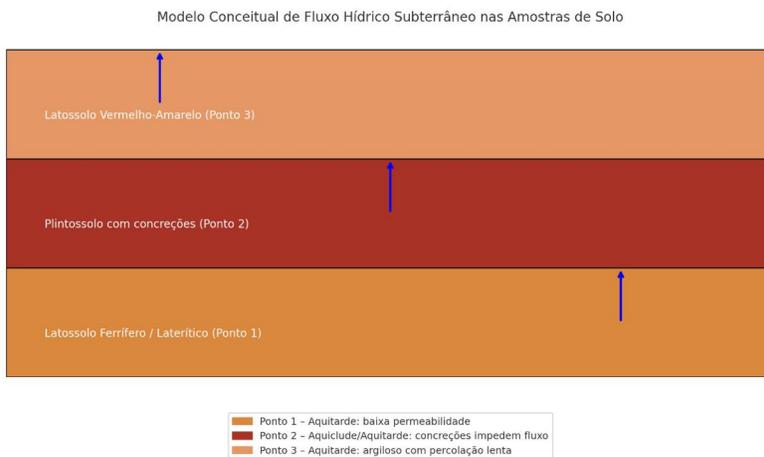
B.3 – Ponto de Coleta 3

- Agregados pseudoesféricos em vermelho-amarelo intenso.
- Textura argilosa compacta com brilho difuso (cimento ferroaluminício).
- Indicação de Latossolo Vermelho-Amarelo, altamente intemperizado e sensível à erosão.

Anexo C – Quadro Comparativo: Classificação Hidrogeológica dos Solos

A tabela a seguir resume a classificação dos solos nos três pontos de coleta, com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) e sua interpretação hidrogeológica:

| Ponto | Tipo de Solo (SiBCS) | Classificação Hidrogeológica | Observações Principais |
|-------|---------------------------------------|------------------------------|---|
| 1 | Latossolo Ferrífero/ Laterítico | Aquitarde | Intemperizado, coesivo, baixa transmissividade |
| 2 | Plintossolo Háplico com concreções | Aquitarde / Aquiclude | Endurecido, nodular, risco de encharcamento |
| 3 | Latossolo Vermelho- -Amarelo | Aquitarde | Textura argilosa, restrição à percolação vertical |



Anexo D – Modelo Conceitual de Fluxo Subterrâneo nas Amostras de Solo

O esquema abaixo apresenta a estratificação dos perfis de solo analisados, demonstrando o comportamento hidrogeológico (fluxo vertical restrito e camadas de bloqueio natural):

Legenda do Modelo Conceitual:

- Ponto 1 (base): Latossolo Ferrífero – baixa permeabilidade.
- Ponto 2 (meio): Plintossolo – presença de concreções limitando o fluxo.
- Ponto 3 (topo): Latossolo Vermelho-Amarelo – percolação vertical lenta.



Arte e Meio Ambiente: Uma Abordagem Sustentável na Prática Artística

Art and the Environment: A Sustainable Approach to Artistic Practice

Sebastião Carlos Galdêncio

Resumo: Este trabalho aborda a relação entre arte e meio ambiente a partir de uma perspectiva sustentável na prática artística contemporânea. Discutem-se os desdobramentos sociais da arte, a emergência da ecoarte e a relevância da reutilização de materiais recicláveis como expressão estética e ferramenta de conscientização. Por meio de uma revisão da literatura, analisam-se experiências que aliam educação ambiental e produção artística como estratégias pedagógicas transformadoras. O estudo evidencia que a arte sustentável pode promover reflexões profundas sobre consumo, descarte e responsabilidade ecológica, contribuindo para a formação de sujeitos críticos e engajados com a preservação do planeta.

Palavras-chave: arte sustentável; ecoarte; meio ambiente; educação ambiental; materiais recicláveis.

Abstract: This study explores the relationship between art and the environment from a sustainable perspective within contemporary artistic practice. It discusses the social implications of art, the emergence of eco-art, and the significance of reusing recyclable materials as both an aesthetic expression and a tool for raising awareness. Through a literature review, it analyzes experiences that combine environmental education and artistic production as transformative pedagogical strategies. The study highlights that sustainable art can foster deep reflections on consumption, waste, and ecological responsibility, contributing to the development of critical individuals engaged in the preservation of the planet.

Keywords: sustainable art; eco-art; environment; environmental education; recyclable materials.

INTRODUÇÃO

A relação entre arte e meio ambiente configurou-se, nas últimas décadas, como uma importante vertente reflexiva no campo da produção artística contemporânea, especialmente diante das crescentes preocupações globais com a crise ambiental. Delimitou-se, assim, um campo de investigação voltado à prática artística que incorporasse materiais recicláveis, discursos ecológicos e processos sustentáveis como elementos centrais na criação. Essa abordagem sustentada na ecoarte representou não apenas uma estética comprometida com o meio ambiente, mas também uma postura crítica diante do modelo de consumo vigente.

O problema que se buscou compreender foi de que forma a prática artística, ancorada em princípios de sustentabilidade, pôde contribuir para a sensibilização ecológica e a educação ambiental, especialmente em contextos educativos e comunitários.

A arte, ao se apropriar de resíduos sólidos como matéria-prima a exemplo de plásticos, metais, pneus e madeira, levantou discussões significativas sobre reutilização, impacto ambiental e consumo consciente. Como apontaram Candiani, Madureira e Candiani (2023), projetos pedagógicos que aliaram expressão artística e práticas de reciclagem foram capazes de promover espaços de humanização e reflexão ambiental nas escolas públicas.

A justificativa para a presente abordagem fundamentou-se na necessidade de ampliar o entendimento sobre o potencial educativo e transformador da arte sustentável, destacando seu papel na formação de uma consciência crítica e ecológica, tanto em artistas quanto em espectadores. Em um mundo marcado pelo descarte e pela produção excessiva de lixo, práticas artísticas sustentáveis apresentaram-se como alternativas criativas e engajadas com os desafios socioambientais contemporâneos.

Nesse sentido, o objetivo geral desta reflexão consistiu em analisar como a arte pôde atuar como instrumento de conscientização ambiental por meio do uso de materiais recicláveis e da abordagem de temáticas ecológicas, contribuindo para o desenvolvimento de práticas artísticas sustentáveis e críticas.

METODOLOGIA

A metodologia adotada para a realização deste estudo baseou-se em uma revisão da literatura com o intuito de compreender e analisar a relação entre arte e meio ambiente sob uma perspectiva sustentável. Foram selecionadas produções acadêmicas, artigos científicos, dissertações, teses e livros publicados nos últimos anos, priorizando fontes que abordaram a utilização de materiais recicláveis na prática artística, o conceito de ecoarte e as contribuições da arte para a conscientização ambiental.

A busca pelos materiais foi realizada em bases de dados acadêmicas como SciELO, Google Scholar, CAPES Periódicos e repositórios institucionais, utilizando descritores como “arte sustentável”, “ecoarte”, “educação ambiental”, “resíduos sólidos na arte” e “arte e meio ambiente”. Após a seleção das obras, realizou-se uma leitura analítica dos textos, buscando identificar as principais contribuições teóricas e práticas que dialogaram com o objetivo proposto. Essa abordagem permitiu fundamentar a discussão a partir de diferentes perspectivas, enriquecendo a análise e possibilitando a articulação entre teoria e prática no campo da arte ambiental.

REVISÃO DA LITERATURA

A relação entre arte e meio ambiente tem sido amplamente discutida na literatura acadêmica, destacando-se como uma ferramenta essencial para a sensibilização e conscientização ambiental. A arte, ao proporcionar novas formas de percepção,

pode ampliar a criticidade e a reflexão sobre a crise ambiental contemporânea (Dias; Gomes, 2022). Nesse sentido, a educação ambiental crítica desempenha um papel fundamental ao promover o engajamento da comunidade escolar por meio de abordagens interdisciplinares que integram arte e sustentabilidade (Lins Júnior *et al.*, 2023).

A utilização de recursos artísticos em práticas pedagógicas tem se mostrado uma estratégia eficaz para o ensino de ciências e para o desenvolvimento da percepção ambiental dos estudantes. Estudos indicam que a fotografia, por exemplo, pode ser um instrumento valioso para despertar a consciência ecológica ao permitir a observação e interpretação do meio ambiente de maneira mais sensível e reflexiva (Alvim, 2018). Além disso, experiências práticas de transformação de resíduos sólidos em arte possibilitam a construção de conhecimentos sobre reciclagem e sustentabilidade de forma lúdica e criativa (Dranka; Silva; Hilgemberg, 2024).

O conceito de ativismo, que une arte e ativismo ambiental, tem ganhado espaço como uma forma de expressão crítica e transformação social. A produção artística contemporânea frequentemente aborda questões ambientais, promovendo debates sobre consumo, desperdício e responsabilidade socioambiental (Versieux, 2021). O documentário “Lixo Extraordinário”, por exemplo, destaca como a arte pode reconfigurar o olhar sobre o lixo e sua reutilização, reforçando a importância da educação ambiental na sociedade (Pivato; Boccina, 2021).

A criação de espaços educativos voltados para a integração entre arte e meio ambiente, como o projeto “Sala Verde Espaço de Humanização”, demonstra a relevância de abordagens inovadoras para fortalecer a relação entre cultura e sustentabilidade (Candiani; Madureira; Candiani, 2023). Essas iniciativas não apenas incentivam o pensamento crítico dos alunos, mas também favorecem o desenvolvimento de valores voltados para a preservação ambiental (Adams *et al.*, 2016).

No campo da arte contemporânea, museus e instituições culturais também desempenham um papel essencial na difusão de práticas artísticas sustentáveis. O Instituto Inhotim, por exemplo, combina arte e meio ambiente em um complexo museológico que promove experiências imersivas e reflexões sobre o impacto das ações humanas no ecossistema (Taboada, 2018). Além disso, a relação entre arte moderna e ecologia no Brasil evidencia como os artistas têm utilizado suas obras para dialogar com as questões ambientais ao longo do tempo (Siqueira, 2021).

Diante desse contexto, a arte se apresenta como um instrumento poderoso para a educação ambiental e a construção de uma consciência ecológica mais ampla. A partir de abordagens interdisciplinares e metodologias inovadoras, é possível integrar arte e sustentabilidade de maneira significativa, contribuindo para a formação de indivíduos mais críticos e responsáveis em relação ao meio ambiente (Pereira, 2024).

A arte contemporânea se constituiu como um campo dinâmico, múltiplo e em constante transformação, acompanhando as transformações sociais, políticas, culturais e ambientais das últimas décadas. Ao ultrapassar os limites das linguagens

tradicionais, a arte passou a dialogar com a vida cotidiana, com os espaços urbanos, com as tecnologias e, sobretudo, com as questões sociais emergentes. Pedrosa (2015) já afirmava que as relações entre ciência, arte e sociedade são elementos estruturantes do fazer artístico moderno e contemporâneo, indicando que a arte jamais esteve dissociada dos conflitos e urgências do seu tempo.

Nesse cenário, muitos artistas passaram a se posicionar como agentes críticos e reflexivos diante das desigualdades sociais, da degradação ambiental e do consumismo desenfreado, promovendo práticas que visam sensibilizar, educar e transformar. A arte passou a assumir um papel não apenas estético, mas também ético, pedagógico e político. Segundo Adams *et al.* (2016), experiências educacionais que envolvem a contextualização da arte com problemáticas reais favorecem o desenvolvimento crítico e reflexivo dos alunos, demonstrando como a arte pode ser uma ferramenta para a construção da cidadania.

Assim, os desdobramentos sociais da arte contemporânea incluem sua presença ativa em projetos educacionais, em movimentos sociais, em espaços alternativos e em ações que promovem a inclusão, a sustentabilidade e a valorização da diversidade cultural. Esse contexto favoreceu o surgimento de novas práticas e correntes artísticas voltadas ao engajamento com o meio ambiente, como é o caso da ecoarte.

A ecoarte emergiu como uma resposta estética e ética às crescentes preocupações com a crise ambiental global. Artistas passaram a incorporar materiais recicláveis e resíduos sólidos em suas produções, não apenas como suporte físico, mas como símbolo de um discurso que denuncia os impactos do consumismo e propõe novas formas de relação com a natureza. Essa vertente se apoia na ideia de que o fazer artístico pode ser simultaneamente poético, político e ecológico.

Segundo Azevedo *et al.* (2021), transformar lixo em arte é uma prática que amplia a percepção ambiental e promove uma nova leitura dos materiais e objetos descartados. Para os autores, experiências em sala de aula com a utilização de resíduos sólidos no ensino da química revelaram o potencial educativo da arte na formação de sujeitos mais conscientes e comprometidos com a sustentabilidade. Do mesmo modo, Dranka, Silva e Hilgemberg (2024) ressaltaram que a arte da reciclagem pode funcionar como instrumento de ensino, estimulando a criatividade, o senso crítico e o cuidado com o meio ambiente.

Em projetos como o desenvolvido por Candiani, Madureira e Candiani (2023), a criação de obras artísticas com materiais reaproveitados em escolas públicas demonstrou como a arte sustentável pode contribuir para a humanização dos espaços escolares e a formação de uma consciência ecológica nos estudantes. A prática da ecoarte, portanto, representa uma forma de resistência simbólica ao descarte, ao desperdício e à alienação ambiental.

Como destaca Alvim (2018), a percepção ambiental pode ser intensificada por meio de linguagens visuais, como a fotografia e a arte, uma vez que estas promovem a sensibilidade e o envolvimento emocional com o tema ambiental. Dessa forma, a ecoarte se consolidou como um campo de atuação artístico-pedagógica potente, no

qual o artista atua também como educador, ativista e mediador entre a sociedade e a natureza.

A incorporação da sustentabilidade nas práticas artísticas representa uma importante mudança de paradigma na relação entre arte, natureza e sociedade. Ao utilizar materiais recicláveis como base para a criação de obras, o artista rompe com a lógica do consumo e do descarte, dando novos sentidos a objetos que seriam considerados resíduos. Essa ressignificação do material agrega valor simbólico e ambiental à obra, além de propor uma reflexão sobre os impactos das ações humanas no planeta.

De acordo com Versieux (2021), a arte sustentável surge como uma forma de ativismo visual, em que o fazer artístico se alia a causas ecológicas, sociais e educativas. Ao transformar o “não-lugar” do lixo em obra de arte, o artista atua como agente de reinvenção e resistência. A prática de reutilizar materiais descartados como plásticos, metais, madeira e tecidos revela uma estética própria, marcada pela diversidade de texturas, cores e significados, como também se observa em projetos como o de Pivato e Boccina (2021), que discutem o impacto social e ambiental de iniciativas artísticas sustentáveis.

Siqueira (2021) ressalta que, no Brasil, a aproximação entre arte e ecologia tem raízes na modernidade, mas se intensifica nas últimas décadas, especialmente diante da visibilidade crescente da crise ambiental. Artistas contemporâneos passaram a explorar a dimensão política da arte, incorporando a sustentabilidade como parte do processo criativo e da narrativa visual. Essa prática não apenas amplia o campo da arte, mas também estabelece pontes com outras áreas do saber, como a educação ambiental, a sociologia, a ciência e a pedagogia crítica.

A arte tem se mostrado uma ferramenta poderosa no campo da educação ambiental, pois permite explorar temas complexos de forma sensível, criativa e crítica. Ao integrar práticas artísticas em contextos pedagógicos, é possível estimular a percepção estética, o pensamento reflexivo e o engajamento dos estudantes com questões ecológicas, promovendo uma formação integral e cidadã.

Segundo Pereira (2024), o uso da arte como instrumento pedagógico nos anos finais do ensino fundamental contribuiu significativamente para a conscientização dos alunos sobre a problemática dos resíduos sólidos urbanos. Por meio de uma sequência didática centrada na criação artística com materiais recicláveis, os alunos puderam vivenciar a experiência concreta da transformação, percebendo-se como agentes ativos na construção de um futuro mais sustentável.

Candiani, Madureira e Candiani (2023) também destacam a importância das oficinas artísticas no ambiente escolar, ressaltando que a “sala verde” desenvolvida com os estudantes proporcionou não apenas um espaço de criação, mas também de humanização, onde o aprender estava associado ao fazer coletivo e ao respeito ao meio ambiente. Essas experiências demonstram que a arte pode ultrapassar os limites das disciplinas convencionais e tornar-se um elo entre o conhecimento científico e a sensibilidade ética e ambiental.

Ainda conforme Lacerda e Lacerda (2023), a arte como instrumento de ensino promove sensibilidade e criticidade, contribuindo para o desenvolvimento de uma

educação ambiental transformadora. Através da criação artística, os estudantes são estimulados a observar, questionar e propor soluções para os problemas que afetam seu território, desenvolvendo, assim, uma consciência ecológica ativa.

RESULTADO E DISCUSSÃO

A arte sempre se revelou, para mim, como uma poderosa ferramenta de transformação social. Desde que iniciei minha trajetória artística, percebi que ela é sensível às demandas do seu tempo e se abre para múltiplas linguagens. No mundo contemporâneo, marcado por crises ambientais e pelo consumo excessivo, encontrei na arte sustentável um caminho fértil para criar, refletir e provocar mudanças. Utilizar sucata e materiais recicláveis em minhas obras não é apenas um gesto estético, mas uma forma de questionar o modelo acelerado de produção e descarte da sociedade atual.

Figura 1 - Ecoarte, peças decorativas.



Fonte: autoria própria.

Minha produção artística é centrada na criação de peças decorativas feitas a partir de objetos descartados, como o relógio elaborado com engrenagens mecânicas ou a luminária construída a partir de uma guitarra inutilizada. Cada peça que crio tem como base a ressignificação. Transformo o que seria lixo em objetos com nova função, carregados de significado. Sigo os princípios da ecoarte, uma vertente que une sensibilidade estética e consciência ambiental, e que me permite valorizar a reutilização ao mesmo tempo em que desperto reflexões sobre o destino dos materiais que consumimos.

Sou formado em Produção Cultural e atuo como restaurador de imagens sacras, músico e escritor. Essas experiências me permitem dialogar com diferentes linguagens e dar às minhas obras um caráter interdisciplinar e profundamente autoral. Quando resgato um objeto obsoleto e o transformo em arte, estou contando uma história de reinvenção. Estou resistindo à lógica do descartável e convidando as pessoas a enxergarem beleza onde, muitas vezes, só veem descarte.

Fazer arte com sucata é, para mim, mais do que uma escolha estética — é um posicionamento de vida. Cada criação carrega minha visão sobre o mundo, minha preocupação com o meio ambiente e minha vontade de provocar mudanças. Além disso, acredito que esse tipo de arte tem um enorme potencial educativo. Em escolas e comunidades, pode inspirar outras pessoas a unir criatividade com consciência ambiental, mostrando que a transformação começa com pequenos gestos e olhares atentos ao que nos cerca.

A relação entre arte e meio ambiente tem ganhado destaque nas últimas décadas, especialmente diante dos desafios impostos pela crise ecológica global. A arte, ao se apropriar de materiais recicláveis e de práticas sustentáveis, transforma-se em uma poderosa ferramenta de conscientização social e ambiental. Essa abordagem propõe não apenas a criação estética, mas também um reposicionamento ético do artista frente aos problemas ambientais, promovendo uma ruptura com o consumo desenfreado e a cultura do descarte.

A chamada ecoarte representa esse movimento de integração entre a criação artística e a responsabilidade ambiental. Segundo Versieux (2021), essa vertente reflete o desejo de muitos artistas em “ocupar o espaço simbólico e social com obras que não apenas denunciem os impactos ambientais, mas que também proponham novas formas de convivência entre homem e natureza”. Ao reutilizar resíduos sólidos como plástico, metal, madeira ou peças eletrônicas os artistas atribuem novos sentidos a esses materiais, convertendo o que antes era considerado lixo em arte.

Essa prática também está profundamente relacionada ao campo da educação. Candiani, Madureira e Candiani (2023) demonstram, por meio de projetos pedagógicos em escolas públicas, que a arte feita com sucata possibilita aos alunos uma experiência de sensibilização e ressignificação do espaço escolar. A criação de uma “sala verde” com materiais reciclados, por exemplo, contribuiu para a construção de um ambiente mais humano, criativo e ecologicamente consciente. Tais iniciativas revelam o potencial da arte como ferramenta de transformação social e desenvolvimento de uma consciência crítica desde a base educacional.

Além do aspecto pedagógico, a arte sustentável também se apresenta como linguagem de denúncia e resistência. Como destacam Azevedo *et al.* (2021), a utilização do lixo como matéria-prima artística simboliza uma contestação direta aos padrões estéticos tradicionais e à lógica produtivista da sociedade de consumo. Dessa forma, o artista assume o papel de mediador entre a sociedade e a natureza, propondo, por meio da arte, novas formas de ver, pensar e agir no mundo.

Em síntese, a prática artística sustentável vai além do fazer estético: ela é uma forma de intervenção poética e política, uma resposta criativa às urgências do nosso tempo. Ao transformar resíduos em arte, o artista não apenas reaproveita materiais, mas também recria sentidos, provoca reflexões e contribui para a construção de um futuro mais sensível, ético e sustentável.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A arte, ao dialogar com o meio ambiente, revelou-se uma linguagem potente e acessível para promover conscientização, crítica social e transformação. A prática artística sustentável, baseada na reutilização de materiais descartados, contribuiu significativamente para o enfrentamento das problemáticas ambientais, ao mesmo tempo em que resgatou valores como criatividade, responsabilidade e pertencimento. Nesse sentido, a utilização de sucata e outros resíduos como elementos expressivos foi além do valor estético, tornando-se símbolo de resistência ao consumismo e à lógica do descarte.

A ecoarte, enquanto vertente da arte contemporânea, ampliou as possibilidades de criação, dando visibilidade a questões socioambientais urgentes. Ela estabeleceu conexões entre o fazer artístico, a educação ambiental e o engajamento social, permitindo que a arte ocupasse um espaço estratégico na construção de uma cultura mais sustentável. Ao assumir uma postura crítica e sensível diante da realidade, artistas e educadores passaram a contribuir ativamente para a formação de sujeitos conscientes e comprometidos com o futuro do planeta.

Dessa forma, a abordagem sustentável na prática artística reafirma o papel da arte como agente de mudança. Ela ensina, emociona, provoca e inspira. Seja em ateliês, escolas ou comunidades, o encontro entre arte e meio ambiente fortalece a ideia de que é possível criar beleza a partir do que foi rejeitado, transformar resíduos em significado e, sobretudo, semear uma nova forma de existir: mais ética, mais sensível e mais consciente.

REFERÊNCIAS

ADAMS, Fernanda Welter; ALVES, Scarlet Dandara Borges; SANTOS, Dayane Graciele dos; NUNES, Simara Maria Tavares. **Contribuições de aulas contextualizadas para a formação crítico/reflexiva de alunos da Educação Básica.** Revista de Ensino de Ciências e Matemática, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 01–17, 2016.

ALVIM, Gilmara Ferreira. **O uso da fotografia e a percepção ambiental: a educação ambiental através de uma sequência didática.** 2018. 113 f. Dissertação (Mestrado em Educação em Ciências e Matemática) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2018.

AZEVEDO, Y. S. *et al.* **Transformando lixo em arte: um relato de experiência no ensino de química.** Research, Society and Development, v. 10, n. 7, 2021.

CANDIANI, Alessandra do Carmo Vieira; MADUREIRA, Gabriel de Brito; CANDIANI, Giovano. **A arte e o meio ambiente: sala verde espaço de humanização.** Revista [nome da revista], v. 42, n. 1, 2023.

DIAS, V. P.; GOMES, P. C. **Contribuições da Educação Ambiental Crítica para compreender a crise ambiental.** Revista de Ensino de Ciências e Matemática, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 1–26, 2022.

DRANKA, Caroline da Luz; SILVA, Renata Adriana Garbossa; HILGEMBERG, Larissa Priscila Bredow. **Meio ambiente e sustentabilidade: a arte da reciclagem como instrumento de ensino.** Caderno Intersaberes, Curitiba, v. 13, n. 45, p. 115-127, 2024.

LACERDA, Otniel Alves de; LACERDA, Lislene da Silva Correa. **Sensibilidade e criticidade na educação ambiental: a arte como instrumento de ensino.** Revista RECIFAQUI, v. 1, n. 13, 2023.

LINS JÚNIOR, João Ferreira *et al.* **A importância da educação ambiental na promoção da conscientização e desenvolvimento sustentável no ambiente escolar.** In: ANDRADE, Jaily Kerller Batista (Org.). Temas atuais em ciências ambientais. Campina Grande: Licuri, 2023. p. 143-158.

LOBATO, Danilo Fernandes; ADAMS, Fernanda Welter; NUNES, Simara Maria Tavares. **A importância da educação ambiental para o ensino de Ciências da Natureza: um olhar para o Tempo Comunidade.** Revista Insignare Scientia - RIS, v. 3, n. 4, p. 361-379, 20 nov. 2020.

OLIVEIRA, H. S. **Tatumes: relatos de uma experiência pictórica em três dimensões.** 2015. Dissertação (Mestrado em Artes Visuais) – Escola de Comunicações e Artes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

PEDROSA, Mário. **As relações entre a ciência e a arte.** In: MAMMÌ, Lorenzo (Org.). Mário Pedrosa: arte, ensaios. São Paulo: CosacNaify, 2015. p. 236-246. (Originalmente publicado em: Dimensões da Arte. Rio de Janeiro: Ministério da Educação e Saúde, 1964).

PEREIRA, Elivania Andréa. **Arte como instrumento de educação ambiental nos anos finais do ensino fundamental: uma sequência didática com enfoque em resíduos sólidos urbanos [manuscrito].** Urutaí, GO: IF Goiano, 2024. 85 f.

PIVATO, C. G.; BOCCINA, E. A. **Arte e transformação social: um diálogo entre o documentário “Lixo Extraordinário” e o projeto “Janela Aberta”.** 2021.

SANTOS, Nara Cristina (Org.). **Arte contemporânea: arte e sustentabilidade [recurso eletrônico].** Santa Maria, RS: Ed. PPGART, 2021.

SIQUEIRA, Vera Beatriz. **Sobre o que sempre existiu: arte moderna e ecologia no Brasil.** ARS, v. 19, n. 42, p. 442-477, ago. 2021.

TABOADA, C. E. **Instituto Inhotim: a experiência de um complexo museológico e suas relações com a arte contemporânea, o meio ambiente e o desenvolvimento humano.** 2018. Tese (Doutorado em Museologia) – Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa, 2018.

VERSIEUX, Leonardo de Melo. **Arte e meio ambiente: do não-lugar ao ativismo.** 2021. 127 f.: il.

Organizador

Jean Carlos Rodrigues

Engenheiro Industrial Mecânico pelo CEFET-MG, Físico licenciado pela UFMG, Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela UFMG e Doutorando em Engenharia Mecânica pela PUC. Além de especialista em metodologias ativas e tecnologias educacionais. Possui 14 anos de experiência na área educacional atuando como professor e coordenador no ensino superior.

A

- abastecimento 30, 33, 34, 35, 37, 41, 79
- agrícola 17, 26, 47, 48, 50, 60, 61
- agricultura 13, 14, 15, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 47, 48, 50, 51, 60, 79, 94, 143, 145
- agroecologia 13, 16, 25, 27, 36
- agronegócio 49, 51, 55, 56, 57, 58, 59, 62
- água 14, 16, 19, 21, 22, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 33, 34, 35, 36, 37, 40, 41, 42, 51, 66, 77, 78, 80, 82, 85, 94, 96, 116, 117, 118, 119, 125, 126, 127, 128, 129, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 148, 149, 151, 152, 155, 156, 160, 164, 165, 167, 170, 171, 172
- águas residuais 125, 126, 127, 128, 129, 130, 134, 135, 137
- águas residuárias 30, 33, 34, 35, 39, 41, 45
- alimentar 18, 22, 77, 86, 92, 94, 96, 98, 103, 140, 144, 146, 156
- ambientais 13, 14, 15, 19, 25, 27, 28, 30, 31, 33, 35, 36, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 59, 61, 65, 66, 71, 72, 76, 77, 78, 79, 80, 84, 88, 92, 93, 94, 97, 98, 99, 101, 102, 103, 104, 109, 111, 112, 114, 116, 117, 119, 120, 126, 127, 135, 141, 142, 144, 146, 147, 148, 149, 151, 155, 156, 157, 170, 180, 183, 184, 185, 186
- ambiental 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 59, 60, 65, 66, 69, 72, 73, 74, 76, 78, 79, 80, 83, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 99, 100, 101, 102, 104, 105, 106, 107, 111, 112, 113, 114, 115, 119, 120, 121, 122, 125, 128, 134, 137, 139, 140, 145, 147, 149, 162, 171, 172, 173, 174, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186
- ambiente 13, 16, 22, 26, 27, 33, 34, 36, 49, 65, 66, 69, 72, 74, 76, 77, 78, 80, 82, 83, 84, 85, 87, 92, 93, 94, 98, 100, 101, 102, 104, 105, 114, 117, 118, 120, 129, 139, 140, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 155, 157, 160, 163, 167, 178, 179, 180, 181, 182, 184, 185, 186
- ambiguidade 80
- análise 15, 23, 25, 27, 30, 33, 44, 45, 47, 48, 52, 55, 68, 69, 73, 79, 80, 87, 94, 95, 98, 99, 100, 101, 102,

109, 113, 114, 117, 118, 119, 123, 137, 167, 170,
175, 179
análises 13, 52, 58, 107, 120, 155, 170, 172
artista 182, 184
artística 178, 179, 180, 182, 183, 184, 185
aterros 31, 67, 71, 73, 101, 112, 114, 119, 143
aterros sanitários 73, 112, 114, 143

B

bioacumulação 77, 83, 86, 87, 117, 139, 140, 145,
146
biodegradação 76, 87, 92, 94, 102, 103, 106, 107,
109, 114
biodiversidade 14, 15, 16, 21, 22, 25, 26, 27, 49, 50,
60, 76, 79, 84, 87, 92, 96, 97, 99, 103, 105, 146, 156
bioengenharia 170
bioinsumos 51
biopolímeros 76, 87, 88
biorremediação 92, 103, 104, 125, 139, 141, 148,
149
biotecnológicas 85, 139

C

carbono 14, 15, 26, 47, 48, 49, 50, 51, 59, 61, 79, 81,
82, 87, 88, 101, 120, 142
cidadania 181
ciência 95, 97, 181, 182, 186
climáticas 14, 26, 48, 51, 59, 79, 84, 127
conscientização 71, 72, 73, 80, 88, 92, 94, 95, 97,
99, 100, 102, 104, 178, 179, 182, 184, 185, 186
construção civil 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74,
122
contaminação 15, 34, 41, 66, 77, 80, 85, 96, 103,
112, 114, 115, 117, 118, 119, 120, 121, 123, 139,
140, 141, 142, 143, 144, 145, 147
cooperativa 24, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40,
41, 42, 45, 71
crescimento urbano 65
crises 13, 14, 79, 183

D

dados 13, 15, 22, 30, 33, 34, 36, 42, 47, 48, 52, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 66, 68, 69, 73, 111, 113, 114, 115, 117, 119, 120, 155, 179
demolição 65, 67, 68, 74
desenvolvimento 13, 14, 15, 17, 18, 22, 23, 24, 25, 27, 30, 47, 48, 51, 55, 65, 66, 72, 76, 80, 83, 87, 88, 93, 94, 97, 98, 100, 102, 103, 104, 106, 114, 120, 123, 130, 139, 140, 146, 147, 149, 179, 180, 181, 182, 184, 186
diversidade 16, 18, 21, 23, 85, 103, 140, 156, 181, 182

E

ecoarte 178, 179, 181, 183, 184, 185
ecológicas 22, 155, 173, 174, 179, 182
economia 18, 22, 30, 31, 34, 38, 40, 41, 44, 49, 62, 66, 72, 73, 76, 86, 87, 88, 90, 92, 99, 100, 101, 102, 104, 105, 113, 147, 149
ecossistemas 14, 48, 51, 81, 86, 87, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 103, 104, 105, 115, 131, 139, 140, 142, 143, 145, 149, 156, 157, 166
educação 16, 17, 39, 40, 72, 73, 74, 80, 87, 92, 94, 97, 100, 102, 105, 137, 149, 178, 179, 180, 182, 183, 184, 185, 186
efluentes 27, 34, 36, 39, 41, 42, 43, 96, 125, 126, 127, 130, 135, 136, 137, 139, 140, 142, 143, 145, 147, 148
emissão 47, 48, 49, 50, 51, 55, 56, 57, 59, 78, 79, 119
energético 81
erosão 21, 22, 103, 143, 170, 171, 173, 175, 176
erosivo 19, 22, 170, 172
estratégia 13, 33, 51, 88, 94, 100, 114, 120, 135, 147, 160, 166, 167, 180
estratégias 14, 16, 17, 40, 47, 48, 50, 51, 65, 76, 78, 83, 94, 95, 97, 99, 103, 106, 115, 139, 140, 141, 142, 167, 178
estratégico 18, 72, 185
estruturas 17, 34, 36, 104, 155, 156, 158, 160, 166, 167, 170, 171

estudo 13, 15, 31, 41, 43, 45, 48, 55, 59, 60, 65, 66,
73, 75, 94, 95, 96, 98, 100, 101, 103, 104, 105, 111,
113, 114, 115, 119, 120, 121, 126, 128, 130, 133,
134, 135, 145, 155, 156, 157, 162, 167, 170, 173,
174, 178, 179

F

ferramenta 30, 48, 119, 121, 147, 178, 179, 181, 182,
183, 184
filtros 125

G

gestão 13, 15, 18, 22, 24, 25, 26, 27, 30, 31, 33, 34,
35, 36, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 49, 51, 65, 66,
67, 68, 69, 71, 73, 74, 80, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 99,
100, 102, 105, 106, 107, 119, 121, 147, 170

I

inclusão social 30, 31, 40
infraestrutura 23, 24, 25, 26, 27, 32, 33, 34, 39, 40, 41,
69, 72, 73, 87, 99, 101, 128, 134, 135, 170, 172
inovações 92, 94, 100, 104, 105
instrumento de ensino 181, 182, 186
insumos agrícolas 23, 47

L

laboratório 155, 157, 158

M

materiais 20, 31, 32, 35, 40, 41, 44, 45, 46, 65, 66, 67,
68, 70, 71, 72, 73, 77, 78, 81, 86, 87, 92, 94, 95, 98,

99, 101, 102, 103, 104, 105, 109, 115, 117, 142,
147, 148, 149, 162, 178, 179, 181, 182, 183, 184,
185
matéria orgânica 47, 48, 49, 50, 51, 81, 127, 134,
142, 172, 173
meio ambiente 13, 22, 33, 36, 49, 65, 66, 69, 72, 76,
77, 80, 82, 83, 92, 93, 94, 98, 100, 101, 102, 104,
105, 117, 118, 120, 129, 142, 143, 145, 178, 179,
180, 181, 182, 184, 185, 186
microbiana 85, 103, 145
microbiológicos 25, 33, 82
microplásticos 76, 77, 83, 85, 88, 95, 96, 98, 99, 103,
106, 107
microrganismos 25, 36, 81, 92, 102, 103, 104, 106,
110, 120, 121, 126, 134, 135, 148

N

natureza 16, 105, 144, 181, 182, 184

O

organismos 77, 80, 83, 85, 95, 96, 98, 99, 103, 125,
127, 129, 130, 134, 139, 140, 141, 146, 147, 148

P

pedagogia 182
pedagógicas 136, 178, 180
pedagógico 181, 182, 184
pedagógicos 179, 182, 184
planejamento 23, 36, 40, 42, 47, 59, 72, 121, 123,
170
planta 133, 135, 155, 156, 157, 165, 167
plantas 13, 16, 18, 19, 22, 25, 26, 82, 125, 126, 127,
129, 130, 133, 134, 135, 140, 141, 146, 147, 148,
151, 156, 157, 160, 162, 164, 165, 167
plástico 35, 68, 77, 78, 81, 83, 85, 90, 92, 93, 95, 96,
97, 101, 102, 103, 105, 106, 107, 109, 184
plásticos 34, 68, 76, 77, 78, 80, 81, 84, 85, 86, 87, 92,

93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104,
105, 106, 107, 108, 109, 143, 158, 179, 182

políticas públicas 14, 18, 22, 23, 29, 31, 40, 47, 48,
51, 59, 65, 66, 72, 73, 74, 87, 88, 94, 95, 97, 99,
100, 105, 149

político 181

poluição 76, 80, 84, 87, 88, 92, 93, 94, 95, 96, 97,
98, 99, 100, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 111,
121, 126, 127, 139, 140, 141, 142, 143, 144

poluição marinha 92, 93, 94, 95, 96, 97, 99, 100,
105, 106, 108, 109

prática 21, 22, 24, 40, 45, 51, 55, 71, 72, 77, 102,
111, 112, 178, 179, 181, 182, 184, 185

práticas 13, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 22, 25, 26, 27, 30,
33, 34, 35, 36, 39, 40, 41, 42, 47, 48, 49, 50, 51, 59,
62, 65, 66, 68, 71, 72, 73, 80, 93, 95, 96, 97, 98, 99,
100, 104, 105, 140, 147, 149, 152, 179, 180, 181,
182, 184

previsão 47, 52, 53, 54, 55, 57, 58, 59, 60, 62

processo 15, 17, 22, 33, 34, 35, 38, 39, 45, 49, 52, 53,
67, 69, 71, 78, 80, 84, 99, 101, 112, 114, 141, 147,
170, 182

processos 24, 32, 33, 34, 39, 41, 68, 75, 79, 80, 82,
83, 84, 87, 93, 101, 102, 103, 104, 105, 107, 114,
119, 125, 126, 127, 128, 130, 132, 133, 134, 135,
137, 138, 140, 141, 142, 143, 146, 148, 149, 157,
160, 163, 170, 172, 173, 174, 178

produção 13, 15, 16, 17, 18, 20, 22, 23, 26, 47, 49,
50, 56, 65, 77, 78, 79, 80, 85, 86, 87, 88, 92, 93, 95,
98, 101, 102, 104, 111, 113, 127, 143, 178, 179,
180, 183

projetos educacionais 181

R

radiação 155, 156

reciclagem 31, 33, 36, 38, 40, 43, 45, 46, 65, 66, 67,
68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 76, 80, 86, 87, 92, 93, 94,
96, 98, 99, 100, 101, 102, 104, 105, 107, 109, 149,
179, 180, 181, 186

recicláveis 31, 34, 35, 40, 41, 44, 45, 46, 67, 68, 71,
178, 179, 181, 182, 183, 184

recursos naturais 16, 30, 33, 49, 65, 66, 72, 80, 86,

102, 117
resíduos 20, 22, 25, 27, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 38,
39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 49, 52, 53, 57, 65, 66, 67,
68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 76, 77, 80, 81, 84, 87, 92,
93, 94, 95, 96, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105,
108, 109, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 121,
122, 123, 128, 140, 143, 145, 147, 148, 149, 150,
179, 180, 181, 182, 184, 185, 186
resíduos sólidos 30, 33, 34, 35, 38, 40, 41, 42, 43, 44,
45, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 74, 77, 80, 94, 96, 111,
112, 113, 114, 115, 117, 121, 122, 123, 140, 143,
179, 180, 181, 182, 184, 186

S

saudável 23, 66
saúde 17, 21, 26, 28, 30, 37, 39, 45, 49, 50, 68, 76, 78,
79, 83, 84, 86, 87, 88, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99,
100, 103, 105, 119, 120, 122, 139, 140, 141, 144,
145, 146, 147, 148, 151
sistema VI, 15, 16, 25, 26, 35, 36, 41, 42, 60, 83, 84,
86, 125, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134,
135, 142, 146, 162
sistemas 14, 19, 21, 29, 35, 36, 40, 47, 49, 50, 51, 61,
62, 77, 80, 86, 95, 125, 126, 127, 128, 129, 130,
134, 135, 136, 137, 138, 149, 156
sistemas autônomos 125, 126, 127, 128, 129
sociedade 14, 26, 31, 66, 72, 78, 80, 87, 88, 92, 95,
97, 100, 102, 111, 180, 181, 182, 183, 184
sociedade civil 14, 87, 92, 95, 102
socioeconômico 13, 40
sociologia 182
sustentabilidade 13, 14, 15, 19, 20, 21, 22, 24, 25,
26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40,
41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 51, 60, 65, 66, 79, 80, 92,
101, 104, 105, 125, 135, 136, 145, 172, 178, 180,
181, 182, 186
sustentáveis 14, 15, 16, 17, 18, 21, 22, 27, 31, 33, 36,
40, 42, 47, 48, 49, 50, 51, 59, 62, 71, 73, 78, 80, 87,
93, 94, 98, 99, 100, 102, 103, 104, 105, 115, 125,
126, 129, 147, 148, 170, 178, 179, 180, 182, 184
sustentável 13, 14, 18, 22, 23, 25, 26, 27, 30, 40, 45,
59, 65, 66, 69, 71, 72, 73, 74, 87, 92, 94, 95, 96, 97,

98, 99, 100, 102, 104, 105, 106, 112, 121, 127, 128,
135, 147, 148, 149, 155, 156, 178, 179, 181, 182,
183, 184, 185, 186

T

técnica VI, 21, 23, 24, 36, 40, 51, 54, 80, 111, 113,
115, 117, 118, 121, 122, 129, 149, 150, 171

tecnologias 14, 23, 24, 51, 68, 87, 92, 93, 94, 95, 97,
99, 100, 126, 130, 135, 139, 147, 148, 181, 187

tratamento 25, 26, 34, 35, 36, 39, 40, 41, 42, 55, 80,
95, 98, 103, 111, 112, 125, 126, 127, 128, 129, 130,
132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 142,
147, 148

V

vegetação 17, 48, 49, 50, 60, 61, 116, 117, 118, 119,
135, 172

vulneráveis 51, 80, 87



AYA EDITORA
2025

