

Alan Mario Zuffo
Jorge González Aguilera
Bruno Rodrigues de Oliveira
Organizadores

Inovações em pesquisas agrárias e ambientais

Volume IX



2025

Alan Mario Zuffo
Jorge González Aguilera
Bruno Rodrigues de Oliveira
Organizadores

**Inovações em pesquisas agrárias e
ambientais**
Volume IX



Pantanal Editora

2025

Copyright© Pantanal Editora

Editor Chefe: Dr. Alan Mario Zuffo

Editores Executivos: Dr. Jorge González Aguilera e Dr. Bruno Rodrigues de Oliveira

Diagramação: A editora. **Diagramação e Arte:** A editora. **Imagens de capa e contracapa:** Canva.com. **Revisão:** O(s) autor(es), organizador(es) e a editora.

Conselho Editorial

Grau acadêmico e Nome

Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos
Profa. MSc. Adriana Flávia Neu
Profa. Dra. Albys Ferrer Dubois
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior
Profa. MSc. Aris Verdecia Peña
Profa. Arisleidis Chapman Verdecia
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva
Prof. Dr. Bruno Gomes de Araújo
Prof. Dr. Caio Cesar Enside de Abreu
Prof. Dr. Carlos Nick
Prof. Dr. Claudio Silveira Maia
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos
Prof. Dr. Cristiano Pereira da Silva
Profa. Ma. Dayse Rodrigues dos Santos
Prof. MSc. David Chacon Alvarez
Prof. Dr. Denis Silva Nogueira
Profa. Dra. Denise Silva Nogueira
Profa. Dra. Dennyura Oliveira Galvão
Prof. Dr. Elias Rocha Gonçalves
Prof. Me. Ernane Rosa Martins
Prof. Dr. Fábio Steiner
Prof. Dr. Fabiano dos Santos Souza
Prof. Dr. Gabriel Andres Tafur Gomez
Prof. Dr. Hebert Hernán Soto Gonzáles
Prof. Dr. Hudson do Vale de Oliveira
Prof. MSc. Javier Revilla Armesto
Prof. MSc. João Camilo Sevilla
Prof. Dr. José Luis Soto Gonzales
Prof. Dr. Julio Cezar Uzinski
Prof. MSc. Lucas R. Oliveira
Prof. Dr. Luciano Façanha Marques
Profa. Dra. Keyla Christina Almeida Portela
Prof. Dr. Leandro Argentel-Martínez
Profa. MSc. Lidiene Jaqueline de Souza Costa Marchesan
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann
Prof. MSc. Marcos Pisarski Júnior
Prof. Dr. Marcos Pereira dos Santos
Prof. Dr. Mario Rodrigo Esparza Mantilla
Profa. MSc. Mary Jose Almeida Pereira
Profa. MSc. Núbia Flávia Oliveira Mendes
Profa. MSc. Nila Luciana Vilhena Madureira
Profa. Dra. Patrícia Maurer
Profa. Dra. Queila Pahim da Silva
Prof. Dr. Rafael Chapman Auty
Prof. Dr. Rafael Felipe Ratke
Prof. Dr. Raphael Reis da Silva
Prof. Dr. Renato Jaqueto Goes
Prof. Dr. Ricardo Alves de Araújo (*In Memoriam*)
Profa. Dra. Sylvana Karla da Silva de Lemos Santos
Prof. Dr. Tayronne de Almeida Rodrigues
Prof. Dr. Ugur Azizoglu
Prof. Dr. Wéverson Lima Fonseca
Prof. MSc. Wesclen Vilar Nogueira
Profa. Dra. Yilan Fung Boix
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme

Instituição

OAB/PB
Mun. Faxinal Soturno e Tupanciretã
UO (Cuba)
IF SUDESTE MG
Facultad de Medicina (Cuba)
ISCM (Cuba)
UFESSPA
UEA
UNEMAT
UFV
AJES
UFGD
UEMS
IFPA
UNICENTRO
IFMT
UFMG
URCA
ISEPAM-FAETEC
IFG
UEMS
UFF
(Colômbia)
UNAM (Peru)
IFRR
UCG (México)
Rede Municipal de Niterói (RJ)
UNMSM (Peru)
UFMT
SED Mato Grosso do Sul
UEMA
IFPR
Tec-NM (México)
Consultório em Santa Maria
UFJF
UEG
FAQ
UNAM (Peru)
SEDUC/PA
IFB
IFPA
UNIPAMPA
IFB
UO (Cuba)
UFMS
UFPI
UFG
UEMA
IFB
Sec. Mun. de Educação, Cultura e Tecnologia de Araripe
Universidade Kayseri, Türkiye
UFPI
FURG
UO (Cuba)
UFT

Conselho Técnico Científico
- Esp. Joacir Mário Zuffo Júnior
- Esp. Maurício Amormino Júnior
- Lda. Rosalina Eufrausino Lustosa Zuffo

Ficha Catalográfica

Catalogação na publicação
Elaborada por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

158

Inovações em pesquisas agrárias e ambientais - Volume IX / Organização de Alan Mario Zuffo, Jorge González Aguilera, Bruno Rodrigues de Oliveira. – Nova Xavantina-MT: Pantanal, 2025.
118p. ; il.

Livro em PDF

ISBN 978-65-85756-69-3

DOI <https://doi.org/10.46420/9786585756693>

1. Pesquisa agrícola. 2. Sustentabilidade. I. Zuffo, Alan Mario (Organizador). II. Aguilera, Jorge González (Organizador). III. Oliveira, Bruno Rodrigues de (Organizador). IV. Título.

CDD 630.72

Índice para catálogo sistemático

I. Pesquisa agrícola



Nossos e-books são de acesso público e gratuito e seu download e compartilhamento são permitidos, mas solicitamos que sejam dados os devidos créditos à Pantanal Editora e também aos organizadores e autores. Entretanto, não é permitida a utilização dos e-books para fins comerciais, exceto com autorização expressa dos autores com a concordância da Pantanal Editora.

Pantanal Editora

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000.
Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil.
Telefone (66) 99682-4165 (Whatsapp).
<https://www.editorapantanal.com.br>
contato@editorapantanal.com.br

Apresentação

O volume IX do e-book Inovações em Pesquisas Agrárias e Ambientais reúne contribuições científicas que dialogam com alguns dos principais desafios contemporâneos enfrentados pelos setores agrícola, ambiental e socioeconômico no Brasil. Em um cenário marcado pela intensificação dos impactos climáticos, pela crescente demanda por sistemas produtivos sustentáveis e pela necessidade de aprimorar políticas públicas e modelos de gestão territorial, este volume apresenta estudos que ampliam o entendimento técnico-científico e oferecem caminhos inovadores para a prática profissional e para a formulação de soluções integradas.

Os assuntos contemplados são: sistemas agroflorestais como ferramenta de restauração em áreas impactadas por rompimento de barragem de mineração; avaliação dos índices vegetativos por sensoriamento remoto em perímetros irrigados; outorgas de direito de uso de recursos hídricos para pecuária; zoneamento de áreas para restauração ecológica visando metas climáticas; educação profissional na rede estadual paulista: expansão, desafios e o papel do itinerário técnico em agronegócio; mecanismos, estratégias e perspectivas sustentáveis para biorremediação e recuperação de elementos das terras raras; dinâmica toxicológica e repercussões clínico-produtivas nas intoxicações por plantas em bovinos de corte.

Assim, este volume consolida-se como uma coletânea multidisciplinar que integra ciência, tecnologia, educação e sustentabilidade, oferecendo ao leitor uma visão atualizada e robusta sobre temas essenciais para o desenvolvimento agrário e ambiental no Brasil. Espera-se que os capítulos aqui reunidos inspirem novas reflexões, fomentem pesquisas futuras e contribuam para práticas mais sustentáveis, resilientes e integradas nos diversos territórios brasileiros.

Boa leitura!

Os organizadores

Sumário

Apresentação	4
Capítulo 1	6
Sistemas Agroflorestais como ferramenta de restauração em áreas impactadas por rompimento de barragem de mineração	6
Capítulo 2	22
Avaliação dos índices vegetativos por sensoriamento remoto em perímetros irrigados no município de Juazeiro-BA	22
Capítulo 3	40
Outorgas de direito de uso de recursos hídricos para pecuária na Macrorregião Nordeste Matogrossense	40
Capítulo 4	50
Zoneamento de áreas para restauração ecológica visando metas climáticas	50
Capítulo 5	63
Educação profissional na rede estadual paulista: expansão, desafios e o papel do itinerário técnico em agronegócio	63
Capítulo 6	71
Mecanismos, Estratégias e Perspectivas Sustentáveis para Biorremediação e Recuperação de Elementos das Terras Raras: Uma Revisão	71
Capítulo 7	92
Dinâmica toxicológica e repercussões clínico-produtivas nas intoxicações por plantas em bovinos de corte	92
Capítulo 8	102
Educação ambiental na escola: ações com discentes do ensino fundamental para conservação de uma área costeira no município de Tutóia-MA	102
Índice Remissivo	115
Sobre os organizadores	116

Sistemas Agroflorestais como ferramenta de restauração em áreas impactadas por rompimento de barragem de mineração

Recebido em: 07/08/2025

Aceito em: 25/08/2025

 10.46420/9786585756693cap1

Lucas Antunes da Silva 

Rafael Lima De Carvalho 

Silvia Correa Santos 

Cleberton Correia Santos 

Elias Silva De Medeiros 

INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais causados por rompimentos de barragens de mineração no mundo são casos bastante conhecidos. No entanto, o desastre da barragem de fundão é considerado o maior evento de perturbação ambiental da história do Brasil e por muitos até do mundo (CPRM, 2015, Carmo et al., 2017, Omachi et. al, 2018). Os passivos ambientais desse desastre somam mais de 860 ha de Áreas de Preservação Permanente, associadas a 660 km de cursos d'água da bacia do Rio Doce, afetados pela inundação dos rejeitos de minério (Carmo et al., 2017; SOS Mata Atlântica, 2017).

A condição ambiental histórica da Bacia do Rio Doce já tratava, mesmo antes ao acidente ambiental, de áreas antropizadas com estágio de degradação, causadas principalmente pelo uso exploratório do solo e desmatamento (SOS Mata Atlântica, 2017). Além disso, a bacia do Rio Doce está inserida na Mata Atlântica, bioma brasileiro considerado um dos hotspots mundiais para a conservação da biodiversidade (Omachi et. al, 2018).

Dado o contexto de degradação e a proporção dos impactos causados pelo acidente ambiental da barragem de Fundão, muitas foram as iniciativas e esforços com a finalidade de recuperação ambiental, social e econômica das áreas e regiões atingidas. No âmbito ambiental, existem inúmeras técnicas de recuperação e restauração. Essas técnicas devem estar relacionadas as características ambientais do local como o solo, interação entre fauna e flora, a diversidade local e o tipo e intensidade do distúrbio sofrido (Martins, 2018).

As técnicas de restauração ecológica podem ser passivas ou ativas (Martins, Silva & Barros, 2020). Dentre essas, as de dinâmica ativa utilizam o plantio de mudas como forma de induzir uma recuperação inicial rápida. Essa técnica busca alternativas de cobertura do solo e crescimento de espécies arbóreas que posteriormente serão a base florestal desse sistema (Martins, 2018; Philipson et al., 2020; Martins, Silva & Barros, 2020).

Uma das técnicas de restauração ativas mais utilizadas são os Sistemas Agroflorestais (SAF's). Essa técnica é prevista pelo Código Florestal Brasileiro como uma possibilidade de intervenção com objetivo de restauração florestal ou recomposição de áreas degradadas. Os sistemas agroflorestais são considerados uma alternativa viável para a agricultura sustentável e a restauração florestal, pois aliam a produção agrícola com a conservação ambiental. (Van Noordwijk et al., 2019; Brancalion et al., 2012).

O componente obrigatório dos SAF's são as espécies arbóreas, que desempenham papel fundamental para o equilíbrio do sistema e a qualidade do solo. Estudos têm demonstrado que essas espécies podem influenciar positivamente nos atributos físicos e químicos do solo, aumentando a biodiversidade e o balanço energético do sistema. Embora práticas de plantio direto ou mínimo possam trazer benefícios relacionados aos nutrientes do solo e ao sequestro de carbono, a presença de árvores em sistemas agroflorestais oferece vantagens adicionais (Achmad et al., 2022).

Por formarem um ecossistema complexo e dinâmico, ainda existe a preocupação em avaliar as especificidades de cada local para garantir uma eficiente restauração ambiental, principalmente em áreas com danos causados por barragens de rejeitos (Martins, Batista & Lopes, 2022). De modo que, um dos desafios atuais em áreas degradadas é a avaliação simplificada e confiável da qualidade do solo. Essa avaliação envolve a quantificação de atributos físicos, químicos e biológicos, permitindo o monitoramento de mudanças a médio e longo prazo da qualidade do solo (Marchini et al., 2015). Outro grande desafio é compreender como a comunidade vegetal implantada e a regeneração natural da área se desenvolvem nos diferentes contextos de degradação e nas diferentes técnicas de restauração. Compreender a infinidade de interações que ocorrem entre esses sistemas é fundamental para a consolidação de projetos de restauração adaptados aos diferentes cenários de degradação existentes.

Para um projeto de restauração bem-sucedido, é essencial escolher as espécies arbóreas adequadas às condições do local. As características dendrométricas, como a taxa de crescimento, a altura, o volume, a área basal, a tolerância à sombra etc., ajudam a determinar quais espécies são mais apropriadas para alcançar os objetivos de restauração em determinada área. Além disso, o conhecimento das características dendrométricas são fundamentais para planejar o arranjo espacial, que influencia diretamente a competição, o desenvolvimento do dossel e a capacidade do ecossistema restaurado de desempenhar suas funções ecológicas (Brancalion et al., 2012). Nosso protocolo de seleção de espécies baseado em características funcionais selecionou com sucesso espécies arbóreas nativas com traços muito semelhantes às espécies-alvo, e essas espécies se mostraram adequadas para a restauração florestal de longo prazo em uma área tropical degradada." (Xu et al., 2024).

Dessa forma, é incontestável a importância ambiental dos SAF's como promotor da recuperar áreas degradadas aliado a produção agrícola, principalmente quando se considera a urgência de adoção de sistemas produtivos mais sustentáveis (Foong et al., 2022). Assim, o estudo objetivou caracterizar os atributos físico-químicos do solo e dendrométricos do componente arbóreos de SAFs na mesorregião do Vale do Rio Doce, Estado de Minas Gerais, como forma de subsidiar e promover o uso de sistemas

agroflorestais como instrumentos de restauração florestal, sobretudo em áreas impactadas por barragens de mineração.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido com quatro Sistemas Agroflorestais implantados em Jampruca - Minas Gerais (Latitude: 18° 27' 37" Sul, Longitude: 41° 48' 14" Oeste), município localizado na mesorregião Vale do Rio Doce, leste do Estado de Minas Gerais – Brasil.

O clima da microrregião é do tipo Aw na escala de Köppen, sendo caracterizado como tropical com estação seca, com invernos secos e amenos e verões chuvosos com altas temperaturas (Mar, 2016). A temperatura média da região varia entre 19° C e 24° C. A temperatura máxima ocorrida no período de realização do experimento foi 38,5° C no mês de setembro de 2021, e a mínima foi 9,4° C, registrada em maio de 2022 (Inmet, 2022). A estação chuvosa na região é bem caracterizada, abrangendo o período de outubro a março, correspondendo a 75% do total anual precipitado (Signorelli, 1997), sendo a precipitação média anual de 1.116 milímetros (Mar, 2016).

Os principais tipos de solo presentes na região são o Argissolo vermelho e o Argissolo vermelho-amarelo (Embrapa Solos, 2013; Santos et al., 2018). Caracterizados como distróficos, variando de profundo a pouco profundo, bem drenados e medianamente drenados, podendo apresentar altos teores de cascalho. O relevo predominante na região é ondulado e fortemente ondulado, com cotas que oscilam entre 150 e 350 metros e picos que chegam a 450 metros de altitude em relação ao nível do mar (Signorelli, 1997).

O bioma do local é Mata Atlântica e a fitofisionomia que compõe predominantemente a região é a Floresta Estacional Semidecidual (INDE, 2004). Atualmente a região se encontra com alto índice de degradação florestal, áreas de monodominância de *Astronium urundeuva* (M. Allemão) Engl., alto índice de processo erosivo e presença de solo exposto.

Foram analisados quatro Sistemas Agroflorestais (SAF01, SAF02, SAF03 e SAF04) e um fragmento florestal remanescente localizado próximo aos SAF's, denominado Fragmento Florestal de Referência (FFR). Os SAF's foram implantados entre novembro de 2019 a março de 2020. São arranjos voltados a restauração florestal de áreas impactadas indiretamente pelo rompimento da Barragem do Fundão. Os locais de implantação são caracterizados como áreas de preservação permanente (mata ciliar).

Os Sistemas Agroflorestais e o Fragmento Florestal de Referência estudados fazem parte do Projeto de Assentamento Ulisses Oliveira (PUO). O PUO foi criado em maio de 2005 como parte do programa de Reforma Agrária instituído pelo governo brasileiro, através de portaria do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA). É constituído por 43 unidades agrícolas familiares e uma área de proteção ambiental, destinada a Reserva Legal.

Para a implantação todas as áreas foram cercadas previamente. Após o cercamento foi realizado o preparo de solo, com roçada seguido da abertura de berços. Os berços possuíam 40 cm x 40 cm x 40

cm (largura, comprimento e profundidade) e foram abertos com auxílio de perfurador de solo. Foi aplicado 200 gramas de calcário calcítico por berço, 30 dias antes da implantação. A adubação de base foi 300 gramas de NPK 05-30-20. A adubação de cobertura (2º mês pós plantio) foi realizada com adubo de liberação lenta FTE-XX na dose de 150 gramas por berço.

As mudas de espécies arbóreas e frutíferas implantadas possuíam, em média, 60 centímetros de altura. Foi introduzido, via sementes, espécies de adubação verde nas entrelinhas. As espécies utilizadas foram *Cajanus cajan* (L.) Huth, *Crotalaria juncea* L., *Crotalaria spectabilis* Roth. e *Canavalia ensiformis* DC.

A seguir são apresentadas as características de cada Sistema Agroflorestal e do Fragmento Florestal de Referência estudado:

SAF 01: Implantação em dezembro de 2019, área de 0,60 hectares atravessada pelo Córrego Boleira (Latitude 18°26'26.05" Sul, Longitude 41°41'26.33" Oeste). Vegetação composta por árvores adultas e plantas de sub-bosque típicas de mata ciliar. Culturas anuais e perenes incluem bananeiras, café, açafrão, feijão, milho e amendoim. Solo próximo ao córrego possui características de areia e silte. No período chuvoso, parte da área é temporariamente alagada. Manejo agrícola é pouco intensivo, realizado em algumas entrelinhas.

SAF 02: Implantação concluída em janeiro de 2020, área de 0,62 hectares às margens do Córrego Boleira (Latitude 18°26'21.14" Sul, Longitude 41°41'32.49" Oeste). Vegetação de mata ciliar com alta presença de gramíneas invasoras do gênero *Panicum*. Ausência de manejo pós-implantação e baixa ocupação arbórea favorecem a competição das gramíneas invasoras. Não há atividades de manutenção ou cultivos nas entrelinhas, sendo o sistema com menor intensidade de manejo.

SAF 03: Implantação em janeiro de 2020, área de 0,69 hectares às margens do Córrego Boleira (Latitude 18°26'14.19" Sul, Longitude 41°41'39.22" Oeste). Vegetação nativa típica de mata ciliar. Cultivos de hortifrutigranjeiros para comercialização externa. Presença significativa de árvores adultas antes da implantação. Manejo agrícola constante com culturas como bananeiras, milho e hortaliças reduz a competição com gramíneas invasoras. Parte da área é alagada no período chuvoso.

SAF 04: Implantação concluída em janeiro de 2020, área de 1,82 hectares com presença de área brejosa e lago artificial (Latitude 18°25'35.04" Sul, Longitude 41°41'54.26" Oeste). Maior intensidade de manejo entre os SAFs, com cultivos anuais para autoconsumo familiar. Solo com características arenosas e presença moderada de gramíneas invasoras. Menor número de árvores adultas remanescentes, historicamente utilizada para lavoura familiar.

Fragmento Florestal de Referência (FFR): Área de Reserva Legal do assentamento selecionada como referência, caracterizada como Estágio Inicial de Regeneração (Latitude 18°24'19.20" Sul, Longitude 41°41'50.58" Oeste). Localizada próxima aos sistemas estudados, composta principalmente por floresta contínua.

De acordo com a Resolução da CONAMA nº 392/2007 as principais características ecológicas que caracterizam o estágio inicial são: ausência de estratificação definida; vegetação formando um único

estrato (emaranhado) com altura de até 3 (três) metros; espécies lenhosas com distribuição diamétrica de pequena amplitude com – DAP(diâmetro da altura do peito) médio de até 8 centímetros; espécies pioneiras abundantes; epífitas, se existentes, são representadas principalmente por líquens e briófitas com baixa diversidade; serapilheira, quando existente, forma uma fina camada, pouco decomposta, contínua ou não; trepadeiras, se presentes, geralmente herbáceas; presença de espécies indicadoras: Arbóreas - *Myracrodruon urundeuva*, *Anadenanthera colubrina*, *Piptadenia* spp., *Acacia* spp., *Aspidosperma pyrifolium*, *Guazuma umifolia*, *Combretum* spp. Arbustivas - *Celtis iguanaea*, *Aloysia virgata*, *Mimosa* spp., *Calliandra* spp., *Hibiscus* spp., *Pavonia* spp., *Waltheria* spp., *Sida* spp., *Croton* spp., *Helicteres* spp. Cipós: *Banisteriopsis* spp., *Pithecoctenium* spp., *Combretum* spp., *Merremia* spp., *Mansoa* spp., *Bauhinia* spp. e *Cissus* spp.

Como a Reserva Legal do Projeto de Assentamento Ulisses Oliveira possui área superior a 340 hectares, foi necessário realizar uma delimitação da área a ser avaliada. A delimitação foi realizada através da análise visual de imagens de satélite (software Qgis) e avaliação dos dados florísticos e fitossociológicos cedidos pelo Programa Popular de Agroecologia na Bacia do Rio Doce. Foi selecionada uma área contínua, formada de fragmento florestal, com cerca de 5 hectares para alocação das Unidades Amostrais.

Para coleta dos dados, foi realizado um transecto a partir do caminhar livre no sentido de maior comprimento de cada sistema. Foram distribuídos 6 pontos de coleta de dados. Em cada ponto de coleta foi instalada uma Unidade Amstral (UA) de 20 x 30 metros (600 metros quadrados), para amostragem dos parâmetros analisados no estudo, de acordo com a metodologia adaptada de Suarez et al. (2021).

Para avaliação dos atributos físicos e químicos do solo, em cada unidade amostral foram coletadas 10 sub amostras simples, na profundidade de 0-20 centímetros, com auxílio de trado do tipo holandês. Foram analisados os macronutrientes Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Potássio (K) e Fósforo (P), os atributos Acidez Potencial (H+Al), Matéria Orgânica (MO) e Potencial Hidrogeniônico (pH), e os micronutrientes Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Zinco (Zn). Também foi analisada a granulometria através da determinação dos teores de areia, silte e argila.

A análise dos atributos químicos e físico do solo foram preparadas e determinadas seguindo as metodologias descrita por EMBRAPA (2011). O pH foi determinado em água, CaCl₂ e SMP em solução solo:líquido a 1:2,5. Os teores de Ca, Mg e H+Al foram determinadas através da solução de KCl a 1 mol L⁻¹. Os teores de P, K e micros (Fe, Cu, Zn e Mg) foram determinados em solução Mehlich I. A MO foi obtida pelo método de oxidação com dicromato de potássio em meio ácido (Yeomans & Bremner, 1988). A análise granulométrica foi determinada pelo método da dispersão total.

Análises estatísticas

Para a análise estatística dos dados dendrométricos, inicialmente, uma análise estatística descritiva foi realizada para examinar a distribuição e variabilidade dos dados, seguindo as recomendações de Hair et al. (2019). Posteriormente, o método de correlação de Pearson foi empregado para construir correlogramas, conforme orientado por Mukaka (2012), a fim de investigar possíveis relações lineares entre as variáveis. Testes de hipótese foram então conduzidos para avaliar a significância estatística das correlações identificadas, alinhando-se com as diretrizes de Field (2013).

Para uma análise mais abrangente, a Análise de Componentes Principais (ACP) foi utilizada, uma técnica multivariada reconhecida na literatura (Jolliffe, 2002). O pacote factoextra para o software R foi empregado para visualizar graficamente as relações entre as variáveis por meio do Biplot, conforme sugerido por Kassambara e Mundt (2020).

Além disso, a análise de agrupamento (cluster) foi realizada por meio de dendrogramas, seguindo as recomendações de Everitt et al. (2011). A apresentação dos resultados em gráficos de heatmap permitiu a identificação de padrões de agrupamento tanto das variáveis quanto dos tratamentos, conforme sugerido por Warnes et al. (2022).

Para avaliar o efeito do tratamento em cada variável, o teste F da análise de variância foi utilizado, seguindo as práticas estatísticas convencionais (Montgomery, Peck & Vining, 2012). As comparações múltiplas entre os níveis do tratamento foram realizadas utilizando o teste Tukey, quando apropriado. Todos os testes foram avaliados ao nível de significância de 5%.

A análise estatística dos dados do solo seguiu procedimentos semelhantes, com adaptações necessárias para as características específicas dos dados. Foram aplicadas as mesmas técnicas estatísticas, seguindo as referências do software R.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados médios obtidos por sistema para cálcio, magnésio, potássio, acidez potencial, fósforo, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, cobre, ferro, manganês, zinco, capacidade de troca catiônica, soma de bases e saturação por bases referentes a profundidade de 0 - 20 centímetros são demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos químicos referente a profundidade de 0-20 cm em Sistemas Agroflorestais (SAF01, SAF02, SAF03 e SAF04) e Fragmento Florestal de Referência (FFR).

Descrição	Ca*	Mg*	K*	H+Al*	CTC*	SB*	V*
	cmolc dm ⁻³						%
FFR	2,57bc	0,88bc	0,03b	2,38a	5,85bc	3,48bc	59,40c
SAF01	3,53ab	1,43b	0,04b	2,00ab	7,01b	5,01b	71,54b
SAF02	4,75a	2,57a	0,11a	1,69b	9,12a	7,43a	81,09a
SAF03	3,06bc	1,14b	0,06b	1,38b	5,64bc	4,26b	75,62ab
SAF04	1,97c	0,51c	0,02b	1,47b	3,98c	2,51c	61,61c

Descrição	pH*	MOS*	P ^{ns}	Cu*	Mn*	Fe*	Zn*
	H ₂ O	%	mg dm ⁻³				
FFR	5,60b	2,07ab	4,71	0,86b	58,34c	106,84b	1,94b
SAF01	5,88b	2,06ab	16,73	0,84b	51,98c	116,56b	1,66b
SAF02	6,46a	2,72a	48,99	2,18a	118,43a	274,73b	7,46a
SAF03	6,32a	1,29b	36,96	1,02b	48,06c	168,28b	2,99b
SAF04	5,85b	1,26b	39,85	1,72a	89,84b	566,12a	1,79b

*Teste de Tukey a 5% de probabilidade. Valores seguidos de letras minúsculas e valores sem letra, comparam a diferença estatística do atributo entre os sistemas ou indicam ausência de diferença estatística, respectivamente. Ca: cálcio, Mg: magnésio, K: potássio, H+Al: Acidez potencial, CTC: capacidade de troca catiônica, SB: soma de bases, V: saturação por bases, pH: potencial hidrogeniônico, MOS: matéria orgânica do solo, P: fósforo, Cu: Cobre, Mn: Manganês, Fe: Ferro e Zn: Zinco.

O sistema SAF02 apresentou os maiores teores de cálcio (4,75 cmolc dm⁻³), magnésio (2,57 cmolc dm⁻³) e potássio (0,11 cmolc dm⁻³), com correlações positivas entre esses macronutrientes, pH, CTC, SB e V% (Figura 1). Esses atributos também foram estatisticamente superiores nesse sistema, refletindo maior acúmulo de bases trocáveis. Freitas et al. (2018a) destacam que sistemas com maior diversidade de espécies e adição de resíduos lenhosos favorecem o acúmulo de Ca e Mg no solo.

A MOS foi superior nos sistemas FFR, SAF01 e SAF02, classificados como médios (< 3%), enquanto SAF03 e SAF04 apresentaram baixos teores (< 1,5%). A MOS apresentou alta correlação com CTC entre 0,82 a 0,91, indicando sua influência direta na fertilidade do solo. Conforme Marchini et al. (2015), a MOS contribui para a melhoria da estrutura física, retenção de água e atributos químicos e biológicos do solo. Nos SAFs, a decomposição mais lenta da MOS, devido ao equilíbrio entre cultivo e aporte orgânico, contribui para sua preservação (Achmad et al., 2022).

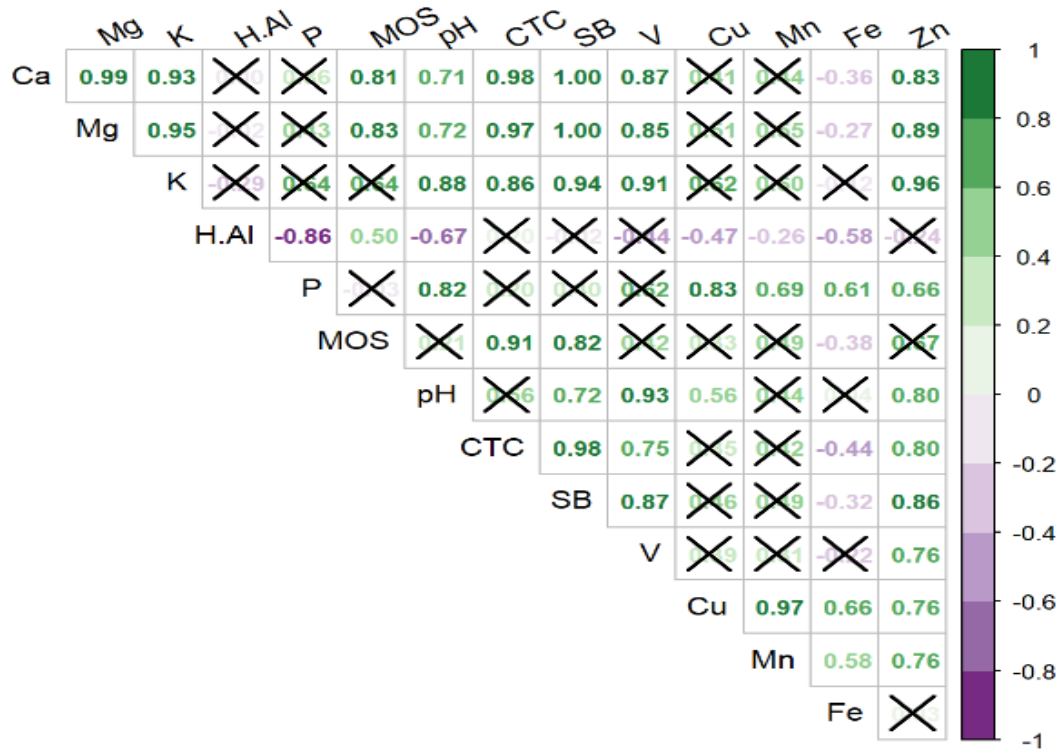


Figura 1. Matriz de correlação de Pearson entre atributos químicos do solo nos diferentes sistemas de uso (Sistemas Agroflorestais – SAFs – e cultivo convencional). As siglas correspondem a: Ca (cálcio), Mg (magnésio), K (potássio), H+Al (acidez potencial), P (fósforo), MOS (matéria orgânica do solo), pH (potencial hidrogeniônico), CTC (capacidade de troca catiônica), SB (soma de bases), V (saturação por bases), Cu (cobre), Mn (manganês), Fe (ferro) e Zn (zinco). O gradiente de cores indica a força e direção da correlação (de -1 a 1), sendo destacadas em verde as correlações positivas significativas e em roxo as negativas. X indica valores de menor magnitude.

O fósforo variou de 4,71 a 48,99 mg/dm³, com teores baixos (< 20 mg dm⁻³) nos sistemas FFR e SAF01 e altos (> 30 mg dm⁻³) nos demais, segundo a 5ª Aproximação. Apesar da variação absoluta, não houve diferença estatística, possivelmente pela alta variabilidade entre parcelas. A correlação negativa com H+Al ($r = -0,86$) sugere limitação da disponibilidade de P em solos mais ácidos. O fósforo, essencial para processos como fotossíntese, transferência de energia e desenvolvimento radicular, tem sua disponibilidade diretamente afetada pelo pH do solo (Khangura, Sharma, & Singh, 2023).

O pH foi estatisticamente superior nos sistemas SAF02 e SAF03 (>6), sendo classificados como altos (> 5,9), enquanto os demais apresentaram pH médio teor demais valores. O aumento do pH nesses sistemas pode ser atribuído ao manejo com culturas anuais e adubação verde nas entrelinhas, mesmo com dose de calcário semelhante entre os sistemas.

A acidez potencial (H+Al) foi maior no FFR (2,38 cmolc dm⁻³) e SAF01 (2,0 cmolc dm⁻³), embora classificada como baixa em todos os sistemas. A ausência de correlação com as bases trocáveis (Figura 1) confirma que a acidez potencial não atuou como fator limitante.

Quanto aos micronutrientes, o SAF02 apresentou os maiores teores de Cu (2,18 cmolc dm⁻³), Mn (118,43 cmolc dm⁻³) e Zn (7,46 cmolc dm⁻³), enquanto o SAF04 apresentou o maior teor de Fe (566,12

cmolc dm^{-3}). No entanto, Cu e Mn não apresentaram correlação significativa (Figura 1) com as bases trocáveis, reforçando sua dinâmica diferenciada no solo. A ausência de correlação entre P, Cu, Mn e H+Al com os demais atributos químicos reforça essa independência funcional (Figura 1).

De forma geral, a análise de correlação de Pearson evidenciou que os atributos de fertilidade do solo (Ca, Mg, K, pH, SB, CTC e V%) estão positivamente inter-relacionados e são influenciados pela presença de MOS, conforme observado no SAF02. Os resultados confirmam a relevância do manejo agroflorestal para a melhoria das condições químicas do solo, especialmente em sistemas com maior diversidade e ciclagem de nutrientes. Por outro lado, nos sistemas agroflorestais, a taxa de decomposição da matéria orgânica é mais lenta devido ao equilíbrio entre o cultivo e a entrada de matéria orgânica proveniente das árvores. Isso ocorre como uma estratégia complementar, contribuindo para a preservação da matéria orgânica no solo (Achmad et al., 2022).

A análise de componentes principais (ACP) confirmou os resultados do teste de médias, destacando o SAF02 como o sistema mais associado à fertilidade do solo (Figura 2). Esse sistema apresentou forte correlação com as bases trocáveis (Ca, Mg, K), matéria orgânica do solo (MOS), pH, CTC, SB e V%, indicando maior equilíbrio químico e disponibilidade de nutrientes. Os dois primeiros eixos da ACP explicaram 87,8% da variância total dos dados, sendo 62,5% atribuída ao Eixo 1 e 25,3% ao Eixo 2. A análise de agrupamento (Cluster) também isolou o SAF02 dos demais sistemas para a maioria dos atributos avaliados, corroborando sua singularidade química.

A superioridade do SAF02 pode estar relacionada ao manejo diversificado nas entrelinhas, com cultivo de espécies anuais como feijão, taioba, açafrão, mandioca e quiabo. Esse consórcio intensifica o aporte de resíduos orgânicos e favorece a ciclagem de nutrientes, promovendo o aumento da MOS e melhorando a estrutura e a retenção de nutrientes no solo (Freitas et al., 2018b; Achmad et al., 2022). A presença de pH mais elevado, aliado a teores superiores de P, Cu, Mn e Zn, também contribui para a melhor disponibilidade e absorção de nutrientes essenciais pelas plantas (Marchini et al., 2015; Khangura et al., 2023).

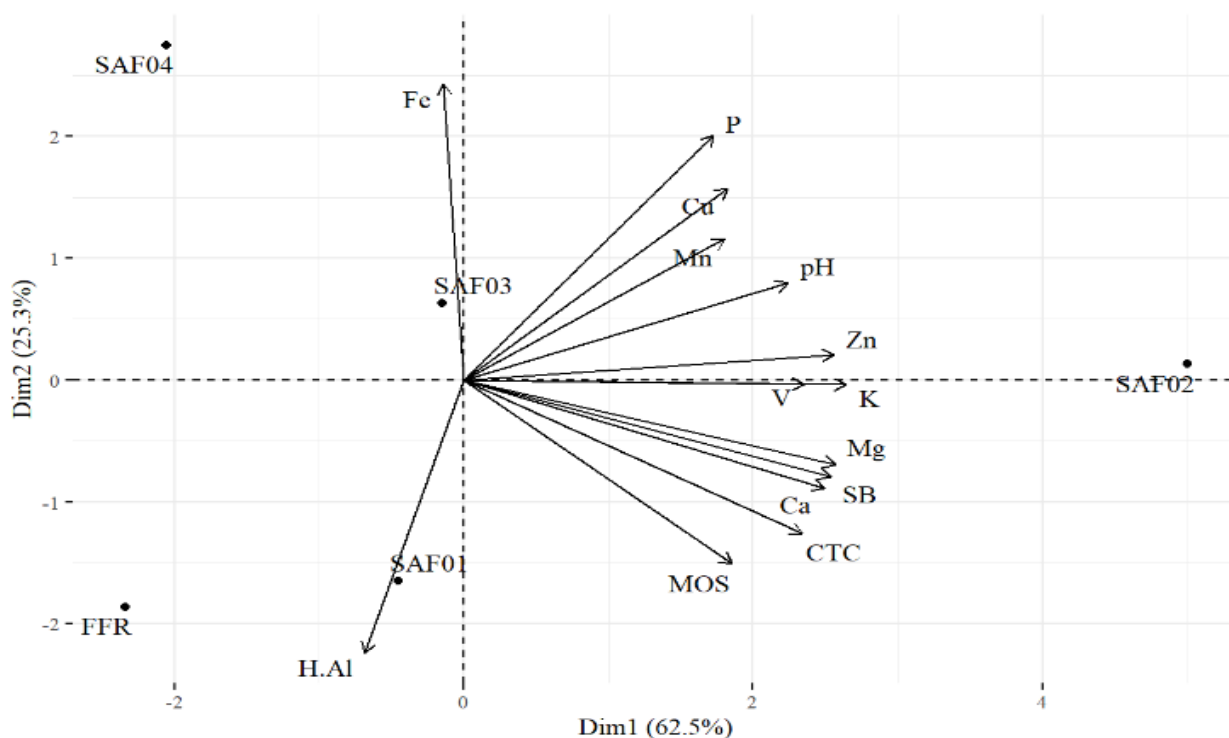


Figura 2. Análise de Componentes Principais (ACP) – Biplot dos atributos químicos do solo nos Sistemas Agroflorestais (SAFs) implantados em área impactada por barragem de mineração. As siglas representam: H+Al (acidez potencial), Mn (manganês), Cu (cobre), P (fósforo), Fe (ferro), SB (soma de bases), Ca (cálcio), Mg (magnésio), CTC (capacidade de troca catiônica), MOS (matéria orgânica do solo), Zn (zinco), K (potássio), V (saturação por bases) e pH. Os eixos Dim1 e Dim2 explicam, respectivamente, 62,5% e 25,3% da variância dos dados.

A análise de componentes principais (ACP) revela que o sistema FFR apresenta correlação negativa com o Componente Principal 1 (CP1), que explica 62,5% da variância total dos dados. Essa associação indica baixos teores de fósforo, pH e micronutrientes, com exceção do ferro, cujo valor se manteve elevado. Por outro lado, o SAF04 não apresentou contribuição expressiva na variação geral dos atributos químicos (Figura 2), embora tenha exibido os maiores teores de ferro, sendo, junto ao SAF03, um dos sistemas que mais explicam a variabilidade desse micronutriente.

A acidez potencial (H+Al) demonstrou relação inversa com fósforo, cobre, manganês, zinco e pH, indicando que o aumento da acidez está associado à diminuição desses nutrientes no solo (Figura 2). De forma semelhante, o ferro apresentou correlação negativa com potássio, cálcio, magnésio, saturação por bases (V%), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e matéria orgânica do solo (MOS). O ferro destacou-se como a variável mais associada à variação explicada pelo CP2, responsável por 25,3% da variância total.

Apesar dessas relações, os dados de acidez sugerem que o H+Al não representa um fator limitante relevante ao desenvolvimento vegetal nos sistemas analisados. De acordo com os critérios da 5ª aproximação da Embrapa (2011), os valores médios de acidez foram considerados baixos, indicando que os manejos realizados durante a implantação dos sistemas foram eficazes na neutralização da acidez do

solo. Além disso, as espécies arbóreas nativas utilizadas nos projetos de restauração demonstraram boa adaptação às condições químicas do solo, mesmo em ambientes inicialmente mais ácidos.

A análise de agrupamento (Figura 3) corrobora os resultados da ACP, evidenciando formação de grupos entre os sistemas e os atributos químicos. O SAF01 agrupou-se com o FFR, indicando características químicas similares. O SAF03 e o SAF04 formaram outro grupo, sugerindo padrões semelhantes de fertilidade e composição química. O SAF02, por sua vez, manteve-se isolado dos demais sistemas, confirmando sua singularidade em termos de fertilidade do solo e sua maior correlação com a maioria dos atributos químicos avaliados.

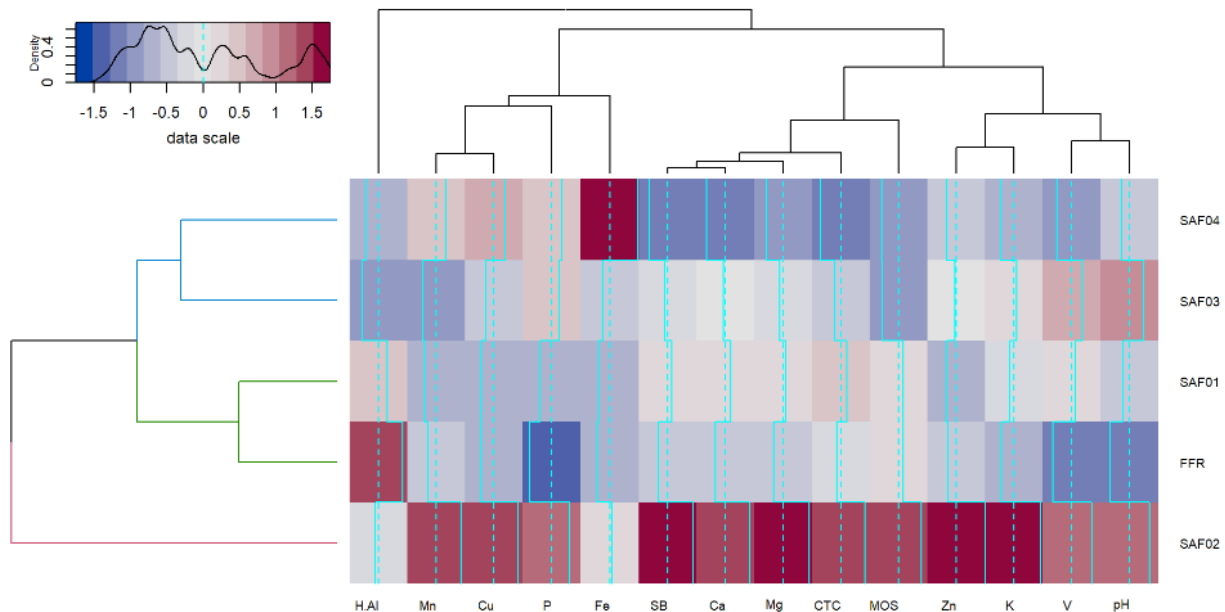


Figura 3. Análise de agrupamento hierárquico (cluster) dos atributos químicos do solo em diferentes Sistemas Agroflorestais (SAFs) implantados em área impactada por barragem de mineração. As siglas representam os atributos: H+Al (acidez potencial), Mn (manganês), Cu (cobre), P (fósforo), Fe (ferro), SB (soma de bases), Ca (cálcio), Mg (magnésio), CTC (capacidade de troca catiônica), MOS (matéria orgânica do solo), Zn (zinco), K (potássio), V (saturação por bases) e pH. O gradiente de cores indica a variação padronizada dos teores (z-score) entre os sistemas avaliados.

Houve a formação de grupo entre as variáveis SB, Ca, Mg, CTC e MOS (Figura 3), corroborando os dados apresentados pela análise de componentes principais (Figura 2).

A fertilidade química do solo, avaliada através da análise dos parâmetros químicos, demonstra em geral que o SAF02 se assemelhou em vários parâmetros com o fragmento florestal utilizado como referência comparativa. Este fato demonstra que a diversidade de espécies aliada a intensificação de manejo e aporte de material orgânico propiciada por este SAF pode refletir na melhoria da qualidade do solo, criando condições adequadas para o desenvolvimento das espécies vegetais implantadas.

Tabela 2. Análise granulométrica do solo na camada de 0 a 20 cm de profundidade nos diferentes sistemas de uso. Os valores expressam as porcentagens de argila, areia e silte nos Sistemas Agroflorestais (SAF01, SAF02, SAF03 e SAF04) e na área de referência (FFR – fragmento de floresta restaurada).

Descrição	Argila	Areia	Silte
	%		
FFR	15,59	72,26	12,15
SAF01	9,81	73,70	16,50
SAF02	8,12	85,92	5,96
SAF03	24,26	63,94	11,80
SAF04	11,55	81,87	6,58

Não houve diferença estatística no percentual de composição das frações areia, silte e argila entre os sistemas avaliados. Do ponto de vista granulométrico os sistemas apresentaram composição semelhante. Entretanto a análise de ACP (Figura 4) evidencia que alguns sistemas tiveram maior influência na variação dos dados comparativamente aos demais.

Não há diferença de classe de solo entre os sistemas. Quanto a classificação de textura os sistemas FFR e SAF01 são “franco arenoso”. O SAF02 e SAF04 são considerados “areia franca”. Já o SAF03 é classificado como franco argiloso.

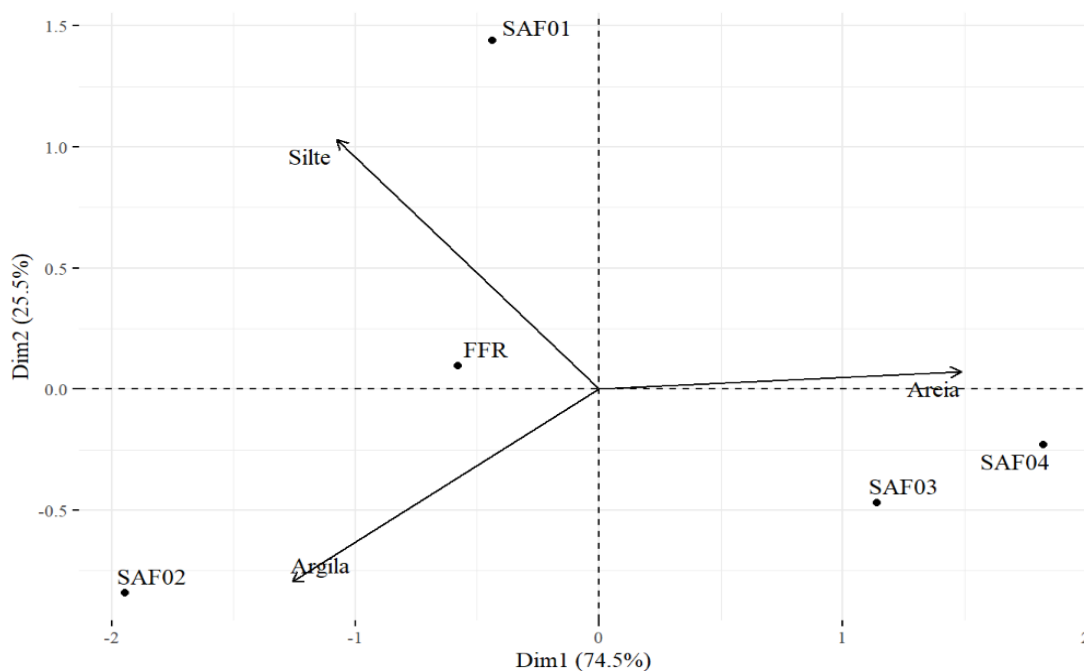


Figura 4. Análise de Componentes Principais (ACP) – Biplot da análise granulométrica do solo nos Sistemas Agroflorestais (SAFs) e fragmento de floresta restaurada (FFR). O gráfico mostra a distribuição dos sistemas de uso com base nas variáveis texturais: argila, areia e silte. Os componentes principais Dim1 e Dim2 explicam, respectivamente, 74,5% e 25,5% da variância total. As setas indicam a contribuição e direção de influência de cada variável granulométrica na separação dos sistemas.

Os dois primeiros componentes principais (Dim1 e Dim2) explicam, em conjunto, 100% da variabilidade total dos dados de areia, silte e argila (Figura 4). O CP1 (74,5% de variabilidade) é o componente que mais contribuiu para explicar a variabilidade dos dados, indicando que os sistemas e variáveis estão fortemente correlacionados nesse eixo. O CP2 (25,5% de variabilidade) representou uma parcela menor da variabilidade total, mas ainda possui relevância na explicação das relações entre os dados.

Quanto a distribuição dos sistemas no espaço de componentes, os sistemas SAF03 e SAF04 estão posicionados em direção oposta ao SAF02 no CP1, indicando diferenças significativas em relação às características analisadas. O CP2 não apresentou similaridade entre os sistemas. A areia apresentou maior contribuição para o CP1, sendo um fator importante para distinguir os sistemas SAF03 e SAF04 do SAF02. A silte apresentou valor positivo no CP2, contribuindo para variabilidade dos sistemas SAF01, FFR e SAF02 ao longo do eixo (Figura 4).

Trabalhos demonstram que as propriedades do solo foram melhoradas em sistemas agroflorestais em comparação com sistemas de monocultivo (Paudel, Bhandari & Joshi, 2012; Bardhan & Udawatta, 2013; Silva, 2013). Entretanto a textura do solo é uma propriedade pouco influenciada pelos sistemas de cultivo e mais dependente do material de origem e grau de intemperismo dos grânulos de areia, silte e argila.

CONCLUSÃO

Os sistemas agroflorestais avaliados demonstraram potencial para restaurar a fertilidade do solo em áreas impactadas por mineração, com destaque para o SAF02. A diversidade de espécies e o manejo adotado favoreceram a ciclagem de nutrientes e o acúmulo de matéria orgânica, evidenciando sua eficácia como ferramenta de restauração ecológica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achmad, B., Sugiarto, M., Wiryawan, B., & others. (2022). Traditional subsistence farming and agroforestry: A review of implications for soil fertility and food security. *Sustainability*, 14(14), 8631. <https://doi.org/10.3390/su14148631>
- Achmad, D. L., Akbar, T., Ginting, A. N., & Hidayat, Y. (2022). The effect of agroforestry systems on soil multifunctionality: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 851, 158255. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158255>
- Bardhan, S., & Udawatta, R. P. (2013). Apparent soil electrical conductivity used to determine soil phosphorus variability in poultry litter amended pastures. *Journal of Environmental Agriculture and Innovation*, 3(2), 45–56.
- Brancalion, P. H. S., Viani, R. A. G., Strassburg, B. B. N., & Rodrigues, R. R. (2012). Finding the money for tropical forest restoration. *Unasylva*, 63(239), 41–50.

- Carmo, F. F., Kamino, L. H. Y., Tobias Junior, R., Campos, I. C., Carmo, F. F., Silvino, G., Pinto, C. E. F., & others. (2017). Fundão tailings dam failures: The environmental tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 15(3), 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. (2015). Nota técnica sobre o rompimento da barragem de Fundão, Mariana – MG. CPRM.
- Embrapa Solos. (2013). Argissolos Vermelho e Vermelho-Amarelo: características e manejo. Embrapa Solos.
- Embrapa Solos. (2011). Manual de métodos de análise do solo (2^a ed.). Embrapa.
- Everitt, B. S., Landau, S., Leese, M., & Stahl, D. (2011). Cluster analysis (5th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470977811>
- Field, A. (2013). Discovering statistics using IBM SPSS Statistics (4th ed.). SAGE.
- Foong, S. Z. Y., Karim, A. A., Abas, F., & Lim, S. J. (2022). Agroforestry as a climate-resilient strategy for enhancing food security and ecosystem services. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(10), 14267–14284. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16625-5>
- Freitas, L. B., Silva, F. R., & Oliveira, K. C. (2018). Intensified agroforestry systems enhance soil nutrient availability in degraded tropical soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 258, 160–169.
- Freitas, W. K., Souza, L. A., Pinto, L. F. B., & Ferreira, A. G. (2018). Soil nutrient contents and phytosociology in agroforestry systems in the mountainous region of Rio de Janeiro, Brazil. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 40, e35368. <https://doi.org/10.4025/actascibiols.v40i1.35368>
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). Multivariate data analysis (8th ed.). Cengage.
- INDE – Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais. (2004). Mapeamento de cobertura vegetal do Brasil. INDE.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. (2022). Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). <https://bdmep.inmet.gov.br>
- Jolliffe, I. T. (2002). Principal component analysis (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/b98835>
- Kassambara, A., & Mundt, F. (2020). factoextra: Extract and visualize the results of multivariate data analyses. R package.
- Khangura, H., Sharma, D., & Singh, M. (2023). Effect of soil pH on phosphorus availability in tropical soils. *Plant and Soil*, 469, 387–407. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05177-4>
- Khangura, R., Ferris, D., Wagg, C., & Bowyer, J. (2023). Regenerative agriculture: Literature review on practices and mechanisms improving soil health. *Sustainability*, 15(3), 2338. <https://doi.org/10.3390/su15032338>

- Marchini, A. J., Viana, E. M., Campos, M., & Silva, J. B. (2015). Recovery of soil structure and fertility under fast-growing tropical grasses. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 40, e0150482. <https://doi.org/10.1590/18069157rbcs20150482>
- Marchini, M., Fernandes, R. B. A., & Rodrigues, R. R. (2015). Soil quality indicators and evaluation of restoration success. In P. H. S. Brancalion & R. R. Rodrigues (Eds.), *Restauração florestal* (pp. 271–284). Oficina de Textos.
- Mar, E. M. (2016). *Clima e recursos hídricos do Brasil*. Oficina de Textos.
- Martins, S. V. (2018). *Restauração ecológica de ecossistemas degradados* (2ª ed.). UFV.
- Martins, S. V., Batista, R. A., & Lopes, J. F. B. (2022). Ecological restoration in areas impacted by mining tailings: Challenges and perspectives. *Cadernos de Agroecologia*, 17(2), e3075.
- Martins, S. V., Silva, K. A., & Barros, M. V. (2020). Ecological restoration techniques and their practical applications. *Revista Árvore*, 44, e440210. <https://doi.org/10.1590/1806-90882020000200010>
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to linear regression analysis* (5th ed.). Wiley.
- Mukaka, M. M. (2012). A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi Medical Journal*, 24(3), 69–71.
- Omachi, C. Y., Soares, C. A., Leles, P. S. S., & Jacovine, L. A. G. (2018). Multicriteria analysis for defining priority areas for ecological restoration in the Doce River Basin. *Revista Árvore*, 42(4), e420410. <https://doi.org/10.1590/1806-90882018000400010>
- Paudel, D. R., Bhandari, R. J., & Joshi, R. (2012). Agroforestry buffer systems for improving soil quality in row crop landscapes. *Journal of Soil and Water Conservation*, 67(2), 113–122. <https://doi.org/10.2489/jswc.2022.1028A>
- Philipson, C. D., & others. (2020). Active restoration accelerates the carbon recovery of human-modified tropical forests. *Science*, 369(6508), 838–841. <https://doi.org/10.1126/science.aba5036>
- R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org>
- Silva, M. A. (2013). Soil fertility improvement under agroforestry and monoculture systems in the tropics. *Journal of Tropical Ecology*, 29(5), 1–10.
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumberras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araújo Filho, J. C., Oliveira, J. B., & Cunha, T. J. F. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos* (5ª ed.). Embrapa.
- SOS Mata Atlântica. (2017). *Nota técnica: Avaliação dos impactos e ações de reparação da tragédia de Mariana*. Fundação SOS Mata Atlântica.
- Suarez, F., & others. (2021). *Adapted protocol for assessing sampling units in ecological restoration* [Technical report].
- Signorelli, A. (1997). *Geografia física da microrregião do Vale do Rio Pardo*. EDUNISC.

- Van Noordwijk, M., & others. (2019). Agroforestry into the future: How far and how fast? In M. van Noordwijk (Ed.), *Sustainable development through trees on farms* (pp. 229–247). World Agroforestry (ICRAF). <https://doi.org/10.3390/land10070699>
- Warnes, G. R., & others. (2022). *gplots: Various R programming tools for plotting data*. R package.
- Xu, S., Eisenhauer, N., Zeng, Z., Mo, X., Ding, Y., Lai, D. Y. F., & Wang, J. (2024). Drivers of soil organic carbon recovery under forest restoration: A global meta-analysis. *Carbon Research*, 3, 80. <https://doi.org/10.1007/s44246-024-00165-6>
- Yeomans, J. C., & Bremner, J. M. (1988). A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 19(13), 1467–1476. <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>

Avaliação dos índices vegetativos por sensoriamento remoto em perímetros irrigados no município de Juazeiro-BA

Recebido em: 15/11/2025

Aceito em: 09/12/2025

 10.46420/9786585756693cap2

Felipe Salis de Oliveira 

Enio Pedro Mesquita Souza 

Adélia Ribeiro 

Acácio Figueiredo Neto 

Flávio José Vieira de Oliveira 

INTRODUÇÃO

A análise dos resultados demonstrou que o município, Juazeiro destacam por possuírem elevada extensão de áreas irrigadas associada a altos valores de Valor Adicionado Bruto (VAB) da agropecuária (Gaúna & Ferrarini, 2025). Devido à sua dependência direta de elementos climáticos, como temperatura e precipitação, a atividade agrícola estar suscetível a condições adversas que resultam em riscos climáticos e instabilidades produtivas. Na bacia hidrográfica do Rio São Francisco, os avanços tecnológicos, juntamente com os investimentos em infraestrutura de irrigação, desempenham papel estratégico na atenuação desses efeitos e no incremento da produtividade agropecuária (Santos et al., 2020; Almeida et al., 2021).

A fruticultura irrigada constitui um dos principais vetores do desempenho econômico do Vale do São Francisco, com impactos positivos nos cenários regional e nacional. No Submédio do vale, a expansão desse sistema produtivo ocorreu, sobretudo, com foco na produção e na exportação de frutas frescas. (Baiardi & Ribeiro, 2023). Esse modelo agrícola consolidou-se principalmente no Submédio do Vale, com foco na produção e exportação de frutas in natura. Apesar de outros municípios vizinhos também desenvolverem tal atividade, a maior concentração ocorre entre Petrolina (PE) e Juazeiro (BA), que formam o principal polo de irrigação do Nordeste. Essa área engloba mais de 120 mil hectares cultivados, destinados à produção diversificada de frutas e hortaliças (Silva, Mendonça, 2022).

Dada a importância a promoção das atividades agrícolas no vale do São Francisco, cabe incorporar tecnologias que potencializem ganhos de produtividade favorecendo o desenvolvimento socioeconômico, nesta virtude é válido destacar a agricultura de precisão (AP). A aplicação de tecnologias no ambiente agrícola possibilita a análise da variabilidade espacial, permitindo o estudo heterogêneo do campo com o objetivo de otimizar o uso dos recursos, além de aprimorar a qualidade, a produtividade, a rentabilidade e a sustentabilidade (Carrer, et al., 2022).

Dentre as principais tecnologias empregadas, destacam-se: a sistematização do plantio com o suporte de sistemas de posicionamento global (GPS) e imagens obtidas por satélites ou drones; colheita automatizada com uso de piloto automático; análises de solo com georreferenciamento; monitoramento de pragas e doenças por meio de imagens aéreas; e aplicação de fertilizantes, corretivos e defensivos em taxas variáveis (Monzambani, et al., 2021).

O sensoriamento remoto aplicado à vegetação baseia-se, predominantemente, na aquisição de informações relacionadas à refletância das ondas eletromagnéticas provenientes da copa das plantas, por meio do uso de sensores passivos. Sabe-se que a refletância da radiação eletromagnética associada à vegetação apresenta variações em função da espécie vegetal, do conteúdo hídrico dos tecidos e de outros fatores intrínsecos (Liu, Sun & Liu, 2016).

As respostas espectrais da vegetação no espectro eletromagnético são determinadas pelas características químicas e morfológicas da superfície dos órgãos vegetais, especialmente das folhas (Zhang & Kovacs, 2012). As principais aplicações dessa técnica concentram-se nas seguintes faixas do espectro: (i) ultravioleta (UV), compreendida entre 10 e 380 nm; (ii) visível, que abrange as regiões azul (450–495 nm), verde (495–570 nm) e vermelha (620–750 nm); e (iii) infravermelho próximo e médio, situado entre 850 e 1700 nm (Rahim et al., 2016; Cruden, Prabhu & Martinez, 2012). A emissividade superficial das folhas, equivalente à absortividade na faixa de ondas térmicas, em plantas verdes plenamente desenvolvidas e sem estresse biótico ou abiótico, apresenta valores típicos entre 0,96 e 0,99, sendo mais comum a variação entre 0,97 e 0,98 (Hatfield, Baker & Viney, 2005).

Com o uso de instrumentação espectral de alta resolução, o número de bandas obtidas por sensoriamento remoto está aumentando e a largura de banda está se tornando mais estreita (Honkavaara et al., 2013). Um dos índices mais usados e implementados, calculado a partir de informações multiespectrais como razão normalizada entre as bandas do vermelho e do infravermelho próximo, é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Karnieli et al., 2010).

O NDVI foi originalmente proposto por Rouse et al. (1973). Posteriormente, Huete (1988) desenvolveu o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), com o objetivo de reduzir os efeitos do brilho do solo, por meio da incorporação do fator de correção L ao NDVI. Assim, pode ser entendida como uma representação abrangente de um amplo conjunto de informações espectrais do solo, oriundas de diferentes ambientes (Baret, Jacquemoud & Hanocq 1993).

Nesse contexto, parte-se da hipótese de que a aplicação da obtenção dos índices vegetativos em imagens de satélite obtidas a partir de distintas bandas espectrais pode fornecer resultados que tragam informações sobre o desenvolvimento das condições de plantio em projetos irrigados.

MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente, procedeu-se à obtenção dos arquivos vetoriais necessários para a delimitação das áreas de estudo, os quais foram adquiridos por meio da plataforma GEOCODEVASF, disponibilizada pela Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (Geoportal, 2025). De forma complementar, as malhas estaduais e municipais foram obtidas no portal do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (IBGE, 2025), possibilitando a construção dos mapas por meio do software QGIS, versão 3.44 (QGIS Development Team, 2024), destinados à caracterização de cada área de estudo.

Inserção do Projeto Curaçá ocorreu entre os anos de 1975 e 1979. Em 1980, com o início da ocupação e operação, foram distribuídos 268 lotes para pequenos produtores, abrangendo uma área de 1.959 hectares, além de 22 lotes destinados a empresas, que ocuparam 2.386 hectares totalizando 4.345 hectares irrigáveis. Atualmente, estão em uso 4.343 hectares, sendo 1.783 hectares distribuídos entre os 268 lotes familiares e 2.560 hectares concentrados em 17 lotes empresariais. a Infraestrutura social do projeto conta com quatro núcleos habitacionais, dois centros técnico-administrativos, os cultivos de manga e uva. São predominantes (CODEVASF, 2024a).

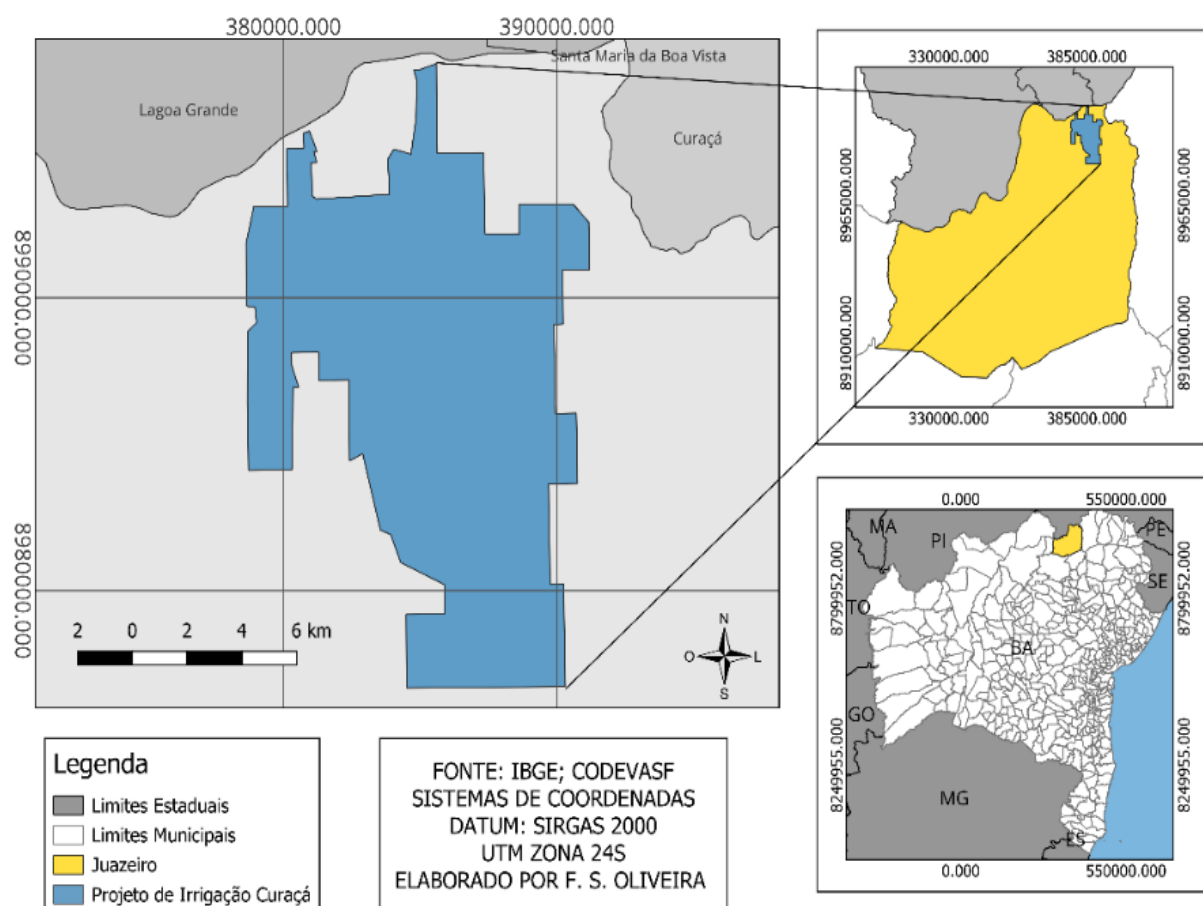


Figura 1. Mapa de localização do projeto de irrigação Curaçá. Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Implantação do Projeto Maniçoba ocorreu entre os anos de 1975 e 1981. Quando entrou em operação, em 1980, o projeto possuía uma área total de 4.268 hectares, sendo 1.889 hectares distribuídos entre 234 lotes destinados a pequenos irrigantes e 2.379 hectares ocupados por 80 lotes voltados à atividade empresarial. Conta com um centro técnico-administrativo e dois núcleos habitacionais integrado o projeto - Atualmente área irrigável ocupada corresponde a 4.798 hectares, dos quais 62% são destinados à produção empresarial, a cultura predominante no projeto é a manga, representando 74% do total, seguida pela uva, com 14%, e pela cana-de-açúcar, com 5%. As demais culturas contribuem com 7% do valor total da produção. (CODEVASF, 2024b).

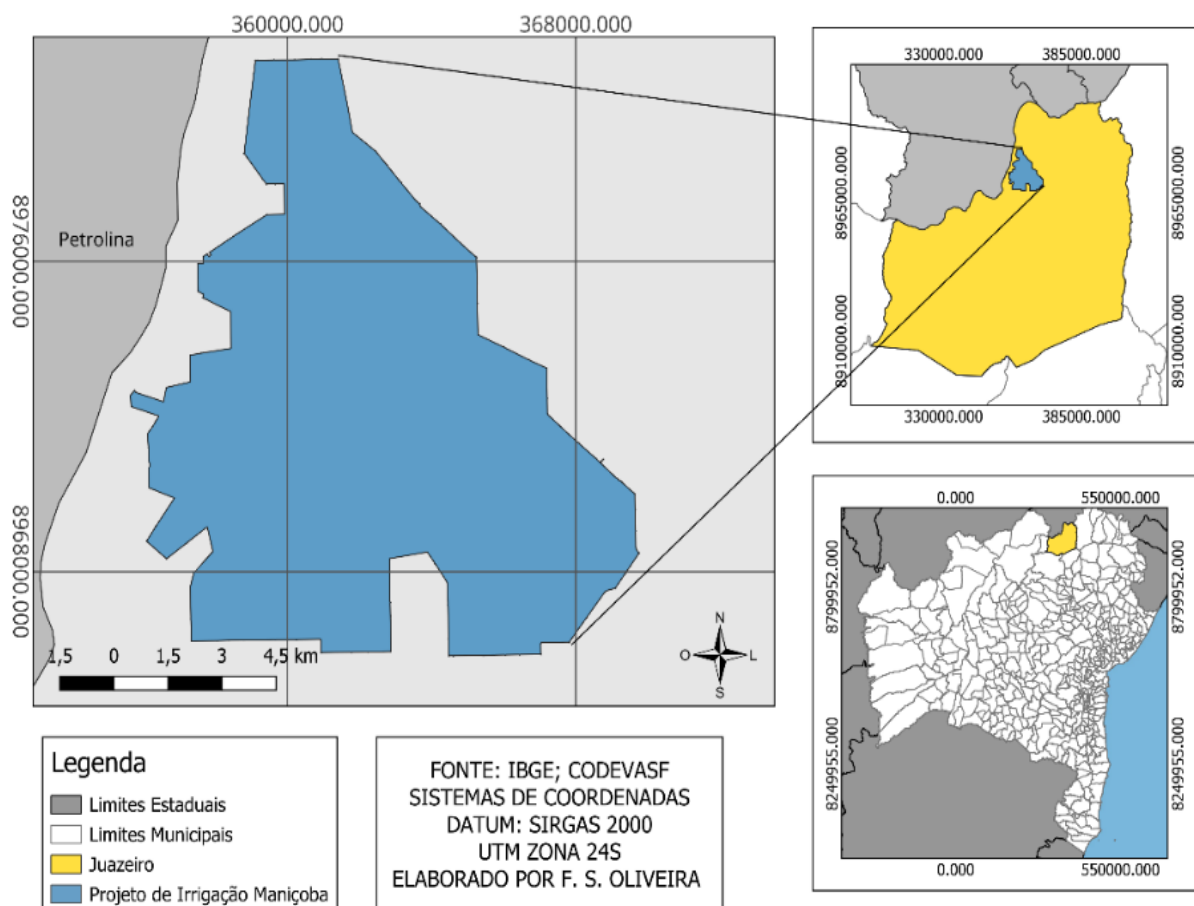


Figura 2. Mapa de localização do projeto de irrigação Maniçoba. Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Projeto Público de Irrigação Mandacaru foi estabelecimento em 1972. Quando teve início sua ocupação e operação, abrangia uma área de 419 hectares, sendo 368 hectares distribuídos em 54 lotes para pequenos produtores e 51 hectares em 2 lotes empresariais.

No projeto, foram implantados dois núcleos habitacionais e, atualmente, a área irrigável ocupada corresponde a 445 hectares. Produção agrícola A manga é a principal cultura, ocupa 63% da área cultivada e é responsável por 53% da produção total em 2023. Toda a área do projeto é cultivada por produtores familiares, correspondendo a 100% da área total (CODEVASF, 2024c).

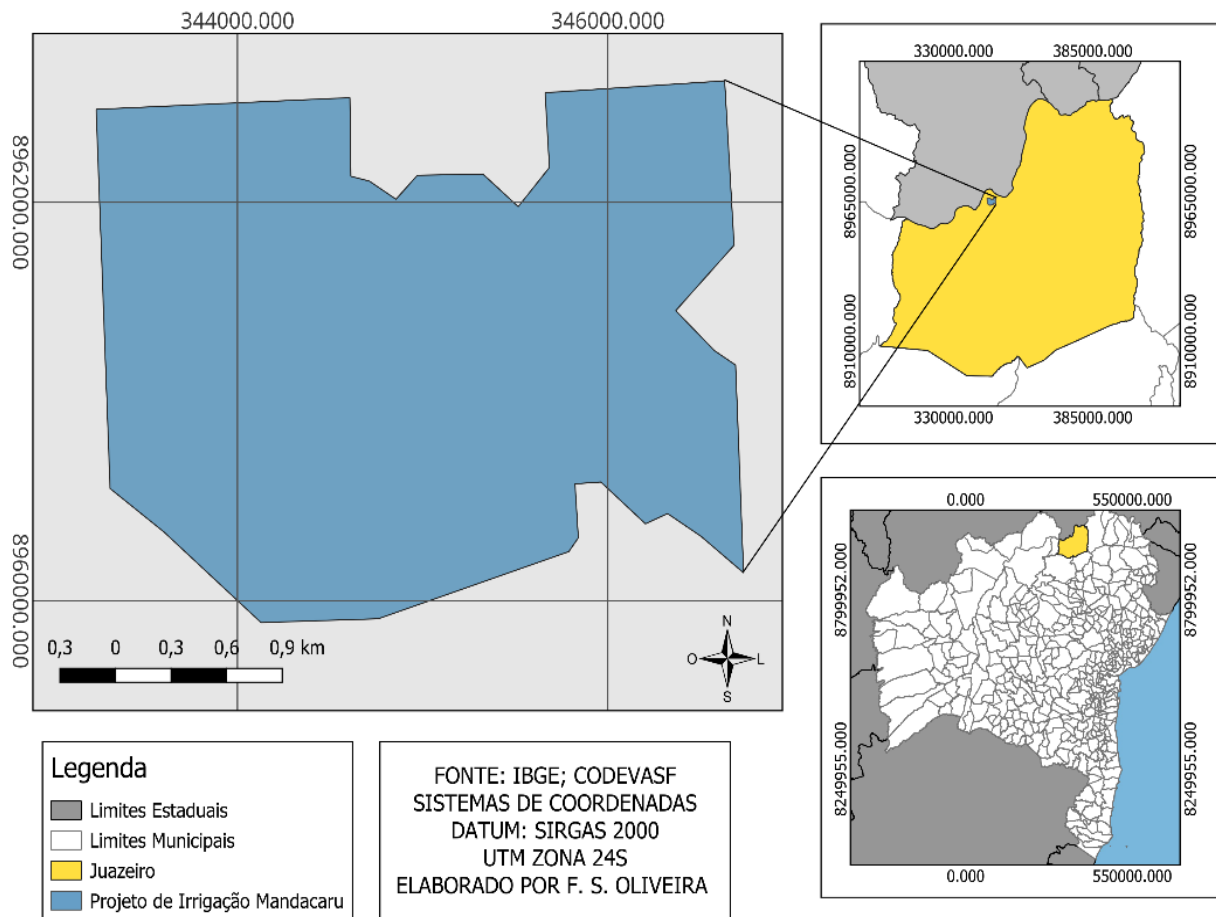


Figura 3. Mapa de localização do projeto de irrigação Mandacaru. Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Fundado entre os anos de 1977 e 1979, a área inicial da iniciativa abrangia 10.710 hectares, divididos entre 37 lotes destinados a pequenos produtores irrigantes, somando 211 hectares, e 14 lotes empresariais, correspondentes a 10.499 hectares. O projeto, apresenta um núcleo habitacional e um centro técnico-administrativo. Atualmente a área total é de 14.260 hectares, sendo 99% dessa extensão correspondente à área empresarial. Projeto de Irrigação destacou-se pela predominância da cultura da cana-de-açúcar, que ocupou 97% da área cultivada e foi responsável por 93% do Valor Bruto da Produção do projeto (CODEVASF. 2024d).

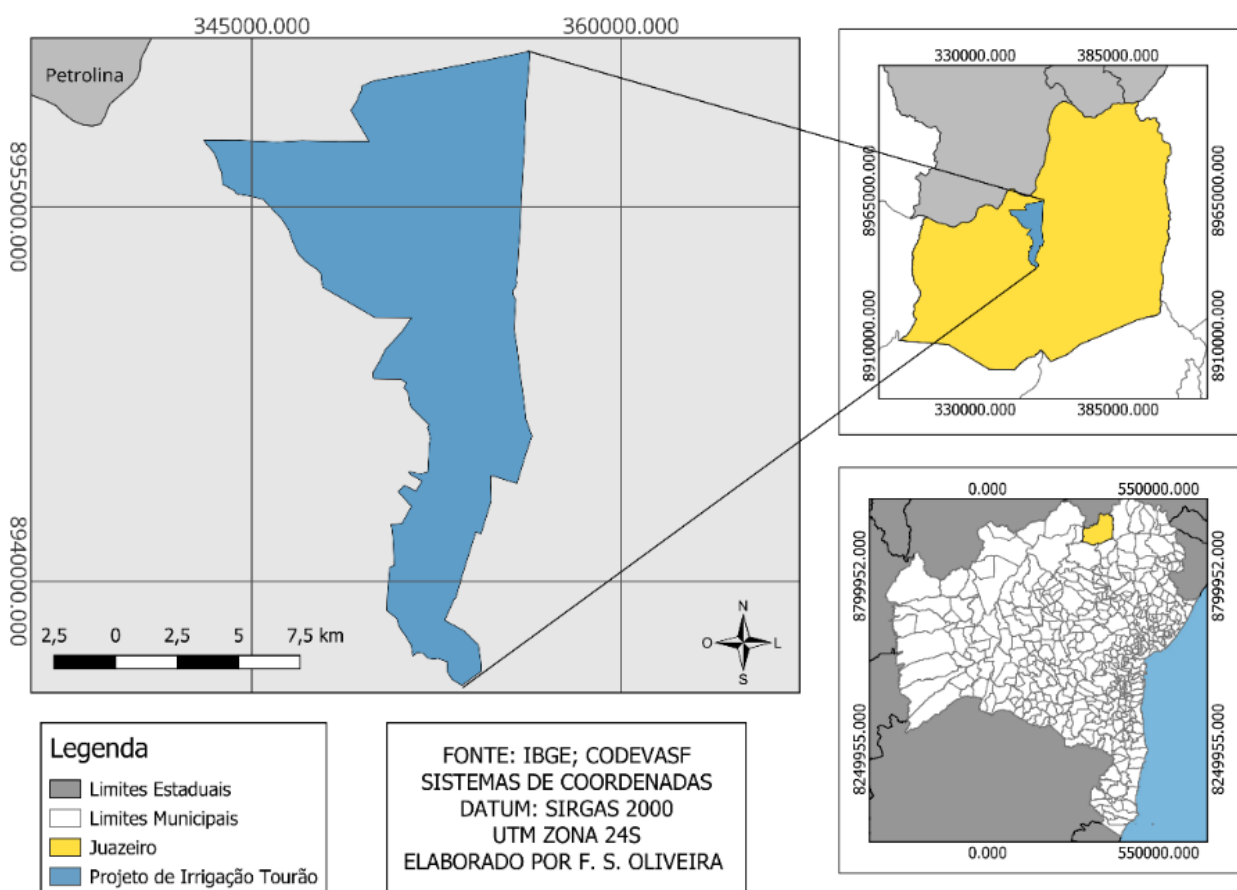


Figura 4. Mapa de localização do projeto de irrigação Tourão. Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 1. Especificações de bandas do Sentinel 2. Adaptado de ESA (2024)

Resolução Espacial	Nº Banda	Banda Espectral	Comprimento de Onda (nm)
10 m	B2	Blue (Azul)	490
	B3	Green (Verde)	560
	B4	Red (Vermelho)	665
	B8	NIR (Infravermelho Próximo)	842
20 m	B5	Red Edge 1	705
	B6	Red Edge 2	740
	B7	Red Edge 3	783
	B8a	Red Edge 4	865
	B11	SWIR 1	1610
	B12	SWIR 2	2190
60 m	B1	Aerossol	443
	B9	Water Vapor	940
	B10	Cirrus	1375

O sensor MSI (Multispectral Instrument), a bordo dos satélites Sentinel-2, em função de sua resolução espacial, espectral. O MSI é composto por 13 bandas espectrais, distribuídas entre as regiões do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas, com resoluções espaciais de 10, 20 e 60 m, permitindo análises detalhadas da cobertura vegetal (Drusch et al., 2012).

A tabela 1 apresenta especificação técnica dos sensores MSI embarcado no satélite, onde no presente estudo foram selecionadas cenas de baixa cobertura de nuvens e já submetidas ao pré-processamento atmosférico, feito através da própria plataforma. O Sentinel-2 oferece resolução espacial de 10 metros com frequência de revisita em 5 dias, o período de catalogação da imagem de satélite foi realizado 01/06/2025, como indica a (European Space Agency, 2025; Copernicus, 2025).

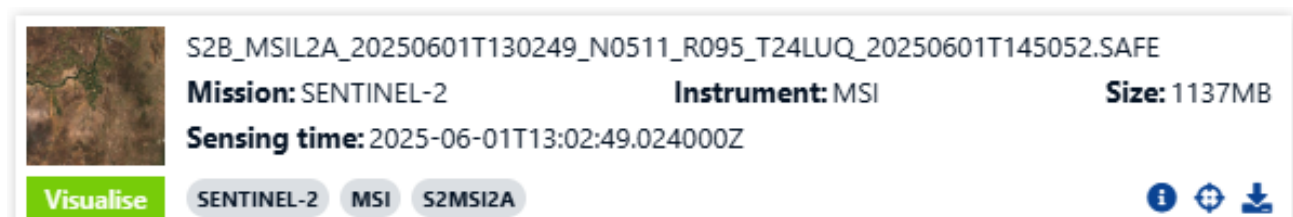


Figura 5. Resultado da busca por imagem de satélite Sentinel-2. Fonte: Copernicus browser (2025)

A partir das imagens obtidas, serão determinados dois índices espectrais, o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI). Cada um desses índices é calculado com base em diferentes combinações de bandas espectrais, sobretudo nas faixas do vermelho (Red), azul (Blue) e infravermelho próximo (NIR).

Será empregado para indicar a densidade de biomassa verde e o vigor da vegetação, sendo calculado pela fórmula proposta por Rouse et al., (1973).

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

Onde:

NIR = Reflectância na região espectral do infravermelho próximo;

RED = Reflectância na região espectral do vermelho.

Esse varia de -1 a 1, sendo que valores próximos de 1 estão associados à vegetação densa, vigorosa e saudável, enquanto valores próximos de 0 ou negativos indicam a presença de solos expostos, áreas urbanizadas ou corpos d'água, em função da baixa ou inexistente atividade fotossintética nesses alvos (Rouse et al., 1973; Jensen, 2015; Xue & Su, 2017).

Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) será aplicado para minimizar a influência do solo sobre os dados, especialmente em áreas com baixa cobertura vegetal. Ele introduz um fator de correção L. Elaborada por Huete (1988)

$$SAVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED + L) \times (1 + L)}$$

Onde:

NIR = Banda de reflectância espectral do infravermelho próximo;

RED = Banda de reflectância espectral do vermelho;

L = Fator de ajuste para o substrato do dossel (com a possibilidade de ser 1,0 – cobertura vegetal pouco densa; 0,5 - cobertura vegetal densidade intermediária; 0,25 - cobertura vegetal muito densa).

No Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), o fator de correção do solo (L) pode variar conforme a densidade da cobertura vegetal. Valores menores de L são recomendados para áreas com vegetação densa, enquanto valores mais elevados são indicados para regiões com vegetação esparsa ou presença significativa de solo exposto, pois reduzem a influência do brilho do solo na resposta espectral da vegetação (Huete, 1988; Xue & Su, 2017)

As imagens serão recortadas conforme os limites geográficos dos perímetros irrigados e convertidas em mapas temáticos que representarão espacialmente os valores de NDVI e SAVI. O processamento dos dados geoespaciais, incluindo o cálculo dos índices espectrais, será realizado no QGIS, que permite a manipulação das imagens para gerar mapas temáticos a partir das bandas espectrais. Com base nos resultados obtidos, serão delimitadas as zonas com diferentes níveis de vigor vegetativo. As variáveis extraídas dos índices espectrais serão tratadas com base em estatísticas descritiva.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As imagens geradas pelos índices representam todas as áreas de estudo, mapa de NDVI e SAVI Figura 6 e 7, mostra uma distribuição mais contrastante, com áreas bem definidas de vegetação densa (tons mais verdes) e regiões amplas classificadas como “Sem Vegetação” ou “Vegetação Muito Rala” (tons avermelhados).

Projeto Curaçá, os valores médios obtidos para os índices de vegetação indicam uma cobertura vegetal moderada, com o NDVI apresentando média de 0,310 e o SAVI um pouco superior, com média de 0,388. Esses resultados sugerem a presença de vegetação ativa, ainda que com variações ao longo da área analisada. O desvio padrão para ambos os índices foi relativamente próximo, sendo 0,137 para o NDVI e 0,172 para o SAVI, o que demonstra uma dispersão moderada dos valores em torno da média conforme apresentado na Tabela 2.

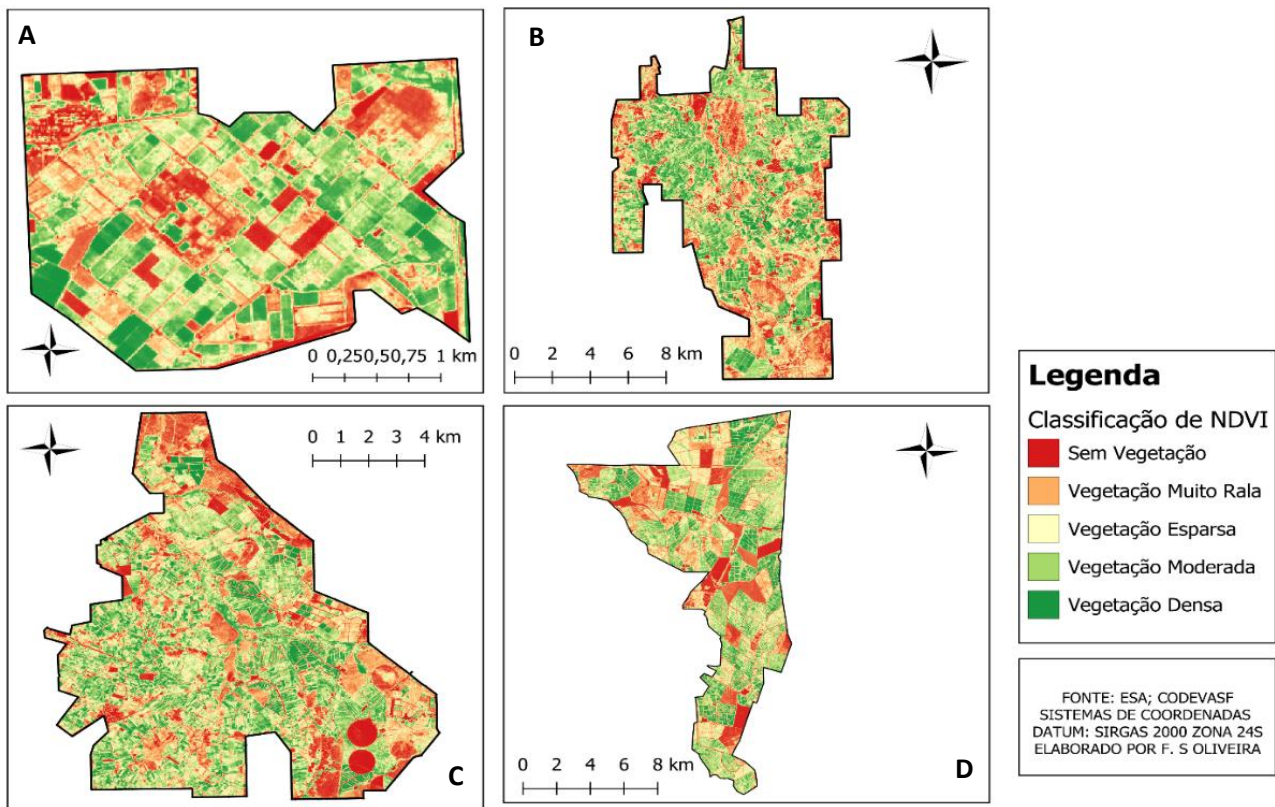


Figura 6. Distribuição espacial da cobertura vegetal utilizando o índice NDVI em áreas de estudo (A) Projeto Mandacaru; (B) projeto Curaçá; (C) Projeto Maniçoba; (D) Projeto Tourão. Fonte: Elaborado pelo próprio autor

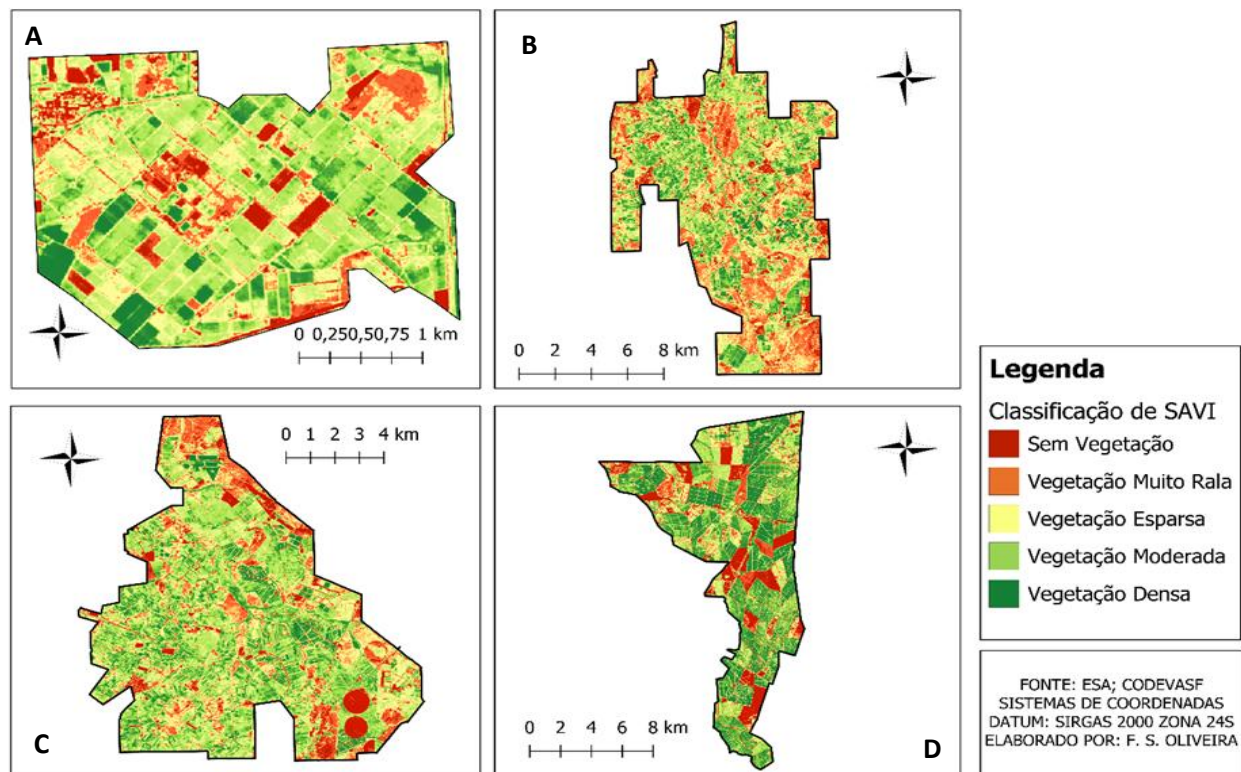


Figura 7. Distribuição espacial da cobertura vegetal utilizando o índice SAVI em áreas de estudo (A) Projeto Mandacaru; (B) projeto Curaçá; (C) Projeto Maniçoba; (D) Projeto Tourão. Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os valores mínimos registrados foram negativos com -0,160 para o NDVI e -0,200 para o SAVI, o que pode indicar áreas com solo exposto, corpos d'água ou interferência de sombras. Já os valores máximos de 0,704 para o NDVI e 0,880 para o SAVI apontam para zonas com vegetação mais densa ou bem desenvolvida, indicado na tabela 2

O coeficiente de variação (CV), que ficou praticamente idêntico para ambos os índices (44,32% para o NDVI e 44,33% para o SAVI), reforça que há uma variabilidade considerável na cobertura vegetal dentro do projeto, o que pode estar relacionado à diversidade de usos do solo, cultivos irrigados em diferentes estágios e presença de áreas menos vegetadas, segundo os dados resultantes da Tabela 2, o projeto Maniçoba, os índices de vegetação demonstram valores médios levemente superiores aos observados no Projeto Curaçá, com o NDVI alcançando 0,341 e o SAVI registrando 0,427. Esses valores indicam uma cobertura vegetal relativamente mais vigorosa, o que pode estar associado a uma maior homogeneidade nas práticas de uso do solo ou à presença de áreas com cultivo mais denso. O desvio padrão foi de 0,137 para o NDVI e 0,171 para o SAVI, apontando para uma variação moderada dos dados em ambas as métricas. Os valores mínimos foram negativos (-0,225 para NDVI e -0,281 para SAVI), indicando baixa ou nenhuma atividade fotossintética, como solo exposto ou água.

Tabela 2 apresenta os valores máximos atingiram 0,708 no NDVI e 0,885 no SAVI, indicando áreas com vegetação bastante desenvolvida, possivelmente associadas a cultivos perenes ou em estágio avançado de crescimento. O coeficiente de variação foi ligeiramente inferior ao de Curaçá, com 40,10% para o NDVI e 40,11% para o SAVI, revelando uma menor heterogeneidade espacial da vegetação no distrito.

Tabela 2. Estatísticas descritivas dos índices de vegetação no projeto Curaçá e Maniçoba

Projeto Curaçá			Projeto Maniçoba	
Parâmetros	NDVI	SAVI	NDVI	SAVI
Média	0,310	0,388	0,341	0,427
DP ¹	0,137	0,172	0,137	0,171
Mínimo	-0,160	-0,200	-0,225	-0,281
Máximo	0,704	0,880	0,708	0,885
CV ² (%)	44,32	44,33	40,10	40,11

(¹) DP: desvio padrão; (²) CV (%): coeficiente de variação.

Tabela 3 reúne os dados do projeto Mandacaru, os valores médios dos índices de vegetação indicam uma cobertura vegetal relativamente estável, com o NDVI apresentando média de 0,333 e o SAVI de 0,417. Esses números são compatíveis com uma área com predomínio de vegetação ativa, ainda que não totalmente densa, refletindo possivelmente um padrão agrícola consolidado. O desvio padrão foi de 0,129 para o NDVI e 0,162 para o SAVI, sugerindo uma variação um pouco menor em comparação

aos demais projetos analisados até o momento. Os valores mínimos, que ficaram próximos de zero (-0,041 para o NDVI e -0,052 para o SAVI), indicam poucas áreas com ausência de vegetação ou com presença de elementos como solo exposto, o que demonstra uma ocupação mais regularizada da área agrícola. Os valores máximos de 0,683 (NDVI) e 0,853 (SAVI) reforçam a presença de zonas com vegetação. O coeficiente de variação foi o mais baixo entre os projetos analisados até agora, com 38,87% para o NDVI e 38,85% para o SAVI, apontando para uma ligeira menor dispersão dos dados em comparação com os demais projetos.

À luz dos resultados da Tabela 3, para o Projeto Tourão, os valores médios dos índices de vegetação foram os mais elevados entre os quatro distritos analisados, com o NDVI registrando média de 0,381 e o SAVI alcançando 0,476. Esses resultados indicam uma cobertura vegetal mais expressiva, sugerindo maior vigor da vegetação e possivelmente maior eficiência no uso da irrigação ou predominância de cultivos com maior densidade foliar. No entanto, o desvio padrão também foi o mais alto dentre os projetos, com 0,174 para o NDVI e 0,218 para o SAVI, o que revela uma considerável variação espacial na distribuição da vegetação.

Os valores mínimos foram negativos (-0,106 para NDVI e -0,132 para SAVI), indicando áreas com pouca ou nenhuma vegetação, como superfícies de solo exposto, infraestrutura agrícola ou até pequenas lâminas d'água. Os máximos, por sua vez, chegaram a 0,667 no NDVI e 0,846 no SAVI, demonstrando a existência de parcelas com vegetação densa. O coeficiente de variação foi de 45,83% para o NDVI e 45,84% para o SAVI, o mais elevado entre os distritos, indicando uma acentuada heterogeneidade nas condições de cobertura vegetal, o que pode estar relacionado a práticas agrícolas distintas, variações na eficiência da irrigação ou a presença de áreas em diferentes estágios de cultivo, em consonância com a Tabela 3.

Tabela 3. Estatísticas descritivas dos índices de vegetação no projeto Mandacaru e Tourão.

Projeto Mandacaru			Projeto Tourão	
Parâmetros	NDVI	SAVI	NDVI	SAVI
Média	0,333	0,417	0,381	0,476
DP ¹	0,129	0,162	0,174	0,218
Mínimo	-0,041	-0,052	-0,106	-0,132
Máximo	0,683	0,853	0,667	0,846
CV ² (%)	38,87	38,85	45,83	45,84

(¹) DP: desvio padrão; (²) CV (%): coeficiente de variação.

Os histogramas dos índices NDVI e SAVI para os quatro projetos de irrigação analisados, representam a distribuição da frequência dos valores de pixel extraídos das imagens do satélite previamente processadas. distribuídos nas figuras 8 e 9

Projeto Curaçá, os histogramas referentes ao NDVI e SAVI evidencia uma distribuição assimétrica com maior concentração de frequências entre 0,2 e 0,4, refletindo uma vegetação moderadamente densa e vigorosa, em ambas as análises, observou-se a presença de uma cauda negativa pouco acentuada conforme ilustrado na Figura 8(a) e 9(a), indicando a presença de áreas com solo exposto, cobertura rasteira ou interferências, como corpos d'água e sombras que correspondem também aos valores mínimos negativos das estatísticas analisadas.

O SAVI, ao considerar o efeito do solo, verifica uma leve ampliação nos extremos superiores em relação ao NDVI figura 8(a), evidenciando maior sensibilidade em captar a densidade de cobertura em locais onde o índice tradicional tenderia a ser menor, sobre a interferência do solo descoberto.

No Projeto Maniçoba, tanto os histogramas de NDVI quanto os de SAVI figuras 8(b) e 9(b) costumam mostrar larga e dispersa distribuição, apresentando valores variando de faixas negativas até máximos superiores a 0,6, evidenciando uma situação de trabalho com um cenário altamente variável em relação à cobertura do solo.

O NDVI apresenta uma curva mais espalhada, apresentando uma frequência significativa nos intervalos entre 0,1 e 0,5, enquanto o SAVI, após correção do efeito do solo, apresenta ainda mais essa dispersão, atingindo valores acima de 0,8 figura 8(b) evidenciando assim maior sensibilidade para detectar áreas de vegetação densa ou em crescimento ativo.

A presença destacada de valores negativos em ambos os índices reforça a existência de zonas com solo nu, vegetação rarefeita ou condições de estresse hídrico, o que é compatível com o padrão agrícola diversificado e com possíveis diferenças nos estágios de desenvolvimento das culturas. Esta distribuição mostra um mosaico heterogêneo no uso do solo irrigado, com áreas consolidadas coexistindo com campos em transição ou em condições abaixo do ótimo.

O projeto Mandacaru, onde os histogramas de NDVI e SAVI apresentam distribuição mais concentrada e simétrica em relação aos demais distritos, com a maioria dos valores situados entre 0,3 a 0,5 refletem vegetação consolidada e cobertura moderadamente densa figura 8(c) e 9(c) A inexistência de valores extremos negativos e a suavidade das curvas demonstram uma baixa ocorrência de áreas com solo exposto ou vegetação degradada, corroborando com os menores coeficientes de variação obtidos na análise estatística.

O SAVI, ao compensar o brilho do solo, apresenta uma forma de distribuição bem próxima da do NDVI, mas com leve deslocamento para valores superiores, sugerindo uma vegetação homogênea mesmo em áreas com influência edáfica mais significativa.

O projeto Tourão, onde os histogramas de NDVI e SAVI demonstram a maior amplitude de distribuição entre todos os distritos analisados, com curvas assimétricas e alongadas que vão de valores negativos até máximos superiores a 0,6 no NDVI e 0,8 no SAVI, figuras 8(d) e 9(d) indicam uma cobertura vegetal bastante ampla em termos de densidade e vigor.

A concentração mais expressiva de valores ocorre entre 0,4 e 0,6, especialmente no SAVI, refletindo a presença de parcelas com vegetação bem desenvolvida, provavelmente associadas a cultivos perenes ou de alta produtividade. Ao mesmo tempo, a cauda pronunciada em direção aos valores negativos evidencia a coexistência de áreas com pouca ou nenhuma vegetação, sugerindo descontinuidade no uso do solo ou falhas localizadas no sistema de irrigação.

O SAVI, por sua vez, mostra-se mais sensível às variações do solo descoberto, destacando ainda mais a amplitude do gradiente espectral observado figura 9(d).

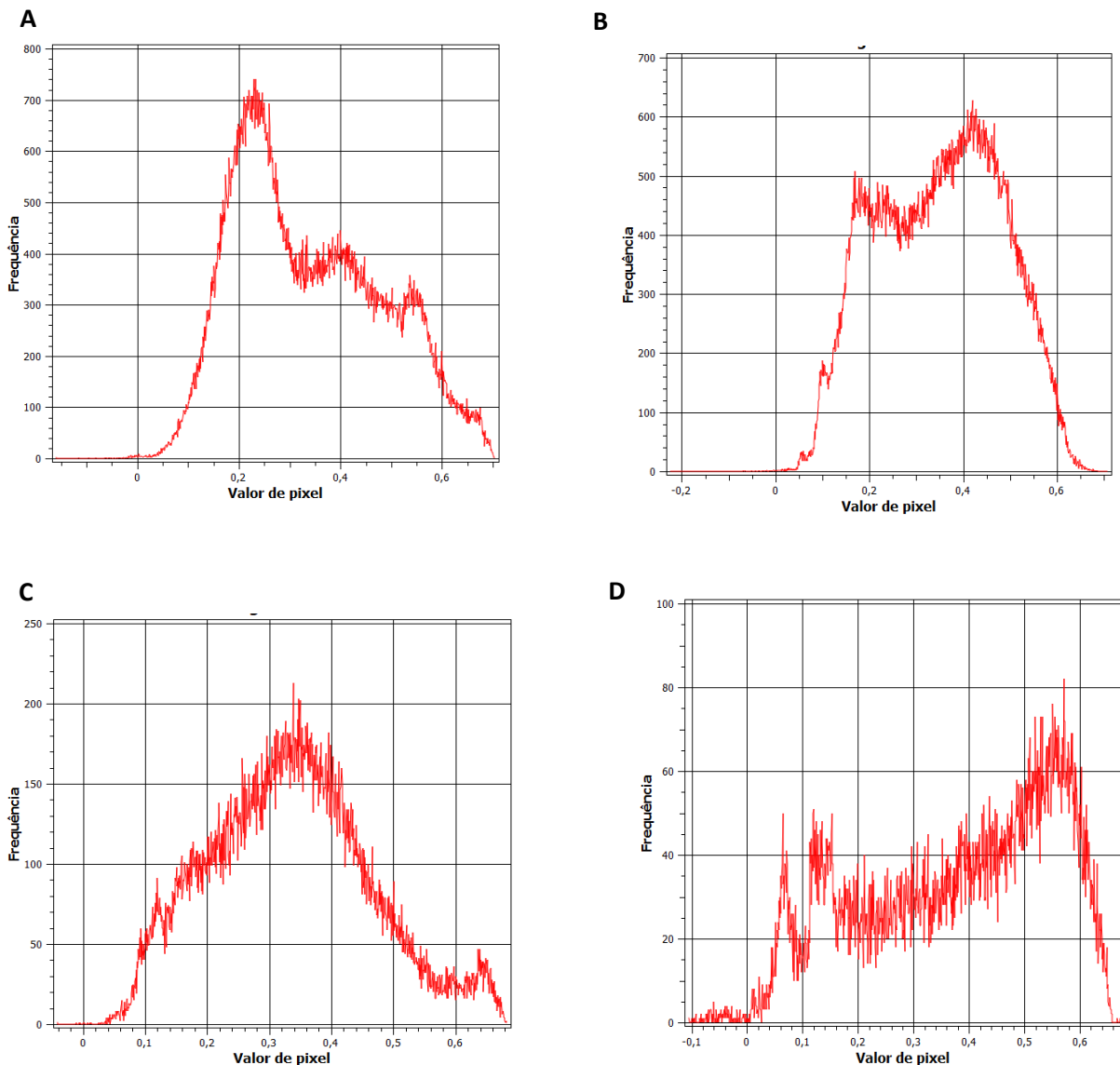


Figura 8. Histograma para valores de NDVI. (A) Projeto Curaçá; (B) projeto Maniçoba; (C) Projeto Mandacaru; (D) Projeto Tourão Fonte: elaborado pelo próprio autor.

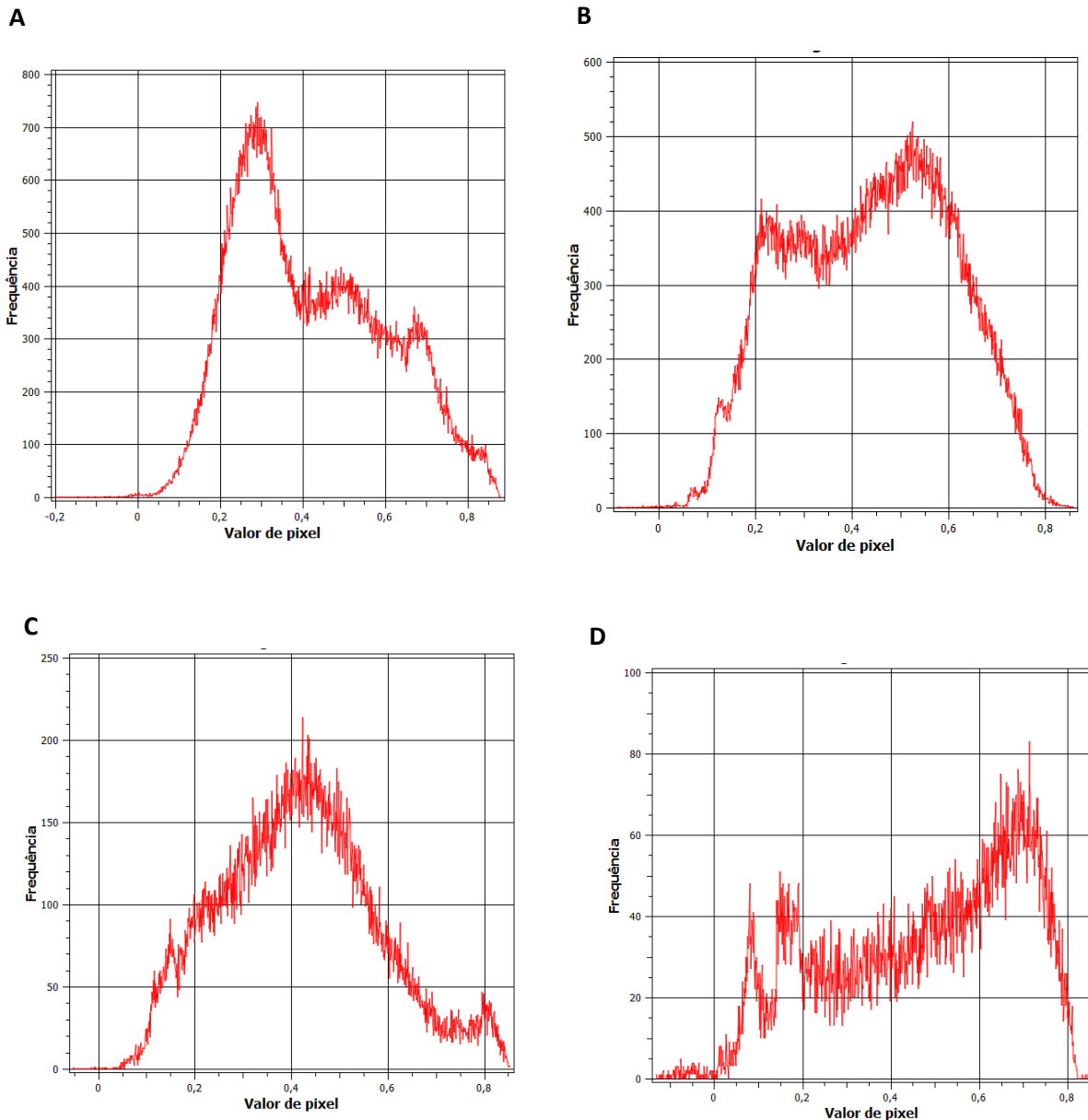


Figura 9. Histograma para valores de SAVI. (A) Projeto Curaçá; (B) projeto Maniçoba; (C) Projeto Mandacaru; (D) Projeto Tourão. Fonte: elaborado pelo próprio autor

O estudo dos índices de vegetação NDVI e SAVI caracterizou um aumento da variabilidade espacial da cobertura da vegetação nos quatro projetos analisados. Em cada um dos projetos, o SAVI revelou valores médios superiores aos do NDVI, que são coerentes com os resultados dos estudos de (Freitas et al. 2016; Freitas et al. 2017; Alves et al. 2017; Francisco & Gruber 2018), que estudaram mudanças em diferentes amostras de superfícies e cobertura vegetal. Estes estudos observaram diferenças nos valores e NDVI e SAVI, este último influenciado pelo fator solo (L). Com base nisso, foram sugeridas as aplicações do SAVI em áreas com maior incidência de solo exposto.

O projeto Tourão apresentou os maiores valores médios dos índices, com NDVI de 0,381 e SAVI de 0,476, indicando uma vegetação mais robusta em relação aos demais. Tal resultado pode estar

associado à predominância do cultivo de cana de açúcar, cultura que em geral apresenta alta densidade foliar e coberta do solo e, ainda, maior uso de práticas de irrigação intensivas.

Plantas saudáveis em geral devem produzir valores altos de NDVI, pois elas refletem bastante luz no intervalo infravermelho próximo e pouco na faixa do vermelho. Geralmente, as plantas do tipo C4 apresentam maior capacidade fotossintética do que as C3 devido à presença de cloroplastos na bainha do feixe vascular, resultando em valores mais altos de NDVI para as plantas do tipo C4 nas mesmas condições ambientais restantes a diferenças sazonais (Khaliduzzaman Yamamoto & Nishimura, 2022). Por outro lado, o projeto Mandacaru foi o que apresentou os menores coeficientes de variação (NDVI:38,87% e SAVI:38,85%), denotando uma ligeira homogeneidade na distribuição da vegetação, comparada aos demais distritos. Essa uniformidade pode estar associada à uniformidade de estágios de plantio.

As áreas com valores negativos em ambos os índices foram coerentes com locais sem cobertura vegetal, como corpos d'água, infraestrutura agrícola ou regiões com solo exposto. Essa identificação correta está em conformidade com o comportamento espectral teórico do NDVI e do SAVI, em que valores abaixo de zero indicam ausência de biomassa verde, resultando de alvos com alta absorção na faixa do infravermelho próximo.

De acordo com os estudos de Gameiro et al. (2017), foi observado um NDVI elevado em áreas com vegetação de maior biomassa e boa disponibilidade de água no solo, enquanto em vegetações menos densas e com solo exposto, o NDVI apresentou valores mais baixos. Da mesma forma Wang & Fu (2023) identificaram uma forte correlação positiva entre NDVI e umidade do solo ($r = 0,81$), indicando que áreas com maior disponibilidade hídrica apresentam valores de NDVI mais elevados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos índices NDVI e SAVI em áreas irrigadas de Juazeiro-BA demonstrou a eficiência do sensoriamento remoto no monitoramento da cobertura vegetal. O SAVI apresentou maior sensibilidade em regiões com solo exposto, enquanto o NDVI foi eficaz em áreas com vegetação densa.

Apesar de não ser uma diferença significativa, o projeto Tourão destacou-se pelos maiores valores médios dos índices, indicando maior vigor vegetativo, enquanto o projeto Mandacaru apresentou uma leve uniformidade, na cobertura em comparação com os demais projetos, que no geral foram desuniformes. Os resultados reforçam a importância dos índices espectrais na agricultura, permitindo melhor gestão das áreas cultivadas. Portanto, o uso de imagens de satélite e geoprocessamento mostrou-se eficaz para o planejamento agrícola.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, L. E. R., Gomes, H. B., dos Santos, M. N., & de Freitas, I. G. F. (2017). Balanço de radiação através do satélite Landsat-8 na bacia do Rio Pajeú. *Revista do Departamento de Geografia*, 33, 117-127.
- Almeida, A. H. B. D., et al. (2021). Perspectivas da gestão hídrica no semiárido brasileiro para a irrigação. *Disciplinarum Scientia: Naturais e Tecnológicas*, 22(2), 119–132.
- Carrer, M. J., Filho, H. M. S., Vinholis, M. M. B., & Monzambani, C. I. (2022). Precision agriculture adoption and technical efficiency: An analysis of sugarcane farms in Brazil. *Technological Forecasting and Social Change*. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121510>
- (GEOCODEVASF) Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. (n.d.). Geoportal CODEVASF. Recuperado em 12 de dezembro de 2025, de <https://geoportal.codevasf.gov.br/portal/home/gallery.html>
- CODEVASF. (2024a, outubro 16). Projeto Público de Irrigação Curaçá. Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. <https://www.codevasf.gov.br/assuntos/agricultura-irrigada/projetos-de-irrigacao/em-producao/curaca>
- CODEVASF. (2024b, outubro 16). Projeto Público de Irrigação Manicoba. Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. <https://www.codevasf.gov.br/assuntos/agricultura-irrigada/projetos-de-irrigacao/em-producao/manicoba>
- CODEVASF. (2024c, outubro 16). Projeto Público de Irrigação Mandacaru. Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. <https://www.codevasf.gov.br/assuntos/agricultura-irrigada/projetos-de-irrigacao/em-producao/mandacaru>
- CODEVASF. (2024d, outubro 16). Projeto Público de Irrigação Tourão. Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. <https://www.codevasf.gov.br/assuntos/agricultura-irrigada/projetos-de-irrigacao/em-producao/tourao>
- Francisco, C., & Gruber, N. (2018). Índices de vegetação obtidos de imagens multiespectrais aplicados na discriminação da cobertura vegetal em relevo montanhoso. *Geo UERJ*, (32), 16931.
- Cruden, B. A., Prabhu, D., & Martinez, R. (2012). Absolute radiation measurement in Venus and Mars entry conditions. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 49(6), 1069-1079.
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote sensing of Environment*, 120, 25-36.

- Freitas, I. G. F., Gomes, H. B., Moura, M. A. L., Alves, L. E. R., Silva Junior, J. R., & Santos, M. N. (2016). Estudo dos índices de vegetação e temperatura em anos de El Niño para o município de Cabrobró-PE com uso de imagens de satélite. In L. B. Cavalcante (Org.), 4º Geoalagoas (Vol. 1, pp. 328–339). Maceió: Secretaria de Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio.
- Freitas, I. G. F., Alves, L. E. R., Gomes, H. B., Silva Junior, J. R., Santiago, D. B., & Silva, R. A. (2017). Analysis of behavior of vegetation in the year of 2016 for the municipality of Remanso-BA. *Revista Geama*, 10, 41–48.
- Gameiro, S. Teixeira, C. P. B. Silva Neto, T. A. Lopes, M. F. L. Duarte, C. R. Lopes, M. V. S. Zimback, C. R. L. (2017). Avaliação da cobertura vegetal por meio de índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF) na Sub-Bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe, CE. *Terra*, 13(1–2), 15–22.
- Hatfield, J. L., Baker, J. M., & Viney, M. K. (2005). *Micrometeorology in agricultural systems* (pp. xix+-584).
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Honkavaara, E., Saari, H., Kaivosoja, J., Pölönen, I., Hakala, T., Litkey, P., ... & Pesonen, L. (2013). Processing and assessment of spectrometric, stereoscopic imagery collected using a lightweight UAV spectral camera for precision agriculture. *Remote Sensing*, 5(10), 5006-5039.
- Jensen, J. R. (2015). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (4th ed.). Pearson Education.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2024). Malhas territoriais. Recuperado em 12 de dezembro de 2025, de <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>
- Khaliduzzaman, A., Yamamoto, S., & Nishimura, Y. (2022). Perspectives and insight toward solving flaws of vegetation indices. *Biological Physics*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.00569>
- Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R. T., Anderson, M., Imhoff, M. L., Gutman, G. G., ... & Goldberg, A. (2010). Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. *Journal of climate*, 23(3), 618-633.
- Monzambani, C. I., Filho, H. M. S., Vinholis, M. M. B., & Carrer, M. J. (2021). Adoção da agricultura de precisão por produtores de cana-de-açúcar fornecedores para indústria no estado de São Paulo. *Embrapa*, 2(1), 1–28.
- Liu, C., SUN, P. S., & Liu, S. R. (2016). A review of plant spectral reflectance response to water physiological changes. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40(1), 80.
- Rouse, W., Haas, R. H., Welland, J. A., & Deering, D. W. (1973, dezembro 10–14). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Proceedings of the 3rd ERTS Symposium* (NASA SP-351, pp. 309–317). Washington, DC: NASA.

- Rahim, H. R. B. A., Lokman, M. Q. B., Harun, S. W., Hornyak, G. L., Sterckx, K., Mohammed, W. S., & Dutta, J. (2016). Applied light-side coupling with optimized spiral-patterned zinc oxide nanorod coatings for multiple optical channel alcohol vapor sensing. *J Nanophoton* 10 (3): 036009..
- Santos, A. S. D., et al. (2020). Importância do reuso de água para irrigação no Semiárido. *Meio Ambiente (Brasil)*, 2(3).
- Silva, M. C. D., & Mendonça, M. A. (2022). A fruticultura irrigada e a dinâmica territorial no Submédio do Vale do São Francisco. *Colóquio: Revista do Desenvolvimento Regional*, 18(1), 159–177. <https://doi.org/10.26767/coloquio.v20i3.2788>
- Spielmann Gaúna, A., & dos Santos Fachinelli Ferrarini, A. (2025). A AGRICULTURA IRRIGADA NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO: AUTOCORRELAÇÃO ESPACIAL E O AVANÇO DA IRRIGAÇÃO. *Informe GEPEC*, 29(1), 244–263. <https://doi.org/10.48075/igepec.v29i1.34073>
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of sensors*, 2017(1), 1353691.
- Wang, S., & Fu, G. (2023). Modelling soil moisture using climate data and normalized difference vegetation index based on nine algorithms in alpine grasslands. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1–18. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1130448>
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision agriculture*, 13(6), 693-712.

Outorgas de direito de uso de recursos hídricos para pecuária na Macrorregião Nordeste Mato-grossense

Recebido em: 15/11/2025

Aceito em: 01/12/2025

 10.46420/9786585756693cap3

Pedro Hurtado de Mendoza Borges 

Zaira Moraes dos Santos Hurtado de Mendoza 

Pedro Hurtado de Mendoza Moraes 

INTRODUÇÃO

A pecuária, entendida como a criação de animais domésticos para fins econômicos, constitui uma das principais atividades produtivas do Estado de Mato Grosso, destacando-se pela geração de carne e derivados voltados tanto ao mercado interno quanto à exportação (IBGE, 2025). Na macrorregião nordeste do estado, conforme a segmentação do Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária (IMEA), três cadeias produtivas assumem especial relevância: a bovinocultura (de corte e leite), a suinocultura e a avicultura (IMEA, 2017; 2022).

O funcionamento sustentável dessas atividades depende do uso regular e seguro da água — recurso essencial à dessedentação animal, à higienização e aos processos produtivos. No Brasil, o uso da água é regulamentado pela Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997), sendo a outorga de direito de uso o principal instrumento de controle e gestão (ANA, 2007; 20011; 2013). Em Mato Grosso, a Secretaria de Estado de Meio Ambiente é o órgão responsável pela emissão dessas autorizações (SEMA-MT, 2021; 2023). Ainda segundo a referida lei, as outorgas referentes a corpos hídricos de domínio da União competem diretamente à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2007; 2011; 2013).

De acordo com estudo realizado pelo IMEA (2022), com base no Censo Agropecuário de 2017, os pecuaristas da macrorregião nordeste destacam-se como os mais propensos à adoção de novas tecnologias. A pesquisa identificou que 27% dos produtores da região enquadram-se no perfil de “*early adopters*”, ou seja, os primeiros a incorporar inovações em seus sistemas produtivos, proporção superior à observada na região Centro-Sul (24%). Esse perfil inovador reforça o potencial da região para avanços em eficiência produtiva e sustentabilidade, o que torna ainda mais relevante compreender por que a adesão aos instrumentos de gestão hídrica, como a outorga de uso da água, permanece limitada.

Apesar da importância econômica e social da pecuária, levantamentos preliminares indicam que o número de processos de outorga destinados a essas atividades na macrorregião nordeste é relativamente baixo em comparação ao tamanho dos plantéis (SEMA-MT, 2025b). Essa lacuna pode refletir a informalidade no uso da água, a baixa conscientização dos produtores ou entraves institucionais no

processo de regularização. Também devem ser consideradas outras possíveis causas, como a solicitação de outorgas diretamente junto à ANA, nos casos de corpos hídricos de domínio da União, como o Rio Araguaia, além da dispensa de outorga para usos caracterizados como de consumo insignificante, especialmente os destinados à dessedentação animal em pequena escala.

Em Mato Grosso, a SEMA-MT utiliza como referência para a análise de disponibilidade hídrica a vazão Q_{95} , correspondente à vazão com 95% de permanência no tempo. Esse parâmetro, de caráter conservador, visa garantir a manutenção da oferta de água durante os períodos de estiagem, definindo limites de até 20% da Q_{95} para outorgas individuais e até 70% para coletivas, estas condicionadas à gestão compartilhada e à devida autorização (SEMA-MT, 2021, 2023; Ferreira, 2024). A consideração desse critério é especialmente relevante na macrorregião nordeste do estado, onde, embora predominem rios perenes e boa disponibilidade hídrica bruta, observa-se forte sazonalidade das chuvas e ocorrência crescente de veranicos nos últimos anos (Silva Júnior et al., 2018; ANA, 2021).

Com base na bibliografia consultada, destaca-se a importância de avaliar os processos de outorga e quantificar as vazões concedidas em cada município da macrorregião nordeste mato-grossense. Essa problemática motivou a realização do presente estudo, que teve como objetivo analisar o cenário das outorgas de uso da água para bovinocultura, suinocultura e avicultura na região. Nesse sentido, buscou-se identificar e quantificar os processos de outorga ativos para essas atividades, mapear sua distribuição espacial e discutir as implicações para a gestão hídrica e a sustentabilidade da produção animal.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido na Macrorregião Nordeste do estado de Mato Grosso, conforme a segmentação territorial adotada pelo Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária (IMEA, 2017), utilizada em políticas públicas de planejamento agropecuário. Essa macrorregião é composta por 22 municípios, representados na Figura 1. O clima predominante é o tropical quente e subúmido, com inverno seco, classificado como Aw segundo o sistema de Köppen-Geiger (Peel et al., 2007; Alvares et al., 2013). As temperaturas médias anuais variam entre 24 °C e 26 °C, e a pluviosidade média anual situa-se entre 1750 mm e 2250 mm (INMET, 2025).

Foram utilizados arquivos vetoriais (“*shapefiles*”) contendo os limites estaduais e municipais, além da hidrografia com os principais cursos d’água de Mato Grosso, disponíveis nas bases cartográficas contínuas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025), acessadas por meio do Portal de Geociências. Também foram analisados os dados geoespaciais referentes aos processos de outorga de direito de uso de recursos hídricos para criação animal, obtidos no GeoPortal da Secretaria de Estado de Meio Ambiente (SEMA-MT, 2025a). Como fonte complementar de informação, utilizou-se o aplicativo SIMLAM, desenvolvido pela mesma instituição e dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), Portal HidroWeb (ANA, 2025; SEMA-MT, 2025b).

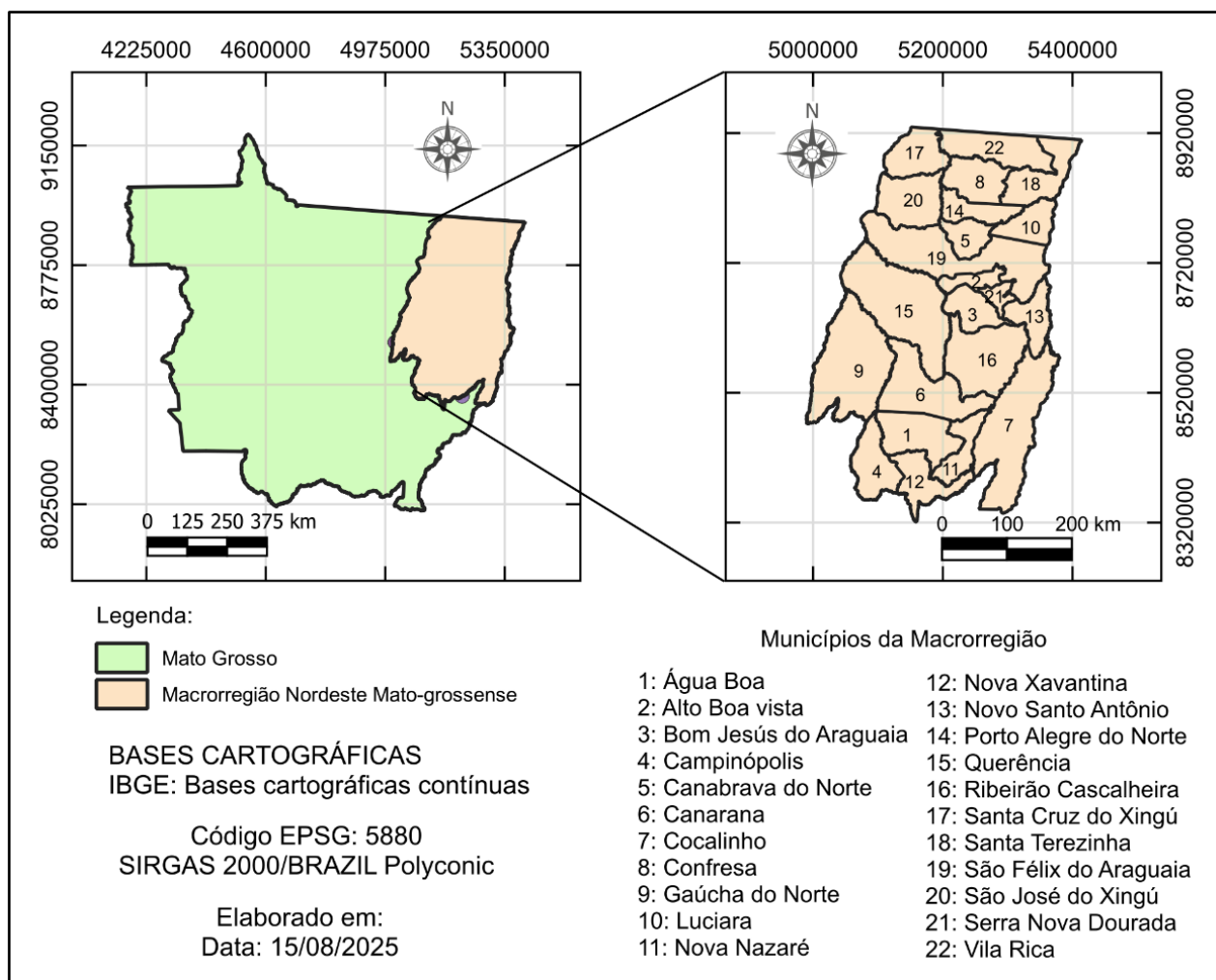


Figura 1. Localização da Macrorregião Nordeste de Mato Grosso e seus municípios. Fonte: Os autores.

A partir dos arquivos vetoriais e dos dados geoespaciais, elaboraram-se os mapas temáticos no programa QGIS, versão 3.40.7 (QGIS, 2025). Utilizando-se os recursos de geoprocessamento do software, foram geradas as camadas vetoriais que permitiram a localização dos processos de outorga, a identificação dos corpos hídricos utilizados como fonte de captação superficial e a elaboração do mapa correspondente para a macrorregião. As ferramentas do QGIS possibilitaram estimar informações relacionadas à pecuária em cada município, como o número de processos deferidos e as respectivas vazões outorgadas.

Os corpos hídricos associados aos processos de outorga foram identificados com base nos dados geoespaciais da SEMA-MT, tratados no ambiente QGIS. A vazão de referência, definida como aquela igualada ou superada em 95% do tempo (Q_{95}), foi obtida para cada ponto de captação por meio do aplicativo SIMLAM. Com esse mesmo aplicativo, determinaram-se as vazões de captação superficial disponíveis para uso individual (20% da Q_{95}) e para uso consuntivo total (70% da Q_{95}). Para avaliar a representatividade das vazões outorgadas em relação às disponíveis, calcularam-se as respectivas porcentagens para cada município.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O número de outorgas em cada município da macrorregião nordeste de Mato Grosso, destinadas à pecuária, bem como as principais vazões associadas, sendo de referência (Q_{95}), disponível nas proximidades do ponto de captação e concedida em cada processo, estão apresentados na Tabela 1. Observa-se que os processos de outorga de direito de uso de recursos hídricos, concedidos pela SEMA-MT para a criação animal nesse território, concentram-se em seis municípios, distribuídos principalmente nas porções norte e sul da macrorregião (Figura 2).

Tabela 1. Número de outorgas para pecuária e vazões associadas (referência ou Q_{95} , disponível e outorgada) nos municípios da Macrorregião Nordeste de Mato Grosso.

Município	Número de outorgas (-)	Vazões ($m^3 \cdot s^{-1}$)		
		Referência	Disponível	Outorgada
Campinápolis	1	0,342920	0,023324	0,000680
Canarana	1	0,062496	0,038247	0,005500
Cocalinho	1	0,110400	0,073980	0,003300
Porto Alegre do Norte	2	0,009900	0,004430	0,002500
		0,167031	0,112221	0,004700
Santa Cruz do Xingu	1	0,108518	0,058262	0,017700
Vila Rica	1	0,005451	0,003501	0,000314
Macrorregião	7	0,806716	0,313965	0,034694

Fonte: Os autores a partir do GeoPortal da SEMA-MT e do aplicativo SIMLAM.

A Tabela 2 resume as porcentagens das vazões solicitadas e dos usos consuntivos totais em relação à vazão de referência (Q_{95}), além dos cursos d'água próximos aos pontos de captação para pecuária. Verifica-se que, na maioria dos municípios, a porcentagem de captação foi muito inferior ao limite individual outorgável de 20%, estabelecido pela Resolução nº 27 do Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Mato Grosso (CEHIDRO-MT, 2009). A exceção foi Santa Cruz do Xingu, que apresentou a maior porcentagem solicitada, com ponto de captação localizado no Córrego do Pedro, afluente do Rio Comandante Fontoura. Apesar disso, a porcentagem total de usos consuntivos manteve-se inferior ao limite de 70%, também definido pela referida resolução (Tabela 2).

A Figura 3 apresenta a área da Macrorregião Nordeste de Mato Grosso inserida nas bacias hidrográficas Ottocodificadas Amazônica e Tocantins-Araguaia, com a representação dos principais rios, afluentes e pontos de captação dos processos de outorga para pecuária. Nota-se que a maior concentração de outorgas ocorre na bacia Tocantins-Araguaia, restando apenas dois municípios localizados na bacia Amazônica, Canarana e Santa Cruz do Xingu, os quais, coincidentemente, foram os que apresentaram as maiores vazões outorgadas e as mais elevadas porcentagens de uso individual e total.

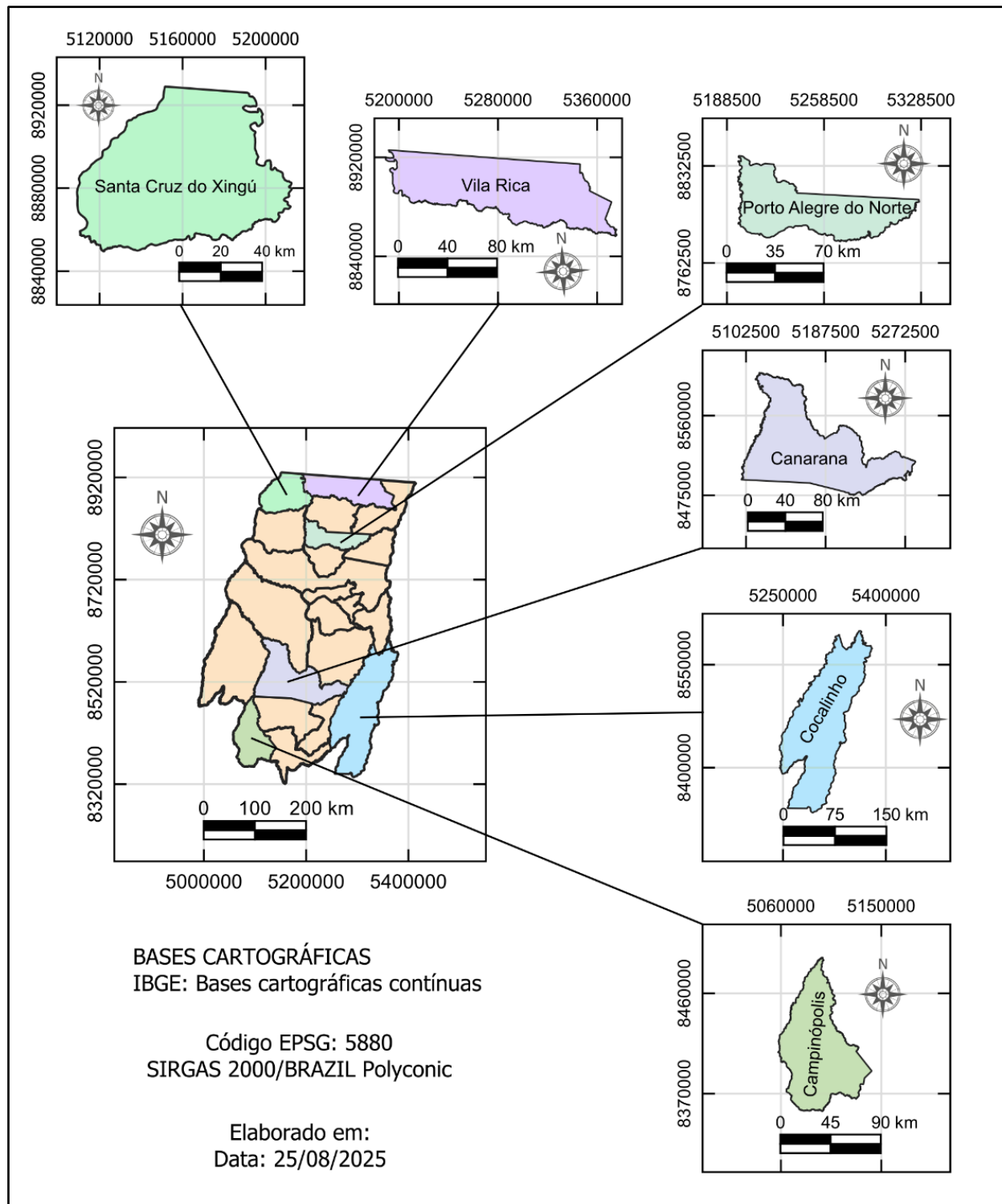


Figura 2. Municípios da Macrorregião Nordeste Mato-grossense com outorgas para pecuária. Fonte: Os autores.

O número reduzido de outorgas voltadas à dessedentação animal, em comparação aos resultados obtidos por Borges et al. (2025) para a irrigação, reflete particularidades da gestão hídrica na macrorregião. A dessedentação direta em corpos hídricos, prática comum na pecuária extensiva, é considerada uso insignificante e, portanto, dispensada de outorga pela SEMA-MT, o que reduz substancialmente o

número de registros formais. Ademais, parte dos cursos d'água da região, como o rio Araguaia, é de domínio da União, cuja gestão compete à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Essa sobreposição de competências, somada à dispensa legal de usos de baixo impacto, evidencia a necessidade de aprimoramento dos instrumentos de gestão para integrar as diferentes esferas administrativas e representar, de forma mais completa, os usos efetivos da água no território.

Tabela 2. Porcentagem da vazão solicitada e total de usos consuntivos, em relação à vazão de referência (Q_{95}) e cursos d'água próximos aos pontos de captação em cada município.

Município	Porcentagem da Q_{95} (%)		Cursos d'água	
	Solicitada	Total	Afluente	Rio principal
Campinápolis	1,9829	3,9659	Ribeirão Jatobá	Das Mortes
Canarana	8,8005	17,6009	Córrego Água Parada	Sete de Setembro
Cocalinho	2,9891	5,9782	Corixo da Briosa	Araguaia
Porto Alegre do Norte	1,3494	5,2356	Córrego Dezenove	Tapirapé
	2,8138	5,6277		
Santa Cruz do Xingu	16,3107	32,6213	Córrego do Pedro	Comandante Fontoura
Vila Rica	5,7600	11,5201	Córrego dos Porcos	Beleza

Fonte: Os autores a partir do GeoPortal da SEMA-MT e do aplicativo SIMLAM.

Essa condição, contudo, pode comprometer a confiabilidade das informações sobre o uso da água na macrorregião, uma vez que parte significativa das captações destinadas à pecuária não é formalmente registrada. A subnotificação desses usos limita a precisão dos diagnósticos sobre a demanda hídrica e pode afetar o equilíbrio entre disponibilidade e concessões futuras. Embora a dessedentação animal represente, individualmente, um uso de pequena magnitude, sua somatória pode ser expressiva em escala regional. Assim, o aprimoramento dos mecanismos de controle e a integração entre as esferas estadual e federal constituem etapas essenciais para fortalecer a gestão hídrica e subsidiar políticas públicas mais representativas da realidade local.

Apesar de a Macrorregião Nordeste de Mato Grosso destacar-se pelo rebanho bovino em expansão, considera-se que a pecuária, nesse contexto, não compromete a disponibilidade hídrica regional. Estudos conduzidos em outras regiões do estado apontam adequada proporção entre a vazão outorgada para captação superficial e a disponibilidade hídrica (Borges et al., 2023; 2024). Ademais, a macrorregião apresenta uma ampla rede hidrográfica, composta por caudalosos afluentes dos rios Araguaia e das Mortes. Contudo, não foram encontrados estudos que abordem, de forma específica, a distribuição das outorgas hídricas nessa porção do estado, o que reforça a originalidade e relevância deste trabalho. Os resultados apresentados podem servir de referência para investigações futuras em outras

regiões, permitindo comparações entre diferentes realidades regionais de uso e gestão dos recursos hídricos.

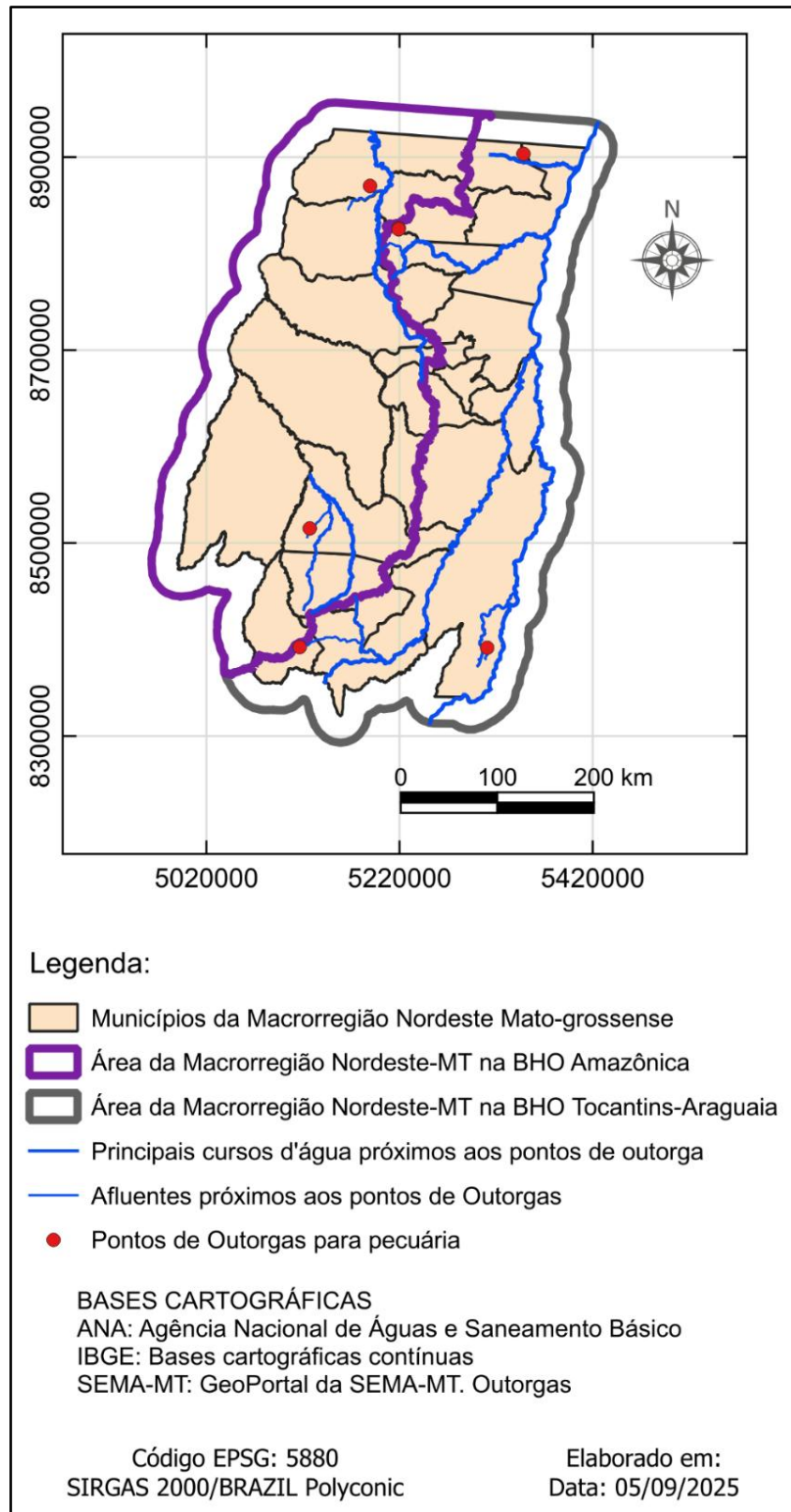


Figura 3. Área da Macrorregião Nordeste Mato-grossense nas bacias hidrográficas Ottocodificadas (BHO) Amazônica e Tocantins-Araguaia, cursos d'água e localização dos pontos de captação. Fonte: Os autores.

CONCLUSÕES

Os resultados evidenciam que o número de outorgas de direito de uso de recursos hídricos destinadas à dessedentação animal na macrorregião nordeste de Mato Grosso é significativamente inferior ao observado para a irrigação, reflexo de fatores legais, administrativos e práticos. A dispensa de outorga para usos considerados insignificantes, a predominância da dessedentação direta em corpos hídricos e a jurisdição federal sobre parte dos cursos d'água explicam, em grande medida, essa discrepância.

Apesar disso, conclui-se que a pecuária, nas condições atuais, não representa fator de comprometimento da disponibilidade hídrica regional, tendo em vista a ampla rede de drenagem e a baixa intensidade de captação formal identificada.

A ausência de estudos específicos sobre a distribuição espacial das outorgas nessa porção do estado reforça a originalidade e a relevância desta pesquisa para o aprimoramento da gestão dos recursos hídricos.

Por fim, destaca-se que os resultados obtidos podem subsidiar políticas públicas voltadas à regularização e ao monitoramento do uso da água na pecuária, além de orientar comparações com outras regiões de Mato Grosso, favorecendo uma visão integrada entre produção animal e sustentabilidade hídrica.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) por permitir a consulta de dados climáticos dos municípios da Macrorregião Nordeste de Mato Grosso, Brasil. Ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) pela permissão às bases cartográficas contínuas. De igual forma, os autores agradecem à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), portal HidroWEB, pela possibilidade de obter os arquivos vetoriais com os cursos de água de Mato Grosso. Também, os autores agradecem à Secretaria de Estado de Meio Ambiente de Mato Grosso (SEMA), GeoPortal, pela consulta aos processos de outorga para pecuária em propriedades localizadas na Macrorregião Nordeste de Mato Grosso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. L. M. & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Stuttgart, 22, 6, 711–728. DOI: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2007). Diagnóstico da outorga de direito de uso de recursos hídricos no Brasil. *Caderno de Recursos Hídricos*. Volume 4. Brasília. 168p.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2011). Outorga de direito de uso de recursos hídricos. *Cadernos de capacitação em recursos hídricos*, v6. Brasília. 54p.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2013). Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos da agência nacional de águas.

- Brasília. 252p. <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-ANA/2013/Resolucao-ANA-1041-anexo.pdf>
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2021). Atlas Irrigação – Uso de água na agricultura. 2 ed. <https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/storymaps/stories/a874e62f27544c6a986da1702a911c6b>
- ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2025). Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Portal HidroWeb. [https://www.snirh.gov.br/hidroweb/series históricas](https://www.snirh.gov.br/hidroweb/series_historicas)
- Borges, P. H. de M.; Morais, P. H. de M. & Mendoza, Z. M. dos S. H. (2023). Demanda e disponibilidade hídrica para sistemas de pivô central na microrregião de Primavera do Leste - MT. *Brazilian Journal of Development*, 9, 1, 210–231. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv9n1-015>
- Borges, P. H. de M.; Duarte, D. M. de P.; Morais, P. H. de M.; Mendoza, Z. M. dos S. H. & Dutra, M. L. (2024). Grants for surface catchment in the microregion of alto Paraguai, Mato Grosso. *REVISTA FOCO*, 17, 2, e4375. DOI: <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v17n2-031>
- Borges, P. H. de M.; Mendoza, Z. M. dos S. H. & Morais, P. H. de M. (2025). Outorgas de direito de uso de recursos hídricos para irrigação na Macrorregião Nordeste Mato-grossense. *Brazilian Journal of Development*, 11, 8, 1–14. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv11n8-023>
- CEHIDRO - Conselho Estadual de Recursos Hídricos, MT. Resolução do Conselho Estadual de Recursos Hídricos nº 27 de 09 de julho de 2009. Outorgas de direitos de uso de recursos hídricos no Estado do Mato Grosso e dá outras providências. Mato Grosso, 2009.
- Ferreira, F. S. (2024). Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos. Secretaria de Estado de Meio Ambiente, MT (SEMA-MT).
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2024). Produção da Pecuária Municipal. V52, 13p. Rio de Janeiro, RJ. <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=784>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2025). Bases Cartográficas Contínuas. Rio de Janeiro, RJ. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/bases-cartograficas-continuas.html>
- IMEA - Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária (2017). Mapa das macrorregiões do IMEA. Cuiabá-MT. <https://www.imea.com.br/imea-site/view/uploads/metodologia/justificativamapa.pdf>
- IMEA - Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária (2022). Perfil do pecuarista mato-grossense na era digital. Cuiabá-MT. <https://www.imea.com.br/imea-site/view/uploads/estudos-customizados/perfil-pecuarista.pdf>
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia (2025). BDMEP: Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Brasília. <https://bdmep.inmet.gov.br/>

- Peel, M. C.; Finlayson, B. L. & McMahon, T. A. (2007). Updated world of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, Göttingen, 11, 5, 1633-1644. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- QGIS DEVELOPMENT TEAM (2025). QGIS Geographic Information System. Open-Source Geospatial Foundation Project. Versão 3.40.7-Bratislava.
- SEMA-MT. Secretaria de Estado de Meio Ambiente, MT (2021). Instrução Normativa SEMA N° 09 de 14/12/2021, Art. 29.
- SEMA-MT. Secretaria de Estado de Meio Ambiente, MT (2023). Resolução CEHIDRO N° 161 de 11 de maio de 2023.
- SEMA-MT. Secretaria de Estado de Meio Ambiente, MT (2025a). GeoPortal. Cuiabá, MT. <https://geoportal.sema.mt.gov.br/>
- SEMA-MT. Secretaria de Estado de Meio Ambiente, MT (2025b). Outorga. Cuiabá, MT. <http://www.sema.mt.gov.br/site/index.php/outorga>
- Silva Júnior, J. F.; Hernandez, F. B. T.; Silva, I. P. F.; Reis, L. S.; Teixeira, H. C. (2018). Estabelecimento dos meses mais críticos para a agricultura irrigada a partir do estudo do balanço hídrico. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, 12, 2, 122-131.

Zoneamento de áreas para restauração ecológica visando metas climáticas

Recebido em: 21/11/2025

Aceito em: 01/12/2025

 10.46420/9786585756693cap4

Walysson Pereira Delfino 

Railma Aparecida Santos 

Vicente Toledo Machado de Moraes Junior 

Danielle Piuzana Mucida 

Luciano Cavalcante de Jesus França 

INTRODUÇÃO

A restauração da vegetação nativa é essencial para mitigar os efeitos das mudanças climáticas, melhorar a qualidade do solo e da água, aumentar a biodiversidade e contribuir para o sequestro de carbono. O Brasil assumiu, a partir da COP-21 (UNFCCC, 2015), e reafirmou nas conferências posteriores, o compromisso de restaurar 12 milhões de hectares até 2030 (MMAMC, 2017). O estado de Minas Gerais também estabeleceu a meta de recuperar 3,7 milhões de hectares de áreas rurais no mesmo período (Santos et al., 2024), consolidando-se como um dos protagonistas nacionais em políticas de recomposição florestal.

Apesar da relevância estratégica de Minas Gerais para o cumprimento das metas nacionais de restauração, os estudos disponíveis sobre priorização espacial em escala municipal ainda são insuficientes, especialmente na região do Triângulo Mineiro. A maioria das iniciativas de zoneamento concentra-se em bacias hidrográficas ou em unidades de conservação, como exemplo: estudos em áreas de Mata Atlântica ou no Quadrilátero Ferrífero (Aguiar et al., 2025; Niemeyer et al. 2020), deixando lacunas importantes em municípios com intensa atividade agrícola (Mucida et al., 2023) e elevado passivo ambiental. Essa carência metodológica dificulta a aplicação efetiva de recursos públicos e privados, comprometendo a eficiência das ações de recuperação (Chazdon et al., 2021; Petti; Otaviano, 2024)

O zoneamento para a restauração florestal consiste em um processo técnico-científico que delimita espacialmente áreas prioritárias com base em múltiplos critérios ambientais, fundiários e socioeconômicos, visando maximizar os benefícios ecológicos e a viabilidade da intervenção (Cartolano et al., 2022; Pedrollo et al., 2024). Exemplos consolidados incluem o Zoneamento Ecológico-Econômico da Amazônia Legal, que identifica zonas de conservação e recuperação em função da aptidão do território; o Placar da Restauração (WRI Brasil), que mapeia oportunidades em escala de paisagem; e iniciativas estaduais como o Plano de Recuperação da Vegetação Nativa de São Paulo (PRVC-SP), que utilizam análise multicritério para hierarquizar municípios e propriedades segundo potencial de conectividade (Garcia-Feced et al., 2011), risco hídrico e déficit de área protegida (Niemeyer et al., 2020).

Esses instrumentos demonstram que a priorização espacial permite direcionar recursos de forma estratégica, reduzir custos de restauração e potencializar ganhos em serviços ecossistêmicos (Comin et al., 2018).

Para que esse esforço seja efetivo, a identificação de áreas prioritárias é uma etapa fundamental, pois orienta ações de restauração e fundamenta o planejamento ambiental em diferentes escalas. No contexto do Cerrado mineiro, Monte Carmelo destaca-se como um território marcado pela pressão agropecuária e pela redução contínua de seus remanescentes naturais. Santos et al. (2024) constataram que 14.242 hectares se encontram em sobreposição nos cadastros do CAR, o equivalente a 10,76% da área municipal, evidenciando conflitos de uso e a urgência na definição de zonas prioritárias.

O objetivo deste estudo foi identificar áreas prioritárias para restauração florestal no município, utilizando como vetores ambientais de degradação: (i) uso e cobertura da terra, (ii) vulnerabilidade à erosão, (iii) tipos de solo, (iv) declividade e (v) conflitos de uso em Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Reservas Legais (RLs).

MATERIAL E MÉTODOS

Obtenção de Dados

O trabalho foi desenvolvido no município de Monte Carmelo, localizado na mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, em Minas Gerais. O município possui área total de aproximadamente 1.343,035 km², inserida majoritariamente no bioma Cerrado (conforme figura 1), composto por formações savânicas e florestais, e apresenta relevância ecológica e socioeconômica regional (Castro, 2023).

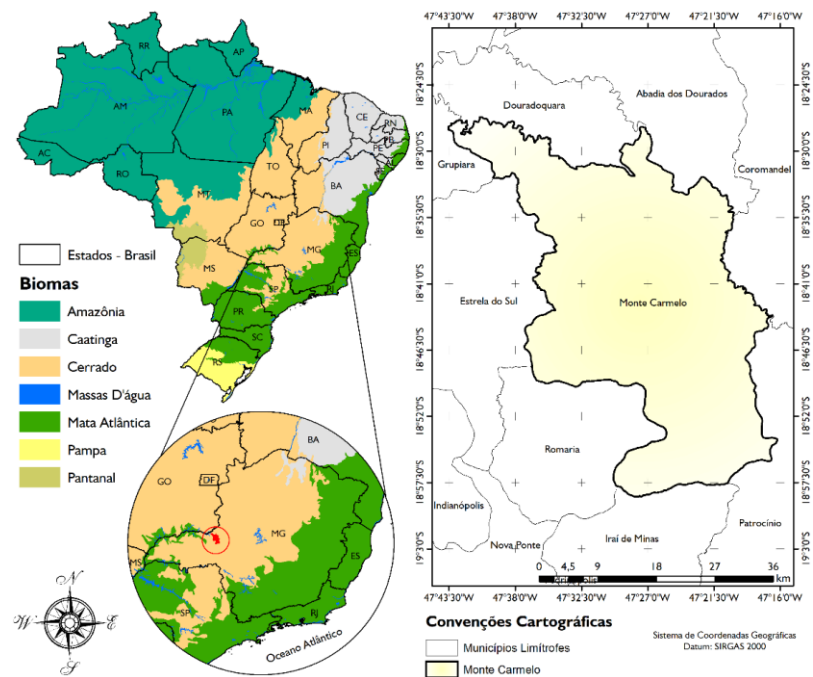


Figura 1. Localização geográfica do município de Monte Carmelo (MG) no contexto dos biomas brasileiros e dos municípios limítrofes. Fonte: os autores.

Os vetores utilizados foram obtidos em duas principais fontes: o MapBiomas e a plataforma IDE-Sisema, com apoio da interface do *Google Earth Engine* (GEE) para acesso e processamento preliminar dos dados *raster*. Em seguida, as análises espaciais e a aplicação do modelo multicritério foram realizadas no *ArGIS* 10.8 (Esri, 2020), que possibilitou a sobreposição, reclassificação das camadas, cálculo de áreas e produção cartográfica final. Todos os dados foram projetados no sistema SIRGAS 2000 / UTM zona 23S, garantindo compatibilidade e precisão espacial.

Processamento Geoespacial

Os intervalos de classificação da suscetibilidade à degradação foram definidos conforme as particularidades ambientais do município, respeitando a flexibilidade metodológica das bases utilizadas. Para a atribuição dos pesos, adotou-se uma escala de 1 a 5, apoiada em estudos que empregam metodologias similares de avaliação ambiental integrada (Almeida et al., 2020; Cartolano et al., 2022; França et al., 2019; Plano Diretor Florestal, 2012; Mello et al., 2016). Essa escala permitiu hierarquizar os subcritérios de acordo com sua influência sobre a degradação da vegetação nativa.

A Tabela 1 apresenta as classes de prioridade definidas, seus respectivos pesos e a descrição técnica, servindo como base para a justificativa dos pesos adotados na modelagem multicritério. Essas classes nortearam a classificação temática das camadas *raster* e a representação espacial das zonas de atenção prioritária.

Tabela 1. Classes de prioridade e seus respectivos pesos e descrições. Fonte: os autores.

Pesos	Classes	Descrição Técnica	Justificativa e Exemplos
1	Muito Baixa	Áreas com mínima prioridade de restauração; zonas menos preocupantes e pouco urgentes.	Baixa pressão antrópica; fragmentos conservados; pouca urgência de intervenção.
2	Baixa	Áreas de baixa prioridade que ainda requerem medidas de conservação para manter estabilidade ecodinâmica.	Pastagens pouco degradadas; solos moderadamente estáveis; risco baixo de erosão.
3	Média	Áreas com alerta para risco de degradação; zonas que já devem ser consideradas em projetos de restauração.	Pastagens degradadas, bordas de fragmentos, solos arenosos com maior suscetibilidade.
4	Alta	Áreas críticas com elevada suscetibilidade à degradação, demandando ações de contenção e recuperação.	Encostas íngremes, solos frágeis, risco acentuado de erosão e perda de função ecológica.
5	Extremamente Alta	Áreas muito sensíveis e prioritárias nas estratégias de restauração.	APPs, veredas, nascentes, margens de cursos d'água e RLs com uso conflitante.

Modelagem Multicritério

Para identificar áreas prioritárias para restauração florestal, adotou-se a metodologia de Análise de Decisão Multicritério (ADMC), fundamentada na integração de diferentes camadas temáticas de dados geográficos. Essa abordagem permite ponderar múltiplos critérios ambientais e gerar um modelo espacial representativo das zonas mais suscetíveis à degradação da vegetação nativa. Para isso, aplicou-se a ferramenta *Raster Calculator* no *ArGIS*, integrando todas as variáveis reclassificadas em uma superfície contínua de prioridade. Cada critério foi padronizado em escala comum (1 a 5), a síntese dessa lógica de pesos pode ser consultada na Tabela 1, permitindo a aplicação direta do modelo aditivo simples, representado na Equação 1:

$$PR_{rest} = \frac{[(U.C.T)+(V.E)+(T.S)+(D)+(APPs \text{ e } RLs)]}{5} \quad (\text{Eq.1})$$

Em que: PR_{rest} = Prioridade a Restauração; $U.C.T$ = Uso e Cobertura da Terra; $V.E$ = Vulnerabilidade a Erosão; $T.S$ = Tipos de Solo; D = Declividade; $APP \text{ e } RLs$ = conflitos em APPs e RLs.

Esse modelo aditivo simples soma todas as camadas padronizadas e, em seguida, normaliza o resultado pela média dos critérios. A integração é necessária para padronizar variáveis com escalas e unidades diferentes, garantindo comparabilidade entre elas (Cartolano et al., 2022). A reclassificação permite transformar dados heterogêneos em uma mesma escala ordinal, reduz incertezas e facilita a hierarquização da suscetibilidade (França et al., 2019). Esse procedimento também evita que um único critério influencie excessivamente o resultado e assegura uma contribuição equilibrada de todas as variáveis no modelo multicritério, conforme recomendado em aplicações similares de ADMC (Almeida et al., 2020; Pedrollo et al., 2025).

A divisão pelo número de critérios ($n = 5$) resultou em um índice médio ponderado, no qual todos os vetores contribuíram proporcionalmente para o produto final. O modelo gerado representa uma superfície contínua de suscetibilidade e prioridade, permitindo identificar as zonas mais críticas para ações de restauração florestal no município.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise espacial integrada modelou os atributos geofísicos do ambiente e o uso atual da terra, identificando zonas críticas e conflitos com a legislação ambiental brasileira (Figura 2). Essa abordagem é consistente com estudos realizados em outras áreas do Cerrado que também utilizam ADMC e geoprocessamento para definir áreas prioritárias, como os trabalhos de Almeida et al. (2020), Cartolano et al. (2022) e Aguiar et al. (2025). Esses autores mostram que a combinação de dados de solo, declividade,

uso da terra e informações ambientais públicas é eficaz para subsidiar o planejamento territorial, o que reforça a validade do método aplicado em Monte Carmelo.

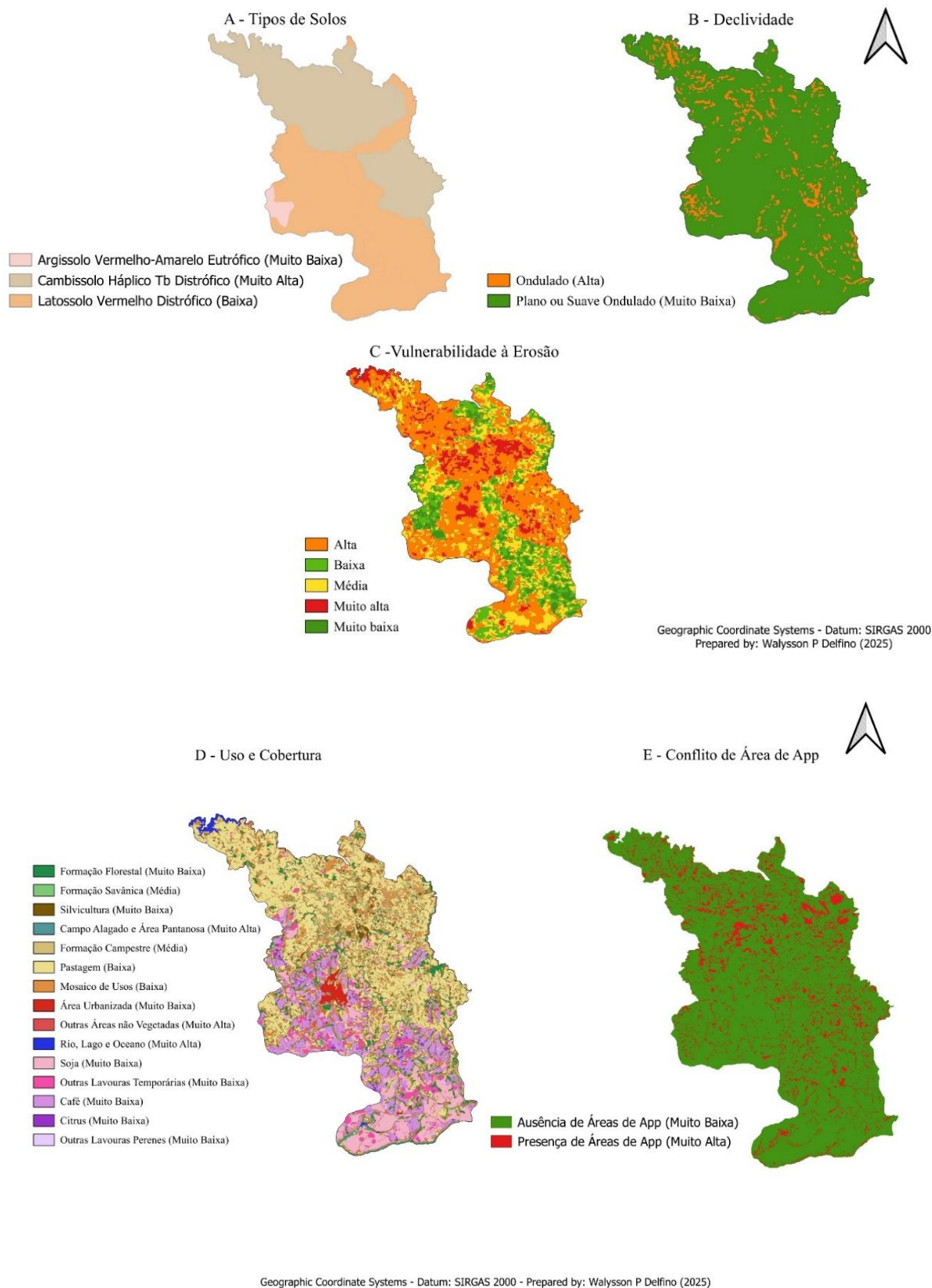


Figura 2. Camadas dos critérios utilizados para a avaliação da suscetibilidade à degradação florestal de Monte Carmelo (MG). Fonte: IBGE (2022); IDE-SISEMA (2024); Projeto MapBiomias (2024).

Os tipos de solo (Figura 2A) mostram a predominância de Latossolos Vermelhos-Amarelos distróficos (baixa prioridade), além da presença significativa de Cambissolos Háplicos (alta prioridade) e Argissolos Vermelho-Amarelos eutróficos (muito baixa prioridade). Embora Latossolos geralmente apresentem boa drenagem e estabilidade estrutural, sua suscetibilidade à erosão aumenta em terrenos com declividade, especialmente sob uso agrícola intensivo (Silva et al., 2005). Os Cambissolos, por sua vez, são solos mais rasos e menos desenvolvidos, o que os torna particularmente frágeis em termos de conservação do solo (Santos et al., 2015).

A declividade (Figura 2B) evidencia um relevo predominantemente plano a suavemente ondulado, mas com trechos localizados de alta declividade. Essa condição, quando combinada a solos mais frágeis e à remoção da cobertura vegetal, aumenta a vulnerabilidade à erosão hídrica (Silva et al., 2005). Esse processo é confirmado no mapa de vulnerabilidade (Figura 2C). As classes “alta” e “muito alta” concentram-se em áreas com maior inclinação e solos menos coesos, corroborando o papel do relevo e do tipo de solo na suscetibilidade à perda de solo (Melo et al., 2023). Padrões semelhantes são descritos em estudos de bacias no Cerrado, onde a interação entre declividade acentuada e uso agrícola intensivo é um dos principais vetores de degradação ambiental (Alves et al., 2023; Mello et al., 2016).

O uso da terra (Figura 2D) revela predominância de pastagens e lavouras temporárias, como soja, milho e algodão, além de áreas cultivadas com cana-de-açúcar e café. Esses usos ocupam a maior parte do território. A vegetação nativa, formada por remanescentes florestais e savânicos, aparece apenas em pequenas parcelas, concentradas principalmente no norte do município. Esse padrão indica forte pressão antrópica, frequentemente associada à degradação do solo e ao aumento de processos erosivos (Chazdon et al., 2021). Estudos mostram que o uso agrícola intensivo, quando não acompanhado de práticas conservacionistas, intensifica a perda de solo e reduz a capacidade produtiva ao longo do tempo (Alves et al., 2023). Essa condição reforça a importância de estratégias de restauração integradas ao planejamento territorial, conforme discutido por Comín et al. (2018) em análises de priorização ambiental.

A Figura 2E mostra os conflitos em APPs. Esse vetor é fundamental para a análise, pois o Código Florestal estabelece que as APPs têm funções essenciais de proteção da biodiversidade, dos recursos hídricos e do fluxo gênico da fauna (Brasil, 2012, art. 3º). A restauração nessas áreas deve, portanto, considerar indicadores ligados à conservação da biodiversidade, especialmente em zonas ripárias, nascentes e veredas (Silva; Nunes, 2017). Estudos no Cerrado indicam que APPs e Reservas Legais com uso conflitante representam os principais pontos de partida para ações de recomposição florestal, tanto pela sua relevância ecológica quanto pela vinculação direta a dispositivos legais de regularização ambiental (Morais Junior et al., 2024; Aguiar et al., 2025; Niemeyer et al., 2020).

Na Tabela 2 e na Figura 3, são apresentadas as áreas calculadas por classe e o mapa final de áreas prioritárias para restauração, respectivamente.

Tabela 2. Áreas por classe de prioridade para restauração florestal em Monte Carmelo (MG). Fonte: os autores.

Classe de Prioridade	Área Aproximada (ha)	% aproximada de área
Muito Baixa	26.886,0	20%
Baixa	47.051,0	35%
Média	33.608,0	25%
Alta	16.132,0	12%
Muito Alta	10.745,0	8%
Total	134.432,0	100%

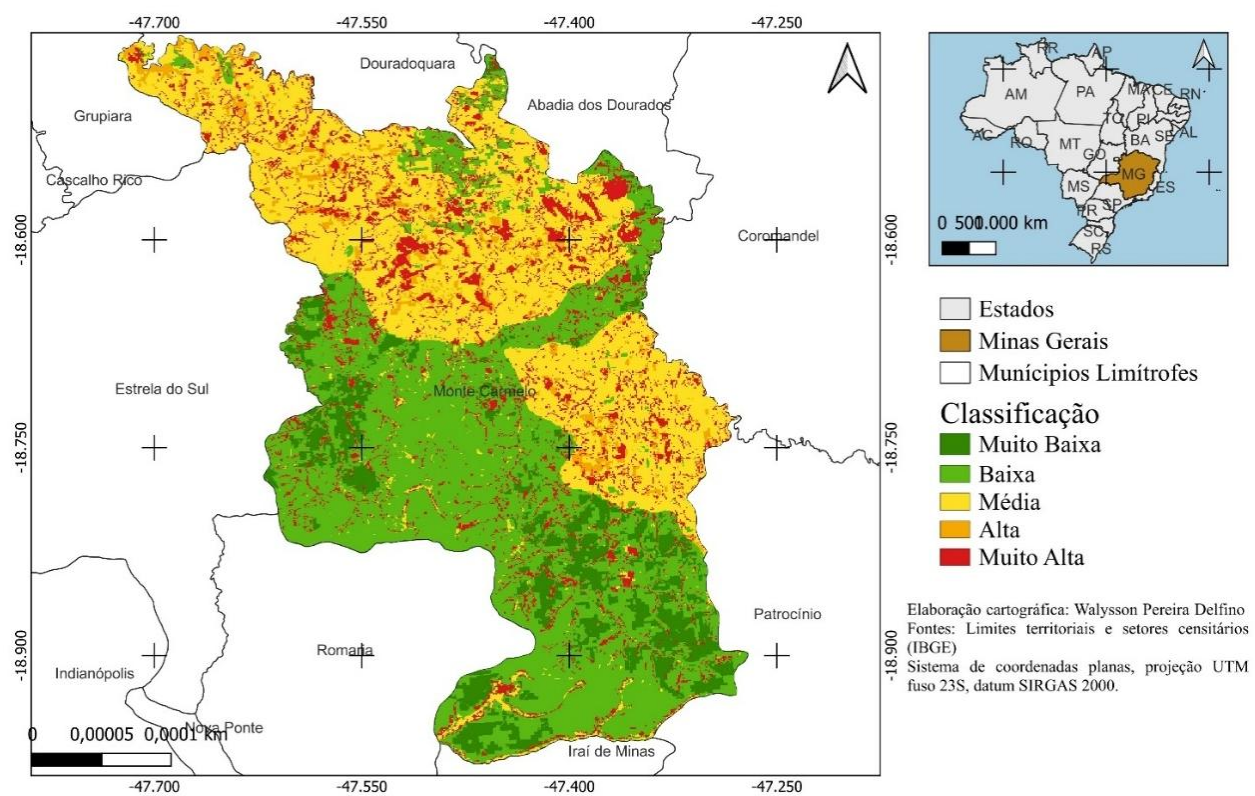


Figura 3. Mapa de Classes de Prioridade para Restauração Florestal no Município de Monte Carmelo (MG). Fonte: IBGE (2022); IDE-SISEMA (2024); MAPBIOMAS (2024).

Observa-se que 20% do território de Monte Carmelo apresenta classes de Alta e Muito Alta prioridade. Somadas às áreas de prioridade Média, esse total chega a 45% do município, o que indica uma proporção significativa de áreas que demandam atenção em projetos de restauração (Figura 3). Nas regiões sul e sudoeste predominam áreas classificadas como muito baixa e baixa prioridade, um padrão associado à presença de atividades agrícolas consolidadas e menor fragilidade ambiental, conforme

também observado em análises regionais de uso da terra no Cerrado (Almeida et al., 2020). Já nas porções centro-norte e nordeste há maior concentração de áreas classificadas como vermelhas, laranjas e amarelas, indicando zonas críticas para intervenções de restauração. Esse cenário reflete a combinação entre solos mais frágeis, maior declividade, expansão agropecuária e conflitos no uso da terra em APPs e RLs, fatores amplamente reconhecidos como vetores de degradação ambiental na literatura (Cartolano et al., 2022; Mello et al., 2016; Moraes Junior et al., 2024).

Esses resultados mostram que, embora a maior parte do território apresente baixa prioridade para restauração, existem mosaicos formados por diferentes níveis de prioridade em áreas vizinhas. Essa heterogeneidade espacial indica a necessidade de um planejamento que considere não apenas a classe isolada, mas também a configuração da paisagem e a conectividade entre fragmentos. Estudos de ADMC em outros municípios do Cerrado apontam que áreas de prioridade média e alta, quando conectadas de forma estratégica, tendem a ampliar os ganhos ecológicos da restauração, favorecendo a formação de corredores ecológicos e a proteção de nascentes e cursos d'água (García-Feced et al., 2011; Comín et al., 2018; Niemeyer et al., 2020).

Do ponto de vista metodológico, o zoneamento produzido pela ADMC reforça o potencial dessa abordagem para orientar estratégias de restauração no Cerrado. A integração de múltiplos critérios em uma superfície contínua permite identificar gradientes de suscetibilidade à degradação e construir cenários de intervenção mais realistas (França et al., 2019). Essa estrutura facilita o planejamento ambiental em escala local e cria uma base objetiva para a priorização de áreas, especialmente em territórios com forte pressão agropecuária.

Apesar dos avanços, é necessário reconhecer as limitações dos dados e as incertezas associadas ao modelo. Bases como o MapBiomas e o IDE-Sisema, embora amplamente utilizadas, apresentam erros de classificação e generalizações cartográficas que podem comprometer a precisão das áreas delimitadas (Projeto MapBiomas, 2024; SISEMA, 2024). Essas bases também possuem resolução espacial limitada, o que afeta a representação detalhada da paisagem. Além disso, a dinâmica anual do uso da terra, marcada por rápidas mudanças na agricultura e na cobertura vegetal, introduz incertezas adicionais em análises baseadas em recortes temporais específicos (Gorelick et al., 2017; Pedrollo et al., 2025).

O método utilizado também apresenta limitações inerentes à própria ADMC. A técnica depende da padronização e da reclassificação das variáveis, o que pode simplificar excessivamente a heterogeneidade ambiental, especialmente em solos diversos ou áreas com manejo diferenciado (França et al., 2019). As lacunas e inconsistências em cadastros ambientais, como o CAR, podem subestimar ou superestimar conflitos em APPs e RLs, conforme apontado por Moraes Junior et al. (2024). Ademais, a capacidade da ADMC de integrar múltiplos critérios não elimina incertezas relacionadas ao peso atribuído a cada variável, etapa sensível que pode influenciar o resultado final (Cartolano et al., 2022). Apesar dessas

limitações, o modelo fornece um quadro sintético robusto que pode ser aprimorado com diagnósticos locais e vistorias de campo, sobretudo nas áreas classificadas como Alta e Muito Alta prioridade.

Em termos aplicados, os resultados indicam que as áreas a serem restauradas primeiro são aquelas classificadas como Muito Alta e Alta prioridade, sobretudo quando coincidem com APPs em uso conflitante, margens de cursos d'água, nascentes e veredas, como previsto no Código Florestal (Brasil, 2012). Em seguida, áreas de prioridade Média tornam-se estratégicas para ampliar a conectividade entre fragmentos e consolidar corredores ecológicos, uma recomendação também destacada por Niemeyer et al. (2020) e García-Feced et al. (2011). Do ponto de vista legal, essas ações podem ser articuladas com instrumentos já existentes, como os Programas de Regularização Ambiental (PRAs), a recomposição de Reservas Legais prevista na Lei 12.651/2012, iniciativas municipais de Pagamento por Serviços Ambientais e políticas locais de planejamento ambiental e florestal (Silva & Nunes, 2017; Morais Junior et al., 2024). Esses mecanismos fortalecem o alinhamento entre as prioridades identificadas e a implementação prática das ações de restauração.

A delimitação dessas áreas prioritárias subsidia políticas públicas e ações mais eficazes de restauração florestal. Também contribui para o cumprimento das metas assumidas pelo Brasil no Acordo de Paris (UNFCCC, 2015), ao favorecer o sequestro de carbono, a conservação da biodiversidade e a manutenção de serviços ecossistêmicos. Assim, a restauração ultrapassa os objetivos legais estabelecidos pelo Código Florestal (Brasil, 2012) e passa a desempenhar papel central na mitigação das mudanças climáticas e na sustentabilidade do uso do solo (Chazdon et al., 2021).

A abordagem baseada em ADMC também se destaca pela capacidade de replicação em outros municípios do Cerrado, permitindo que diferentes territórios adotem a mesma lógica para identificar áreas prioritárias de restauração. Essa adaptabilidade já foi observada em estudos aplicados a diferentes escalas e regiões (Niemeyer et al., 2020; Cartolano et al., 2022). Quando associada a processos participativos e à atualização contínua das bases de dados, a metodologia fortalece o planejamento ambiental em escala regional e amplia o potencial de implementação de políticas de restauração.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo representa um esforço inédito para o município de Monte Carmelo, ao integrar e cruzar diferentes bases públicas em um modelo espacial único de priorização para restauração florestal. Essa abordagem permitiu revelar a variação espacial da suscetibilidade à degradação ambiental, expressa em mosaicos de áreas com níveis distintos de prioridade. A aplicação da ADMC possibilitou identificar zonas que demandam ações imediatas, especialmente aquelas associadas à maior declividade, solos mais frágeis e conflitos no uso da terra em Áreas de Preservação Permanente e Reservas Legais.

Os resultados reforçam o papel estratégico do zoneamento ambiental no planejamento territorial do cerrado, orientando políticas públicas, programas de regularização ambiental e iniciativas de

recomposição florestal. Ao direcionar esforços para as áreas mais críticas, aumentam-se as chances de recuperar funções ecológicas, fortalecer a conectividade entre fragmentos e avançar no cumprimento de metas climáticas e de conservação estabelecidas internacionalmente. Assim, a restauração torna-se um instrumento central para a gestão sustentável do território e para a mitigação dos impactos decorrentes do uso intensivo da terra.

Como perspectivas futuras, o modelo pode ser ampliado com variáveis relacionadas à biodiversidade, conectividade funcional, priorização econômica (custos de restauração, aptidão agrícola e viabilidade de manejo) e cenários climáticos. A inclusão desses elementos tende a aumentar a precisão da priorização e fortalecer o uso do zoneamento como ferramenta de tomada de decisão em diferentes escalas. Além disso, melhorias metodológicas (como maior resolução espacial, refinamento das bases de uso da terra e validação em campo) podem aperfeiçoar os resultados apresentados e apoiar novas aplicações em municípios vizinhos e em outras regiões do cerrado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, T. R., Luz, L. D., Rangel Neto, R. S., Sousa, D. C., & Mariano-Neto, E. (2025). Methodologies and Criteria for Defining Areas for Forest Restoration Aiming at Water Production and Security. *Limnological Review*, 25(3). DOI: 10.3390/limnolrev25030037
- Almeida, F. C., Silveira, E. M. O., Acerbi Júnior, F. W., França, L. C. J., Bueno, I. T., & Terra, B. J. O. (2020). Análise multicritério na definição de áreas prioritárias para recuperação florestal na bacia do Rio Doce, em Minas Gerais. *Nativa*, 8(1), 81–90. DOI: 10.31413/nativa.v8i1.8130
- Alves, M. A. B., de Souza, A. P., de Almeida, F. T., Hoshida, A. K., Araújo, H. B., da Silva, A. F., & de Carvalho, D. F. (2023). Effects of land use and cropping on soil erosion in agricultural frontier areas in the Cerrado-Amazon ecotone, Brazil, using a rainfall simulator experiment. *Sustainability*, 15(6), 4954. DOI: 10.3390/su15064954
- Brasil (2012). Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. *Diário Oficial da União*. Recuperado em [12/11/2025], de https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm.
- Cartolano, R. T., de Jesus França, L. C., da Silva, L. D. C. M., Botelho, S. A., & Acerbi Júnior, F. W. (2022). *Definição de áreas prioritárias para restauração ecológica: análise de decisão multicritério como instrumento para o planejamento ambiental*. Nova Xavantina, MT: Editora Pantanal. DOI: 10.46420/9786581460600
- Castro, L. L. P. D. S. (2023). *Mapeamento da vegetação nativa do município de Monte Carmelo-MG* [Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo]. Uberlândia-MG: Universidade Federal de Uberlândia. 66 f. Recuperado em [12/11/2025], de

https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/38636/1/MapeamentoDaVegeta%C3%A7%C3%A3oNativa%20.pdf?utm_source.

- Chazdon, R L. et al. (2021). Key challenges for governing forest and landscape restoration across different contexts. *Land Use Policy*, v. 104, p. 104854, 2021. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104854
- Comín, F. A., Miranda, B., Sorando, R., Felipe-Lucia, M. R., Jiménez, J. J., & Navarro, E. (2018). Prioritizing sites for ecological restoration based on ecosystem services. *Journal of Applied Ecology*, 55(3), 1155-1163. DOI: 10.1111/1365-2664.13061
- Esri. (2020). *ArcGIS Desktop: Release 10.8* [Software]. Environmental Systems Research Institute. <https://www.esri.com>.
- França, L. C. J., Mucida, D. P., Morais, M. S., Catuzzo, H., Abegão, J. L. R., & Pereira, I. M. (2019). Zoneamento da fragilidade ambiental de ecossistemas naturais e antropizados por meio de avaliação multicritério. *Nativa*, 7(5), 589–599. DOI: 10.31413/nativa.v7i5.7300
- García-Feced, C.; Saura, S.; Elena-Rosselló, R. (2011). Improving landscape connectivity in forest districts: A two-stage process for prioritizing agricultural patches for reforestation. *Forest ecology and management*, 261(1), 154-161. DOI: 10.1016/J.FORECO.2010.09.047
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022). *Malha de Setores Censitários* [Arquivo digital]. Recuperado em [12/11/2025], de <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/26565-malhas-de-setores-censitarios-divisoes-intramunicipais.html>.
- IDE-SISEMA- Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais (2024). *Uso e cobertura da terra*. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais.
- Mello, K., Toppa, R. H., & Cardoso-Leite, E. (2016). Priority areas for forest conservation in an urban landscape at the transition between Atlantic Forest and Cerrado. *Cernea*, 22(3), 277–288. DOI: 10.1590/01047760201622032172
- Melo, A. C. A., Bettiol, G. M., de Albuquerque, L. B., Magalhães, I., Sano, E. E. (2023). Susceptibilidade à erosão, perda de solos e vulnerabilidade natural na bacia do Médio Rio Araguaia-Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(6), 3103–3124. DOI: 10.13031/2013.31192
- MMAMC - Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (2017). *Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (PLANAVEG)*. Brasília, DF: MMA. Recuperado em [12/11/2025], de https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/sbio/dflo/plano-nacional-de-recuperacao-da-vegetacao-nativa-planaveg/planaveg_plano_nacional_recuperacao_vegetacao_nativa.pdf.
- Morais Junior, V. T. M., de Jesus França, L. C., Brianezi, D., Romero, F. M. B., Milagre, J. C., Mendes, L. J., ... & Jacovine, L. A. G. (2024). Monitoring of areas in conflict with the legislation for the

- protection of native vegetation in Brazil: Opportunity for large-scale forest restoration and for the Brazilian global agenda. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(11), 1113. DOI: 10.1007/s10661-024-13295
- Mucida, D. P., Gorgens, E. B., Rech, A. R., Christofaro, C., da Silva, R. S., Pereira, I. M., ... & de Jesus França, L. C. (2023). Designing optimal agrosilvopastoral landscape by the potential for conservation use in Brazil. *Sustainable Horizons*, 5, 100045. DOI: 10.1016/j.horiz.2022.100045
- Niemeyer, J., Barros, F. S. M., Silva, D. V., Crouzeilles, R., & Vale, M. M. (2020). Planning forest restoration within private land holdings with conservation co-benefits at the landscape scale. *Science of The Total Environment*, 717, 135262. DOI: 10.1016/J.SCITOTENV.2019.135262
- Pedrollo, C. T., Pedercini, F., & Martins, M. (2025). Shuffling the deck: A gamified multicriteria approach to prioritize agroecological restoration areas in Northeastern Pará, Brazilian Amazon. *Journal of Environmental Management*, 380, 124988. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124988
- Petti, B.; Ottaviano, M. (2024). Identification of agricultural areas to restore through Nature-based Solutions (NbS). *Land*, v. 13, n. 11, p. 1954,. DOI: 10.3390/land13111954
- Plano Diretor Florestal (2012). *Manual técnico para identificação de áreas prioritárias para recomposição florestal em escala local*. Agência das Bacias PCJ – Comitês PCJ. Recuperado em [12/11/2025], de <http://www.agencia.baciaspcj.org.br/docs/plano-diretor-florestal/manual-recomposicao-florestal.pdf>.
- Projeto MapBiomas (2024). *Coleção 10 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil (1985-2024)*. Recuperado em [12/11/2025], de <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>.
- Santos, P. G., Bertol, I., Miquelluti, D. J., Almeida, J. A., & Mafra, A. L. (2015). *Agrupamento de pedons de Cambissolos húmicos com base em atributos físicos e químicos utilizando a estatística multivariada*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39(2), 350-360. DOI: 10.1590/01000683rbcs20130415
- Santos, R. M., de Moraes Júnior, V. T. M., Amaral, E., Mucida, D. P., & de Jesus França, L. C. (2024). *Diagnóstico do conflito do uso e ocupação da terra em áreas protegidas por lei em imóveis rurais no município de Monte Carmelo-MG*. *Revista Espinhaço*, 13(1), 1-21. DOI: 10.5281/zenodo.14501236
- Silva, A. M. D., Silva, M. L. N., Curi, N., Lima, J. M. D., Avanzi, J. C., & Ferreira, M. M. (2005). Perdas de solo, água, nutrientes e carbono orgânico em Cambissolo e Latossolo sob chuva natural. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40(12), 1223–1230. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2005.v40.7088
- Silva, D., & Nunes, S. (2017). *Restauração florestal: Avaliação e modelagem econômica da restauração florestal no Estado do Pará*. Belém, PA: Imazon. Recuperado em [12/11/2025], de https://www.researchgate.net/profile/Samia-Nunes/publication/317662100_Avaliacao_e_modelagem_economica_da_restauracao_florestal_no_estado_do_Para/links/5947c0520f7e9babcad9da23/Avaliacao-e-modelagem-economica-da-restauracao-florestal-no-estado-do-Para.pdf.

Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – MG (SISEMA). (2024). *Infraestrutura de Dados Espaciais – IDE-Sisema*. Recuperado em [12/11/2025], de <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>.

UNFCCC- United Nations Framework Convention on Climate Change (2015). *Adoption of the Paris Agreement*. Paris: United Nations Framework Convention on Climate Change. Recuperado em [12/11/2025], de <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>.

Educação profissional na rede estadual paulista: expansão, desafios e o papel do itinerário técnico em agronegócio

Recebido em: 26/11/2025

Aceito em: 11/12/2025

 10.46420/9786585756693cap5

Ariane Dantas 

Luddy Rigoni Caetano Rodrigues 

Jhonatan Manoel Angelo Dos Santos 

Luiz Eduardo Rosa Silva 

Laura Dantas França Teixeira 

Geraldo de Nardi Junior 

INTRODUÇÃO

A educação profissional de nível médio no Brasil possui histórico marcado pela separação entre base geral e preparação técnica, com oferta concentrada predominantemente em instituições especializadas. No entanto nas últimas décadas, diretrizes nacionais têm buscado superar essa dicotomia ao incentivar modelos que integrem trajeto acadêmico e qualificação profissional. Essa mudança reflete demandas sociais e produtivas cada vez mais complexas, que exigem jovens capazes de articular conhecimentos teóricos, competências práticas e compreensão crítica de seu território (Gomes, Da Rocha & De Souza, 2023).

A partir dos anos 2000, a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB) n.º 9.394/1996 passou por alterações significativas que redefiniram a organização do ensino médio brasileiro, especialmente quanto à distinção entre formação geral básica (FGB) e a técnico-profissional. Após a revogação do Decreto n.º 2.208/1997 pelo Decreto n.º 5.154/2004, a LDB retomou oficialmente a possibilidade de oferta integrada entre o nível médio e educação profissional, abrindo caminho para propostas curriculares mais articuladas (Brasil, 2004). Contudo, a mudança mais profunda ocorreu com a Lei n.º 13.415/2017, que reformulou essa etapa ao instituir a FGB como núcleo obrigatório e os itinerários formativos (IF) como parte flexível e eletiva do currículo, permitindo que os estudantes escolhessem percursos em áreas do conhecimento ou técnico-profissionalizantes (Brasil, 2017).

Essa reformulação foi consolidada nas diretrizes curriculares nacionais e nos referenciais estaduais, como o documento orientador do Estado de São Paulo, que define a FGB como a base comum alinhada à base nacional comum curricular (BNCC) e os itinerários como o espaço de aprofundamento e qualificação técnica vinculada ao projeto de vida do estudante (Seduc - SP, 2021). Em 2024, novas atualizações regulamentares orientadas pelo MEC reforçaram a ampliação da carga horária da FGB e ajustaram a estrutura dos itinerários, buscando equilibrar flexibilidade organizacional e equidade de

acesso, mantendo, porém, a lógica introduzida pela Lei 13.415/2017 de diversificação dos percursos formativos. Assim, entre 2002 e 2024, a LDB evoluiu de um modelo rigidamente separado entre ensino geral e técnico para uma arquitetura pedagógica integrada que articula formação comum e percursos eletivos, reafirmando o papel dos itinerários formativos na construção de trajetórias acadêmicas e profissionais mais plurais.

Nesse cenário, observa-se que diversas redes estaduais vêm intensificando a presença da educação profissional no interior das escolas de ensino médio público. Ainda que a integração entre essas modalidades já existisse em outras configurações, a reorganização estrutural prevista para o ano letivo de 2024 conferiu novo impulso à modalidade ao expandir itinerários técnicos para unidades escolares que tradicionalmente ofertavam apenas a base comum. Esse movimento representa avanço importante no sentido de democratizar oportunidades e diversificar percursos formativos (Grupo escola pública e democracia, 2023).

A inclusão de componentes técnicos nas instituições públicas responsáveis pela etapa média da escolarização fortalece as possibilidades didáticas ao favorecer metodologias investigativas e centradas no protagonismo estudantil, permitindo que os estudantes relacionem conhecimentos teóricos a situações reais de seu território. Nesse cenário, o agronegócio destaca-se como área estratégica por integrar bases científicas, práticas sustentáveis e dimensões socioeconômicas presentes no cotidiano dos alunos. A presença desse eixo técnico nos itinerários formativos fortalece o processo educativo e intensifica a articulação entre escola, território e desenvolvimento regional, contribuindo para trajetórias formativas alinhadas à vocação econômica e ambiental das regiões atendidas (Soares, 2025).

A pertinência de analisar esse cenário justifica-se pela realização de estudos que revisem fundamentos, desafios e potencialidades da educação profissional na etapa média da escolarização da rede estadual, especialmente diante das expansões implementadas nos últimos anos. Compreender como áreas estruturantes, como o campo produtivo rural, vêm sendo incorporadas às escolas de ensino médio permite identificar impactos instrucionais, exigências de aperfeiçoamento docente e transformações na identidade institucional decorrentes desse novo modelo (De Almeida et al., 2024). Diante disso, o objetivo deste capítulo é contextualizar a educação profissional na fase final da educação básica da rede estadual e examinar as contribuições do agronegócio, considerando fundamentos conceituais, desafios estruturais e implicações pedagógicas da integração desse segmento técnico-profissional ao currículo.

EDUCAÇÃO PROFISSIONAL NO ENSINO MÉDIO: UM ATO DE DEMOCRATIZAÇÃO

A educação profissional brasileira consolidou-se historicamente em instituições técnicas específicas, criando um sistema dual entre formação geral e qualificação profissional. Reformas e diretrizes recentes passaram a defender maior articulação entre esses dois segmentos, visando reduzir desigualdades e tornar a preparação dos estudantes mais coerente com a complexidade do mundo do

trabalho contemporâneo. Nesse contexto, as unidades de nível médio da rede pública passaram progressivamente a incorporar componentes técnicos em seus currículos (Cardoso et al., 2025).

A reorganização curricular prevista para o ano letivo de 2024 intensificou essa tendência ao incrementar a oferta de itinerários de caráter técnico dentro das escolas públicas de ensino integral. Esse crescimento não inaugura a integração entre ensino geral e técnico, mas representa etapa relevante de expansão, marcada por diversificação de cursos e aumento do número de estudantes contemplados. O avanço contribui para consolidar a dimensão técnico-profissional como dimensão legítima da educação básica, no sentido de promover a articulação entre a base comum, reduzindo desigualdades e alinhando o percurso educativo dos jovens às exigências contemporâneas do mundo do trabalho (Seduc - SP, 2021).

A integração entre formação geral e técnica é apontada como essencial para produzir aprendizagens mais significativas, pois aproxima o currículo das situações reais vivenciadas pelos estudantes. Segundo o Ministério da Educação (2021), a educação profissional e tecnológica deve articular bases científicas, conhecimentos técnicos e práticas contextualizadas, promovendo a compreensão dos processos produtivos e o desenvolvimento de competências abrangentes. Para Rêgo & De Oliveira (2010), essa articulação contribui para transformar o conhecimento escolar em instrumento de leitura crítica da realidade, fortalecendo a autonomia intelectual. Já Bacich & Moran (2018) enfatizam que metodologias ativas como estudos de caso, projetos e resolução de problemas favorecem o engajamento estudantil ao conectar teoria e prática em experiências formativas concretas.

A transformação da cultura escolar decorrente da presença de componentes técnicos envolve a reorganização das práticas pedagógicas, exigindo planejamento colaborativo, reflexão docente e maior articulação entre as áreas do conhecimento. A incorporação de atividades práticas potencializa as possibilidades educativas da escola e fortalece seu papel comunitário. Esse movimento contribui para consolidar ambientes de aprendizagem mais dinâmicos e conectados à realidade social (Rückert & Mariano, 2022).

Assim, a expansão do ensino técnico no ensino médio das escolas públicas contribui tanto para democratizar o acesso à qualificação profissional quanto para diversificar trajetórias acadêmicas e ocupacionais. Essa expansão torna-se ainda mais significativa quando envolve áreas de grande relevância socioeconômica, como o agronegócio, que dialogam com vocações regionais e expande as perspectivas dos estudantes no que se refere ao desenvolvimento territorial (França, 2023).

O AGRONEGÓCIO NA FORMAÇÃO TÉCNICA DO ENSINO MÉDIO PÚBLICO

O agronegócio constitui um dos setores mais representativos da economia brasileira, o que justifica sua incorporação crescente aos programas de educação técnico-profissional no ensino médio da rede estadual. A oferta de componentes voltados a cadeia agroindustrial fortalece o vínculo entre escola e território ao abordar práticas produtivas, relações econômicas e desafios socioambientais presentes no

cotidiano de muitas comunidades. Essa integração contribui para atribuir maior significado aos conteúdos escolares e diversifica o repertório formativo dos estudantes (Hornung et al., 2021).

O setor agropecuário exige uma abordagem multidisciplinar, envolvendo conhecimentos de ciências agrárias, biológicas, ambientais e econômicas. No contexto escolar, essa característica favorece práticas interdisciplinares e metodologias que integram teoria e prática. Componentes como manejo vegetal, produção animal, sustentabilidade, logística e comercialização são trabalhados de forma articulada, promovendo compreensão ampla das cadeias produtivas e de suas interfaces com o mercado e com o ambiente (Seduc, 2025).

A educação profissional e tecnológica (EPT) enfatiza que o ensino técnico, especialmente em áreas como o agronegócio, demanda domínio conceitual sólido, compreensão dos processos produtivos e capacidade de articular teoria e prática. Segundo o Ministério da Educação (2021), a EPT deve integrar bases científicas, competências técnicas e atividades práticas contextualizadas, proporcionando aos estudantes experiências formativas alinhadas às demandas produtivas e sociais. Essa interação requer capacitação docente permanente e metodologias que aproximem o currículo de situações reais de trabalho, favorecendo aprendizagens mais significativas e o desenvolvimento de competências profissionais aprofundadas.

O ensino da cadeia agroindustrial contribui para o desenvolvimento de uma consciência socioambiental crítica, especialmente quando articulado a fundamentos da pedagogia histórico-crítica, que concebe a educação ambiental como prática social transformadora. Carvalho (2013), ao discutir a integração entre educação ambiental e itinerários técnicos, evidencia que temas como uso sustentável da água, conservação do solo, manejo responsável de resíduos e segurança alimentar ganham maior densidade quando abordados a partir da relação dialética entre produção, natureza e sociedade. Assim, ao trabalhar esses conteúdos na etapa final da educação básica pública, a escola fortalece uma postura cidadã comprometida com práticas produtivas responsáveis e com a sustentabilidade das atividades agropecuárias, favorecendo a capacidade dos estudantes de interpretar criticamente as dinâmicas socioambientais que estruturam seus territórios.

Assim, a presença do agronegócio na educação profissional integrada ao ensino médio público acrescenta as possibilidades de inserção profissional dos estudantes, fortalece iniciativas empreendedoras e contribui para o desenvolvimento regional. O aumento da oferta dessa área nas escolas públicas tem se tornado um movimento ainda mais relevante, ao consolidar a formação técnica como instrumento de transformação social e territorial (Corrêa Filho, Da Paixão & Nogueira 2022).

DESAFIOS E POTENCIALIDADES DA AMPLIAÇÃO PARA A EDUCAÇÃO PROFISSIONAL

Acredita-se que haja uma expansão da educação profissional para escolas públicas, intensificada para os próximos anos; contudo, esse crescimento envolve desafios estruturais que variam conforme o território e a organização escolar. Muitas unidades não dispõem de infraestrutura previamente adequada às práticas técnicas, exigindo reconfiguração de espaços, aquisição de materiais e estabelecimento de parcerias externas. Como apontam Moreira & Paixão (2025), a oferta de cursos técnicos no ensino médio somente se sustenta com investimentos em infraestrutura, capacitação docente e materiais didáticos adequados, condição essencial para assegurar qualidade e equidade. No caso do setor agropecuário, tais demandas tornam-se ainda mais evidentes em razão da necessidade de ambientes externos e atividades práticas que dependem de espaços específicos para o desenvolvimento do componente técnico.

Outro desafio discutido pelos estudos refere-se à preparação docente. A oferta recente de cursos técnicos em escolas públicas do Estado São Paulo do fez com que profissionais assumissem componentes para os quais nem sempre possuíam experiência específica. Segundo Dornelles, Castaman & Vieira (2021), a EPT exige uma estrutura docente constituinte, sistemática e capaz de permitir a articulação e o desenvolvimento equilibrado de saberes gerais e técnicos. Assim, na área de agronegócio, o ensino aplicado requer domínio conceitual, compreensão de processos produtivos e capacidade de integrar teoria e prática, o que evidencia a importância do desenvolvimento profissional contínuo e suporte pedagógico sistemático.

A articulação curricular aparece como elemento central para o êxito da integração. Autores defendem que o ensino técnico-profissional deve dialogar de forma estruturada com os componentes da base comum, favorecendo interdisciplinaridade e evitando fragmentações. Corroborando Pereira (2022), que afirma que a interdisciplinaridade constitui fundamento essencial do currículo integrado, permitindo equilibrar teoria e prática na educação profissional e tecnológica. Quando essa articulação ocorre, pesquisas evidenciam ganhos significativos na compreensão dos conteúdos e na capacidade dos estudantes de analisar problemas complexos. Esse movimento é particularmente relevante em áreas multifacetadas como atividades econômicas relacionadas à produção, processamento e comercialização de produtos agrícolas e pecuário.

Ao lado dos desafios, a literatura ressalta potencialidades importantes. A presença da educação profissional no ensino médio público abre oportunidades educacionais, favorece o engajamento dos estudantes e fortalece práticas formativas baseadas na investigação e na contextualização. As metodologias ativas na EPT destacam-se por promover o engajamento dos estudantes em processos investigativos e contextualizados, ampliando sua apropriação crítica dos conteúdos e favorecendo a conexão entre escola, território e inovação (Cajaíba & Souza, 2023). No agronegócio, a conexão com o território estimula iniciativas voltadas para inovação, sustentabilidade e desenvolvimento regional, expandindo a função social da escola.

O crescimento da educação profissional para escolas públicas representa um avanço significativo no sentido de democratizar o acesso e valorizar eixo técnico-profissionalizante (Da Silva & Coutinho, 2024). A inserção da produção agropecuária empresarial nesse processo consolida sua relevância estratégica e contribui para preparar jovens aptos a enfrentar desafios contemporâneos com responsabilidade, visão crítica e competência técnica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O fortalecimento da educação profissional no ensino médio público, intensificada no processo de reorganização estrutural nos últimos anos, constitui importante avanço para democratizar o acesso, integrar base geral e técnica e fortalecer o desenvolvimento territorial. O agronegócio revela-se área estratégica nesse contexto ao articular conhecimento científico, práticas produtivas e responsabilidade socioambiental. Embora existam desafios relacionados à infraestrutura, qualificação docente e articulação curricular, os estudos indicam que os benefícios tendem a superar as dificuldades, contribuindo para formar jovens mais preparados para atuar em contextos complexos e socialmente relevantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bacich, L., & Moran, J. (2018). Metodologias ativas para uma educação inovadora: uma abordagem teórico-prática. (Desafios da educação). Porto Alegre: Penso.
- Brasil. (2004). Decreto n.º 5.154, de 23 de Julho de 2004 (Regulamenta A LDB quanto à Educação Profissional). Presidência da República - Casa Civil. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5154.htm
- Brasil. (2017). Lei n.º 13.415, de 16 de Fevereiro de 2017 (Reforma do Ensino Médio). Presidência da República - Casa Civil. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113415.htm
- Cajaíba, M., & Souza, D. M. (2023). Letramentos digitais na EPT: contribuições a partir da revisão de literatura. *Revista de Extensão Trilhas*, 4, 2, 122-136.
- Cardoso, L. M. L., Souza, H. C., Cardoso, F. M. C. B., & Noll, M. (2025). Ensino médio integrado no Brasil: uma possibilidade para superar a dualidade histórica da educação profissional e tecnológica. *Revista Brasileira da Educação Profissional e Tecnológica*, 1, 25, 1-21. DOI: <https://doi.org/10.15628/rbept.2025.18178>
- Carvalho, I. C. M. (2013). O sujeito ecológico: a formação de novas identidades na escola. In: Pernambuco, M., & Paiva, I. (Org.). *Práticas coletivas na escola*. 1º ed. Campinas: Mercado de Letras, 1, 115-124.

- Corrêa Filho, I. O. , Da Paixão, J. A., & Nogueira, M. O. (2022). Origem, expansão e interiorização da Educação Profissional e Tecnológica no Brasil. *Revista Diálogo Educacional*, 22, 74, 996-1022. DOI: <https://doi.org/10.7213/1981-416X.22.074.DS0>.
- Da Silva, J. A. S. G., & Coutinho, D. J. G. (2024). O papel da educação profissional e tecnológica na formação para o mercado de trabalho no Brasil. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, 10, 11, 999-1007. DOI: <https://doi.org/10.51891/rease.v10i11.16554>
- De Almeida, R. S., Vieira, M. A., De Oliveira, E. C., Torres, M. E. S., Borba, S. I., Da Silva, K. K. L., Junior, A. P. S., Xavier, C. S., Nogatz, E. J., & Lima, J. W. B. (2024). Itinerários formativos no novo ensino médio e os desafios para a educação no Brasil. *Journal of Humanities and Social Science*, 29, 3, 37-42. DOI: 10.9790/0837-2903043742
- Dornelles, F. R. B., Castaman, A. S., & Vieira, J. A. (2021). Educação profissional e tecnológica: desafios e perspectivas na formação docente. *Revista Exitus*, 11, 1, p. e020133. DOI: 10.24065/2237-9460.2021v11n1ID1537. DOI: <https://doi.org/10.24065/2237-9460.2021v11n1id1537>
- França, D. M. C. (2023). A formação profissional no programa nacional de educação do campo. *Revista Educação e Políticas em Debate*, 12, 1, 326-344. DOI: <https://doi.org/10.14393/repod-v12n1a2023-67550>.
- Gomes, J. M., Da Rocha, G. N. P., & De Souza, A. L. M. (2023). As diretrizes curriculares nacionais gerais para a educação profissional e tecnológica: um olhar a partir das bases conceituais da EPT. *Revista Caderno Pedagógico*, 20, 4, 856-873. DOI: 10.54033/cadpedv20n4-023
- Grupo Escola Pública e Democracia - Gepud (2023). Redução de itinerários formativos para o ensino médio na rede estadual de São Paulo. São Paulo: Gepud/Repu, 10 out. 2023. Disponível em: www.repu.com.br/notas-tecnicas.
- Hornung, R., De Grandi, A. M., Leonel, A. P. S., & Gonçalves, J. C. (2021). Educação profissional no meio rural e suas implicações no desenvolvimento sustentável. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 14, 2, 1-121. DOI: 10.17765/2176-9168.2021v14Supl.2.e9430.
- Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional. Presidência da República - Casa Civil. Brasil. (1996). Lei n.º 9.394, de 20 de Dezembro de 1996 (LDB) Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9394.htm
- Ministério da Educação (2021). Diretrizes Curriculares Nacionais Gerais Da Educação Profissional E Tecnológica. Disponível em: https://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_docman&view=download&xalias=167931-rcp001-21&category_slug=janeiro-2021-pdf&Itemid=30192.
- Moreira, R. M., & Paixão, M. V. (2025). A expansão dos cursos da educação profissional e tecnológica do novo ensino médio na rede pública estadual de ensino do Paraná, no ano letivo de 2022. Disponível em:

https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/922440/2/Ruth_PE_Artigo_ampliacao_EPT%20rede%20publica%20PR%202022%20-%20Ruth%20Mari%20Moreira.pdf?utm_source=

Pereira, Li. N. (2022). A (re)construção curricular na Educação Profissional e Tecnológica: integração e interdisciplinaridade conectando teoria e prática. *Revista Brasileira da Educação Profissional e Tecnológica*, 1, 22, e11616-e11616. DOI: 10.15628/rbept.2022.11616

Rêgo, L. B., & De Oliveira, M. V. R. (2010). *Didática*. Recife: UPE, 2010.

Rückert, F. Q., & Mariano, J. L. M. (2022). *Cultura escolar em perspectiva democrática: saberes e práticas*. Campo Grande: Editora. UFMS.

Secretaria da Educação do Estado de São Paulo - Seduc/SP. (2021). Documento Orientador - Novo Ensino Médio do Estado de São Paulo: Implementação dos Itinerários Formativos. Disponível em: https://www.educacao.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/08/documento-orientador_novo-ensino-m%c3%a9dio-sp.pdf

Secretaria da Educação do Estado de São Paulo - Seduc/SP. (2025). Ensino Médio Paulista - Itinerário Técnico Agronegócio. Portal Ensino Médio Paulista, São Paulo: Seduc-SP. Disponível em: <https://ensinomediopaulista.educacao.sp.gov.br/>.

Soares, U. G. (2025). Novo ensino médio relacionado aos itinerários formativos. *Lumen Et Virtus*, 16, 14, 1-5. DOI: 10.56238/levv16n54-083

Mecanismos, Estratégias e Perspectivas Sustentáveis para Biorremediação e Recuperação de Elementos das Terras Raras: Uma Revisão

Recebido em: 11/12/2025

Aceito em: 13/12/2025

 10.46420/9786585756693cap6

Pedro Henrique Vinha Silva 

Michelle de Souza Santos 

David Antonio Palla Silvestre 

Lucia Maria Carareto Alves 

Luciana Maria Saran 

INTRODUÇÃO

Os “elementos das terras raras” (ETRs) ou “metais das terras raras” constituem um grupo de 17 elementos químicos, que têm importância econômica e são fundamentais para a produção de tecnologias ligadas à economia verde e à indústria de baixo carbono (Jones & Vasconcelos, 2025; Porto & Queiroz, 2025). Este grupo é composto pelos elementos escândio (Sc) e ítrio (Y) e pelos 15 lantanídeos ou lantanoides, que incluem lantânio (La), cério (Ce), praseodímio (Pr), neodímio (Nd), promécio (Pm), samário (Sm), európio (Eu), gadolínio (Gd), térbio (Tb), disprósio (Dy), hólmio (Ho), érbio (Er), túlio (Tm), itérbio (Yb) e lutécio (Lu) (Porto & Queiroz, 2025).

Historicamente, esses elementos foram denominados “terras raras”, pois entre o final do século XVIII e o início do século XIX, período no qual começaram a ser descobertos, eles foram isolados de seus minerais, na forma de óxidos e, nessa época, a palavra “terra” era usada para designar óxidos metálicos. Por sua vez, o termo “raras” está relacionado ao fato desses elementos terem sido encontrados, inicialmente, apenas em alguns minerais na Suécia, sendo a sua separação bastante complexa. Entretanto, atualmente, sabe-se que esse conjunto de elementos químicos é composto por metais e não por óxidos, e que sua abundância na crosta terrestre é alta (Sousa Filho & Serra, 2014). Túlio (0,5 ppm) e lutécio (0,8 ppm), que são os ETRs de menor abundância na crosta terrestre, são mais abundantes do que a prata (0,07 ppm) e o bismuto (0,008 ppm), enquanto cério, lantânio e neodímio são mais abundantes do que os metais cobalto, níquel e chumbo (Martins & Isolani, 2005).

Na natureza, os ETRs são encontrados em diversos minerais, sendo os mais importantes e de maior demanda industrial, a monazita, a bastnasita e a xenotima. A monazita é um fosfato de ETRs $[(La,Ce,Th)PO_4]$, que frequentemente contém também os elementos radioativos tório e urânio. A bastnasita é um fluorcarbonato de ETRs $[(La,Ce,Nd)CO_3F]$ e a xenotima é um fosfato de ítrio e ETRs pesados $[(Y,Dy,Yb)PO_4]$ (Sousa Filho & Serra, 2014). Esses minerais ocorrem em depósitos primários (rochas ígneas e metamórficas) e secundários (depósitos de placer e solos de intemperismo)

(Santos & Panossian, 2017). A associação com elementos radioativos em alguns desses minerais é uma preocupação ambiental e de saúde ocupacional durante a mineração e o processamento.

A China, que no ano de 2024 produziu 270.000 t de ETRs, é detentora das maiores reservas e produção mundial desses elementos, concentrando depósitos que totalizam 44 milhões de t (cerca 49 % do total). A produção de ETRs pelo Brasil é muito pequena (apenas 20 t no ano de 2024), comparada a da China, embora o Brasil detenha 23 % das jazidas mapeadas de ETRs (21 milhões de t). Os principais depósitos brasileiros de ETRs, cuja exploração é economicamente viável, estão localizados nos Estados de Minas Gerais, Goiás, Amazonas e Bahia. Em termos globais, as demais reservas de ETRs estão presentes nos seguintes países (milhões de t): Índia (6,9), Austrália (5,7), Rússia (3,8), Vietnã (3,5), Estados Unidos (1,9), Groenlândia (1,5), Tanzânia (0,89) e África do Sul (0,86) (Jones & Vasconcelos, 2025).

As aplicações dos ETRs são vastas e abrangem desde tecnologias de ponta até produtos do dia a dia, tornando-os indispensáveis para a economia moderna. Compostos contendo ETRs são empregados na indústria do petróleo, como catalisadores, em processos de craqueamento e em catalisadores automotivos para controle de emissões de poluentes. São componentes essenciais em ímãs permanentes de alta performance (como os de samário-cobalto e neodímio-ferro-boro), utilizados em motores elétricos, geradores de energia eólica, veículos elétricos e eletrônicos de consumo (Sousa Filho, Galaço & Serra, 2019). Suas propriedades luminescentes são exploradas em fósforos para telas de TV e monitores, lâmpadas fluorescentes, LEDs e lasers. Além disso, são empregados em vidros especiais, polimento de precisão, baterias recarregáveis de níquel-hidreto metálico (Ni-MH) e em diversas aplicações biomédicas, como agentes de contraste em ressonância magnética (MRI) e sondas espectroscópicas (Martins & Isolani, 2005; Serra, Lima & Sousa Filho, 2015). A demanda por ETRs cresce exponencialmente, impulsionada pela transição energética e pela digitalização da economia global (Francisco, 2025).

Os métodos convencionais de extração de ETRs da natureza envolvem mineração a céu aberto ou subterrânea, seguida por processos de beneficiamento que incluem britagem, moagem e flotação para concentrar os minerais (Santos & Panossian, 2017). Posteriormente, são empregadas técnicas hidrometalúrgicas, como a lixiviação ácida ou alcalina, para dissolver os ETRs do concentrado. A extração por solventes, um processo que envolve várias etapas e consome grandes volumes de reagentes e água, é comumente adotada para separar e purificar os elementos individuais (Vo et al., 2024). Esses métodos demandam alto consumo de energia, geram grandes quantidades de resíduos e efluentes ácidos ou radioativos, acarretando impactos ambientais significativos, como contaminação do solo e da água, desmatamento e emissões de gases de efeito estufa (Vo et al., 2024). A mineração urbana, que visa recuperar ETRs de resíduos eletrônicos (*e-waste*), é uma alternativa promissora para mitigar a exploração das reservas naturais e diminuir o impacto ambiental da mineração primária (Jones & Vasconcelos, 2025). Entretanto, a complexidade da composição do e-waste e a necessidade de processos eficientes ainda representam desafios.

Considerando os crescentes desafios ambientais e a necessidade de processos mais sustentáveis para a recuperação de ETRs, a biorremediação e a biomineração (ou biomining) emergem como alternativas promissoras (Vo et al., 2024). O emprego de microrganismos e biomoléculas oferece a possibilidade de processos mais limpos, eficientes e com menor impacto ambiental. Estudos recentes têm explorado a capacidade de bactérias, fungos e microalgas em adsorver, acumular ou lixiviar ETRs de diversas fontes, incluindo minérios de baixo teor, resíduos de mineração e cinzas de carvão (Bayarsaikhan et al., 2025; Hussain, Dwivedi & Kwon, 2024; Vítová & Mezricky, 2024).

Neste contexto, o presente capítulo de revisão tem como objetivo principal explorar os mecanismos, estratégias e perspectivas sustentáveis para a biorremediação e recuperação de ETRs por bactérias, algas e plantas.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente capítulo caracteriza-se como uma revisão de literatura narrativa, elaborada a partir da busca, seleção e análise crítica de estudos relacionados aos mecanismos, estratégias e perspectivas sustentáveis de biorremediação de elementos das terras raras (ETRs). As buscas foram realizadas nas bases de dados Google Scholar, Scopus, Web of Science e ScienceDirect.

Como critérios de inclusão, foram selecionados artigos científicos, livros, capítulos de livros e documentos técnicos que abordassem métodos biológicos de remediação, recuperação ou bioacumulação de ETRs, publicados preferencialmente nos últimos 5 anos. Estudos publicados há mais de 5 anos considerados clássicos e/ou relevantes para o entendimento dos mecanismos fundamentais, também foram incorporados quando necessário. Foram considerados 78 artigos científicos, 4 capítulos de livro, 1 livro e 1 dissertação, totalizando 84 referências ou fontes de informação, das quais, cerca de 75 % foram publicadas período de 2020 a 2025. Na Tabela 1, a seguir, é apresentada a distribuição das fontes citadas por base de dados. Os percentuais apresentados na Tabela 1 não são aditivos, pois há sobreposição entre bases, ou seja, um mesmo artigo pode estar em Scopus, Web of Science e ScienceDirect simultaneamente.

Tabela 1. Distribuição das fontes citadas na seção “Resultados e Discussão” por base de dados.

Base de Dados/Plataforma	Número de Fontes	Percentual (%)	Observações Técnicas
Scopus	79	94	Base de indexação predominante, a qual inclui praticamente todos os artigos científicos internacionais citados.
Web of Science	66	79	Forte sobreposição com Scopus.
ScienceDirect	41	49	Plataforma editorial Elsevier (não é base de indexação propriamente dita).
Google Scholar	5	6	Fontes complementares: capítulos técnicos, periódicos nacionais e uma dissertação

Após a triagem inicial, o material selecionado foi organizado por tipo de organismo (bactérias, algas e plantas) e por mecanismo de remediação. Os critérios de seleção adotados não tiveram como objetivo a condução de uma revisão sistemática, mas sim a organização crítica e comparativa da literatura relevante. A inclusão das fontes considerou a pertinência temática, a disponibilidade de dados experimentais e a clareza na descrição do organismo e do mecanismo de remediação, priorizando estudos publicados em periódicos científicos indexados ou em fontes técnicas reconhecidas. As informações foram sintetizadas e comparadas, dando origem às tabelas apresentadas neste capítulo, que agrupam dados sobre eficiência de remoção, condições experimentais e características dos organismos utilizados. Não foram realizados experimentos laboratoriais, e todas as informações apresentadas derivam exclusivamente das fontes consultadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Biorremediação de elementos das terras-raras

A extração de ETRs por métodos tradicionais envolve múltiplos processos que, embora permitam sua obtenção, podem gerar impactos significativos ao meio ambiente e à saúde humana. A contaminação decorrente desses procedimentos constitui um dos principais gargalos para a exploração sustentável desses elementos. Nesse contexto, a biorremediação tem despertado interesse como uma alternativa ambientalmente amigável, capaz de viabilizar a recuperação de ETRs por meio da biomineralização e participar do tratamento de áreas ou resíduos contaminados.

Atualmente, cresce o interesse científico pelo uso de microrganismos como agentes biológicos na biorremediação de ambientes contaminados. Entre eles, destacam-se as espécies capazes de oxidar ferro e enxofre, amplamente empregadas na recuperação e remoção de metais presentes em diferentes tipos de poluentes (Rasoulnia et al., 2021).

O processo de adsorção por microrganismos representa uma abordagem ambientalmente sustentável para a recuperação de metais. Os microrganismos produzem biomoléculas, que contêm grupos funcionais (como carboxilatos e fosfatos) na parede celular. A eficiência da adsorção pode estar diretamente relacionada à densidade celular empregada, pois a quantidade de células bacterianas influencia não apenas a capacidade de adsorção inicial, mas também a recuperação subsequente dos ETRs do material tratado (Park et al., 2020).

A literatura registra o uso de bioissorventes, como bactérias e algas, além de plantas em processos de fitorremediação, os quais se destacam como estratégias economicamente viáveis e sustentáveis para a biorremediação e biomineralização de ETRs (Goecke et al., 2015; Giese, 2020; Liu et al., 2021).

Bioissorção

O termo bioissorção se refere a imobilização de íons metálicos, radioisótopos ou ETRs por meio da ligação passiva destas espécies químicas à biomassa ativa ou inativa. Ao se empregar biomassa inativa,

a interação íon-biomassa é baseada nas propriedades químicas do biossorvente e não em sua atividade biológica (Nascimento et al., 2023).

A remoção/recuperação de ETRs via processo de biossorção, cujo princípio é o emprego de biomassa ou de moléculas biológicas para adsorção de ETRs, vem ganhando espaço, devido ao baixo custo, grande eficiência e baixa produção de resíduos (Brown et al., 2023) em comparação com processos tradicionais, tais como, extração por solvente (Brown et al., 2023), troca iônica (Felipe et al., 2021), coprecipitação (Zhao et al., 2016), cristalização (Yin et al., 2017) e adsorção Asadollahzadeh, Torkaman & Torab-Mostaedi, 2021).

A extração de ETRs utilizando solvente implica na geração de resíduos secundários, demandando a adoção de medidas para o tratamento de tais resíduos (Gkika, Chalaris & Kyzas, 2024). Quanto ao emprego de processos de adsorção, atualmente a quantidade de adsorventes utilizados para tal finalidade é ampla. Há relatos na literatura a respeito do uso de gel de sílica (Masoud et al., 2025), carvão ativado derivado de vagem de soja (Pinheiro et al., 2023), nanotubos de carbono (Gupta & Sengupta, 2017), polímeros hiper-reticulados porosos (Han et al., 2022) e bionanopartículas derivadas de bactérias (Yan et al., 2023), para a separação de ETRs de minérios e soluções residuais.

Moléculas presentes em revestimentos celulares, como polissacarídeos, glicoproteínas e lipídios, podem atuar para captação de ETRs, pois apresentam grupos funcionais carboxil, amina, sulfidril, fosfato e hidroxil, entre outros (Giese et al., 2016). Um estudo revelou que a pectina é o principal sítio de ligação de ETRs nas paredes celulares de *Phytolacca americana*, representando até 48,1 % dos elementos ligados. A remoção da pectina reduziu significativamente a adsorção desses elementos, evidenciando seu papel central na fixação. Grupos funcionais hidroxila (-OH) e carboxila (-COOH) foram os principais responsáveis pela interação com íons de ETRs. Os autores observaram fracionamento seletivo, com enriquecimento de elementos das terras raras pesados (ETRPs) nas raízes e leves (ETRLs) nas folhas, além de modificações na composição da parede celular sob estresse, indicando um mecanismo adaptativo de adsorção e fixação seletiva de ETRs (Guo et al., 2023).

A quitosana é um polissacarídeo, que apresenta grupamentos amina, acetamido e hidroxila, responsáveis por interagir com íons metálicos. Pesquisadores utilizaram nanopó de sílica (SiO₂) combinado a um bionanocompósito hidrogel à base de quitosana (SCB-hidrogel) para remover lantanídeos de águas residuais. O SCB-hidrogel apresentou eficiência de adsorção de até 99 % a partir de águas residuais diluídas. O processo de adsorção seguiu o modelo de Langmuir e foi descrito por uma cinética de pseudo-segunda ordem, indicando alta afinidade e estabilidade na remoção dos íons de lantanídeos (Sethy, Biswal & Sahoo, 2023).

A distribuição dos sítios de ligação na superfície do biossorvente é o fator principal para o processo de adsorção (Osman et al., 2023). Sabendo-se que a adsorção é um fenômeno que ocorre na superfície, um biossorvente que apresente área de superfície maior, favorece a adsorção do elemento

alvo, devido a maior área com a qual os elementos serão capazes de interagir com o adsorvente (Gupta et al., 2019).

A forma como os poros estão distribuídos no bioissorvente determina a facilidade com que os íons metálicos penetram em seu interior. Quando os poros permitem maior difusão, os íons conseguem atravessar a estrutura e se acumular dentro das células do material. Esse processo também depende do tamanho e volume do poro, pois a entrada de íons de ETRs nos poros é viável, quando o tamanho dos poros é maior que o tamanho dos ETRs hidratados (Gupta et al., 2019; Giese, 2020).

A bioissorção apresenta como vantagens, a alta eficiência na remoção de elementos alvos presentes em baixas concentrações em solução; fácil regeneração do bioissorvente para reutilização; potencial para recuperação dos elementos bioisorvidos, visando minimização de resíduos; baixo custo de operação e de obtenção do bioissorvente (Giese, 2020). Ressalta-se que a eficiência da remoção de poluentes por processos de bioissorção é afetada por fatores como o tempo de contato, pH, dose do bioissorvente, temperatura e concentração inicial do poluente. Além disso, a compreensão da composição química do bioissorvente, das características do poluente a ser removido e a compatibilidade entre ambos é essencial para aumentar a eficiência do processo de remediação (Kumar et al., 2024).

Nas seções a seguir são apresentados os resultados de estudos relatados na literatura empregando-se diferentes cepas bacterianas e algas para recuperação/remoção de ETRs de solução, efluentes e resíduos, via mecanismos de bioissorção/bioacumulação. Além dos estudos discutidos diretamente ao longo do texto, as Tabelas 2, 3 e 4 reúnem trabalhos adicionais relevantes sobre bioissorção bacteriana, uso de algas e estratégias de fitorremediação aplicadas à remoção e recuperação de elementos de terras raras. Essas tabelas foram elaboradas com o objetivo de sintetizar resultados experimentais recentes e complementares, permitindo ao leitor uma visão comparativa ampla, sem comprometer a fluidez da discussão textual.

Bactérias

Diversos gêneros bacterianos, como *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, *Enterobacter* e *Micrococcus* sp., têm sido amplamente estudados devido à presença de sítios ativos na parede celular, que favorecem a bioissorção de elementos tóxicos. Os mecanismos de remediação empregados por essas bactérias envolvem principalmente dois processos: a adsorção (ou bioissorção), na qual ocorre a imobilização dos elementos na superfície celular, e a absorção, que corresponde à internalização desses elementos pelas células bacterianas (Sharma, 2021). Na Tabela 2, a seguir, estão reunidos os resultados e as condições experimentais de estudos relacionados a recuperação/remoção de elementos das terras raras de soluções ou efluente, via mecanismo de bioissorção, empregando-se diferentes isolados bacterianos.

Uma aplicação inovadora das bactérias em processos de adsorção envolve o uso de bionanopartículas, constituídas por substâncias poliméricas extracelulares e nanopartículas de ferro sintetizadas por *Bacillus cereus*. Essas bionanopartículas têm sido empregadas para adsorção de ETRs,

apresentando elevada eficiência para remoção de Eu(III) (88 %), Tb(III) (89 %) e Ce(III) (89 %) de águas residuárias oriundas de minas. Além disso, o biomaterial foi utilizado em mais de um ciclo de adsorção, mantendo o percentual de remoção de Eu(III) em 69 % após cinco ciclos consecutivos (Yan et al., 2023).

Tabela 2. Resultados e condições experimentais de estudos relacionados a recuperação/remoção de elementos das terras raras de soluções ou efluente, via mecanismo de biossorção, empregando-se diferentes isolados bacterianos. (Fonte: os autores).

Organismo	ETRs	Material Tratado	Condições	Remoção	Referência
<i>Bacillus licheniformis</i>	Ce ³⁺	Soluções de trabalho de Ce ³⁺ (100 a 600 mg L ⁻¹)	pH 6, 30 °C, a 160 rpm, por 120 min.	38,93 mg g ⁻¹ (massa seca)	Cheng et al., 2022
<i>Escherichia coli</i> Operon <i>pmrCAB</i> + lanthanide-binding tag + Si-tag + dLBT	Tb	Solução contendo 150 µmol L ⁻¹ de Tb ³⁺	pH 6, incubação a 37 °C, a 200 rpm por até 120 min.	41,9 mg g ⁻¹ (massa seca)	Xie et al., 2022
<i>Serratia marcescens</i>	Eu ³⁺	Solução de Eu ³⁺ 30 mg·L ⁻¹	pH 5, 25 °C, por 120 min.	115,36 mg·g ⁻¹	Shen et al., 2021
<i>Bacillus subtilis</i> PS4150	Tb ³⁺	Solução de Tb ³⁺ 100 µmol·L ⁻¹	pH 7,5; 5 a 45 °C.	94,7 %	Dong et al., 2022
<i>Magnetospirillum magneticum</i> AMB-1	La ³⁺	Solução de La ³⁺ 100 mg L ⁻¹	pH 6, por 8 min.	37,2 mg g ⁻¹ (massa seca)	Mohammadi et al., 2022
<i>Bacillus</i> sp.	La ³⁺ , Sm ³⁺ , Y ³⁺ , Nd ³⁺ , Er ³⁺	Solução contendo La ³⁺ , Sm ³⁺ , Y ³⁺ , Nd ³⁺ e Er ³⁺ (100 mg L ⁻¹)	pH 8, 50 °C, 200 rpm.	94–95 %	Zhou et al., 2024
BC @FeNPs-EPS (Bionanopartículas combinadas a substâncias poliméricas extracelulares e nanopartículas de ferro sintetizadas via <i>Bacillus cereus</i>)	Eu ³⁺	Efluente de mineração, coletado em Longyan, China, contendo Eu ³⁺ a 1,640 mg·L ⁻¹	pH 5, 30°C, a 200 rpm, por 4 h.	88 %	Yan et al., 2023
<i>Pseudomonas psychrotolerans</i>	Y ³⁺	Solução de Y ³⁺ 50 mg L ⁻¹	pH 7, 30 °C, por 24 h.	99,9 %	Zhang et al., 2024

Huan et al. (2025) isolaram uma cepa de *Bacillus* sp. de uma mina de extração de ETRs, a qual apresentou capacidade de adsorção de Tb(III) próxima de 90 %, além de tolerância a concentração letal de 50 % (CL₅₀) de 2,62 mmol L⁻¹ desse íon metálico. Com base em análises de cinética de adsorção, microscopia eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia de energia dispersiva (SEM-EDS) e espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), os autores verificaram que a parede celular bacteriana, rica em fósforo e composta principalmente por ácido teicoico e peptidoglicano,

atua como o principal sítio de adsorção. Grupos funcionais carboxila e amina, presentes na superfície celular, também contribuem para a imobilização dos elementos metálicos.

Em um estudo conduzido com 0,33 g L⁻¹ da biomassa de *Serratia marcescens* e solução contendo ítrio (56,41 mg L⁻¹) a capacidade adsorptiva foi 123,65 mg g⁻¹ em pH 5,5; 169 rpm de agitação, a 25 °C e tempo de contato de 240 min. Além disso, análises de FTIR e espectroscopia de fotoelétrons de raios X indicaram que grupos funcionais da superfície bacteriana, como hidroxila, carboxila e amina, desempenham papel importante na bioadsorção por meio da complexação química (Liang & Shen, 2022).

Algas

Várias espécies de microalgas, incluindo as verdes (*Chlorella vulgaris*, *Desmodesmus quadricauda*, *Euglena gracilis*), e vermelhas, *Galdieria sulfuraria*, são reconhecidas pelo seu papel na biorremediação de metais e, em especial, dos ETRs (Vo et al., 2024). Entre os gêneros mais estudados para remoção de poluentes, destacam-se *Chlorella* e *Scenedesmus*, sendo que as espécies de *Chlorella* correspondem a aproximadamente 28 % das espécies utilizadas em estudos envolvendo o tratamento de águas residuárias (Calatrava, Gonzalez-Ballester & Dubini, 2024).

O interesse pelo uso de microalgas em biorremediação é devido a versatilidade e à capacidade metabólica das microalgas. Esses organismos podem desempenhar múltiplas funções em diferentes ambientes, tornando-os ferramentas promissoras para a remoção de poluentes. Em corpos d'água, por exemplo, as microalgas são capazes de absorver metais pesados, reduzir o excesso de nutrientes e degradar compostos orgânicos contaminantes, além de atuar em processos de bioadsorção, nos quais os poluentes se fixam na superfície celular. As algas destacam-se pela sua versatilidade e emergente papel na biorremediação, contribuindo à degradação de poluentes orgânicos, como pesticidas e hidrocarbonetos, na imobilização de metais pesados, redução de sua mobilidade e toxicidade (Ali, Hassan & El-Sheekh, 2024).

A atuação das microalgas na recuperação dos ETRs em especial, é realizada por diferentes mecanismos, sendo os mais comuns, a adsorção na superfície das células, adsorção por exopolissacarídeos (EPS) e acumulação intracelular, dos quais, os mais efetivos são a acumulação e adsorção intracelular, além da adsorção por EPS (Vo et al., 2024). Na Tabela 3, a seguir, estão reunidos os resultados e as condições experimentais de estudos relacionados a recuperação/remoção de elementos das terras raras empregando-se diferentes gêneros de algas.

O cultivo de *Euglena gracilis* na presença de La³⁺ pode resultar em percentual de remoção desta espécie química superior a 90 %. A presença do La³⁺ estimula a atividade endocítica da alga, permitindo que ela absorva maiores quantidades de nutrientes do meio. Além disso, foi relatado que o tratamento com ETRs aumenta a produtividade e qualidade de biodiesel produzido por *E. gracilis*, tornando todo processo sustentável (Kim et al., 2022).

Em solos contaminados, as microalgas contribuem para a degradação de poluentes orgânicos, como pesticidas e hidrocarbonetos, e ajudam na imobilização de metais pesados, reduzindo sua mobilidade e toxicidade. Assim, o uso de microalgas representa uma estratégia sustentável e eficiente para a recuperação de ecossistemas aquáticos e terrestres impactados por poluição (Ali, Hassan & El-Sheekh, 2024). Alguns ETRs não são facilmente detectáveis em determinados ambientes e por conta disso, sua quantificação é prejudicada. Entretanto, micro e macroalgas possuem habilidade de acumular diversos ETRs (Giese et al., 2016). Tal habilidade não está diretamente ligada a estrutura organizacional da alga (unicelular, filamentosa etc.) e nem a sua origem. Com isso, é possível a utilização de algas para mensurar a abundância dos ETRs presentes em determinado local (Goecke et al., 2015; Giese et al., 2016).

Tabela 3. Resultados e condições experimentais de estudos relacionados a recuperação/remoção de elementos das terras raras empregando-se diferentes gêneros de algas. (Fonte: os autores).

Organismo	ETRs	Material Tratado	Condições	Remoção	Referência
<i>Englena gracilis</i>	La ³⁺	Solução de LaCl ₃	Meio de cultivo, a 28 °C, 150 rpm, no escuro por 96 h.	99,9 %	Kim, Kim, Kim e Choi, 2022
<i>Galdieria sulphuraria</i>	Y e Eu	Extrato de resíduos eletrônicos de lâmpadas fluorescentes no meio de cultura.	Meio de cultivo, pH 3, a 40 °C, fotoperíodo com 16 h de luz e 8 h no escuro por 2 h.	Y: 42 µg g ⁻¹ Eu: 2,7 µg g ⁻¹ (massa seca)	Singh et al., 2023
<i>Galdieria sulphuraria</i>	La ³⁺ , Y ³⁺ e Sm ³⁺	Amostra sintética de águas residuais contendo La, Y e Sm.	Meio de cultivo, a 45 °C, fotoperíodo com 12 h de luz e 12 h no escuro, 150 rpm.	La ³⁺ : 97,9 % Y ³⁺ : 96,6 % Sm ³⁺ : 99,1 %	Sun et al., 2022
<i>Ceramium ciliatum</i>	Sc	Algas coletadas na costa do Mar Negro, na Crimeia.	Condições naturais da costa do Mar Negro, na Crimeia.	1098 µg kg ⁻¹ (massa seca)	Ryabushko et al., 2024
<i>Galdieria sulfuraria</i> ACUF 427	Y ³⁺	Solução de Y ³⁺	A 37 °C, por 24 h.	22,43 µmol g ⁻¹ (massa seca)	Iovinella et al., 2022
<i>Ulva</i> sp.	Y	Solução de Y	A 20 °C, pH 7,8; fotoperíodo com 12 h de luz e 12 h no escuro.	86 %	Viana et al., 2025
<i>Galdieria sulphuraria</i>	Ce, Nd, La e Y	Meio de cultivo enriquecido com lama vermelha (resíduo gerado na produção de alumínio)	Meio de cultivo, pH 3, a 40 °C, 500 µmol fótons m ⁻² s ⁻¹ e aeração com ar + 2 % de CO ₂ . Culturas autotróficas ou mixotróficas (1 % glicerol) sincronizadas por ciclos claro/escuro.	Ce: 26 µg g ⁻¹ La: 15 µg g ⁻¹ Nd: 11 µg g ⁻¹ Y: 11 µg g ⁻¹ (massa seca)	Náhlík et al., 2023

O tratamento da biomassa de *Posidonia oceanica* com 1-(2-piridilazo)-2-naftol (PAN) resultou em capacidade máxima de adsorção de Sc^{3+} de 66,81 mg g⁻¹, em pH 5, a 20 °C, tempo de contato de 24 h e de 1 g L⁻¹ da biomassa (Ramasamy et al., 2019). Resultados promissores também foram relatados para a alga *Turbinaria conoides*, em ensaios realizados em pH 4,9 e tempo de contato de 50 min. Nestas condições, as capacidades de bioadsorção de La, Ce, Eu e Yb foram, respectivamente: 154,7; 152,8; 138,2 e 121,0 mg g⁻¹. Além disso, os pesquisadores observaram que a biomassa pôde ser reutilizada por até três ciclos após lavagem com ácido clorídrico 0,05 mol L⁻¹, demonstrando a viabilidade de um processo no qual é empregado um adsorvente renovável e sustentável (Vijayaraghavan et al., 2010).

A presença de ETRs como ítrio, lantânio, cério, európio, gadolínio e térbio foi detectada por Čížková et al. (2021) em resíduos de lâmpadas fluorescentes e lâmpadas econômicas. Os pesquisadores cultivaram a microalga *Galdieria phlegrea* em meios contendo ETRs derivados dessas lâmpadas, visando avaliar o potencial desta microalga para bioacumulação dos ETRs. A microalga acumulou 13,01 mg g⁻¹ de ETRs quando exposta a resíduos provenientes de lâmpadas econômicas, e 3,01 mg g⁻¹ quando lâmpadas fluorescentes foram as fontes de contaminação, demonstrando sua capacidade para absorção destes elementos.

A alga *Ulva lactuca* removeu cerca de 70 a 80 % do ítrio presente em solução após 72 h de contato, restando apenas entre 20 a 30 % do metal no meio. Em contraste, em ensaios realizados com a alga *Gracilaria* sp., a quantidade residual de ítrio permaneceu entre 50 e 65 %. Além disso, *U. lactuca* apresentou alta eficiência na remoção de outros ETRs, enquanto *Gracilaria* sp. se destacou especificamente na remoção de lantânio, cério e praseodímio (Pinto et al., 2020).

Embora diferentes organismos possam atuar na adsorção de ETRs, a eficiência desse processo depende da composição do meio. Nesse sentido, Bergsten-Torrallba et al. (2020) observaram que a alga *Chlamydomonas reinhardtii* foi capaz de adsorver Sm^{3+} , porém a presença de outros lantanídeos, como La, Ce e Eu, diminuiu a adsorção de Sm^{3+} . De forma complementar, Minoda et al. (2015) constataram que a alga *Galdieria sulphuraria*, quando exposta a um meio contendo diversos metais, em pH 2,5, apresentou seletividade na recuperação de determinados íons de lantanídeos da água. Esses resultados, evidenciam que a capacidade de bioadsorção de ETRs por algas pode variar não apenas entre espécies, mas também em função da composição iônica do ambiente, destacando a importância de compreender os mecanismos de seletividade e competição entre íons metálicos.

Fitorremediação

Atualmente, entre as principais técnicas sustentáveis de remediação, tem-se a fitorremediação que se baseia na utilização de plantas para remoção, imobilização ou transformação de poluentes em espécies químicas menos tóxicas. A utilização de plantas para recuperar áreas com concentrações altas de poluentes, vem ganhando destaque, tendo em vista que este método pode melhorar as características

físicas, químicas e biológicas do solo, da área em que foi empregada vegetação para descontaminação (Wang & Delavar, 2023).

A técnica de fitodegradação consiste na absorção de contaminantes pela planta, que os decompõe em produtos menos tóxicos. A planta absorve os contaminantes e faz a bioconversão, que pode ocorrer no seu interior ou na parte externa da planta. Essa técnica é utilizada para restaurar áreas contaminadas, sendo uma opção ecologicamente viável (Wang & Delavar, 2023).

No contexto da fitorremediação, a fitoextração ou fitoacumulação se baseia no crescimento e colheita de plantas hiperacumuladoras que armazenam altas concentrações de elementos químicos em seus órgãos e tecidos (Liu et al., 2022). Por meio das plantas, no ambiente da rizosfera, ocorre a rizorremediação, em que as bactérias ali presentes atuam na reconstituição dos solos (Balint & Boajă, 2024). Na Tabela 3, são apresentados alguns gêneros de plantas capazes de realizar a fitorremediação de ETRs.

A fitoestabilização consiste na utilização de plantas com potencial para diminuir a mobilidade e a biodisponibilidade dos contaminantes presentes no solo, por meio do seu acúmulo, adsorção e/ou absorção (Tayyab et al., 2024). Em contrapartida, na fitovolatilização empregam-se plantas que retiram os contaminantes do solo, e em seguida, através de processos metabólicos, os transformam em espécies químicas voláteis que são liberadas na atmosfera (Alliluev et al., 2025).

Em ensaios conduzidos com a cultura do azevém (*Lolium perenne*), inoculada com a bactéria *Methylobacterium extorquens*, a planta foi capaz de bioacumular até 705 μg de Ce g^{-1} e 19.641 μg de Nd g^{-1} de planta seca. Análises de microscopia eletrônica de varredura acoplada a espectroscopia de raios X (SEM-EDS) confirmaram a presença de Nd tanto na superfície quanto no interior das células radiculares, evidenciando a bioacumulação e a absorção intracelular deste ETR. Em relação ao papel das bactérias na fitoextração, observou-se que *Bacillus subtilis* foi mais abundante do que *M. extorquens* nos tratamentos controle, além de estar associada a uma extração de Ce 52 % maior em plantas com microrganismos nativos e 14 % maior em plantas esterilizadas. Esses resultados indicam que estimular a microbiota nativa pode ser mais eficaz do que introduzir microrganismos externos para potencializar a fitoextração de ETRs (Soleimanifar & Rodriguez-Freire, 2024).

Um estudo conduzido por Grosjean et al. (2019), utilizando *Phytolacca americana*, *P. acinosa*, *P. bogotensis*, *P. clavigera* e *P. icosandra*, evidenciou padrões diferentes de acúmulo de ETRs nas folhas, sendo que *P. bogotensis* e *P. acinosa* foram as espécies que acumularam as maiores concentrações de ETRs (279 e 261 mg kg^{-1} , respectivamente). As demais espécies estudadas, *P. americana*, *P. clavigera* e *P. icosandra* acumularam concentrações menores de ETRs (174, 157 e 100 mg kg^{-1} , respectivamente).

Segundo Van Der Ent et al. (2021), a planta *Dicranopteris linearis* (espécie de samambaia, conhecida popularmente como samambaia bifurcada) é uma planta hiperacumuladora de ETRs, considerada uma boa alternativa para a fitoextração destes elementos. Altos teores de Nd e Pr (900 e 300 $\mu\text{g g}^{-1}$, respectivamente) foram encontrados em plantas selvagens de *Dicranopteris linearis* coletadas em

uma mina de rejeitos em Ganzhou (província de Jiangxi). Além disso, a *D. linearis* também se mostrou promissora à extração de outros ETRs, como La, Ce e Sm (Chour et al., 2020; Van Der Ent et al., 2021).

A busca por técnicas que tornem a fitoextração mais eficiente tem sido um foco importante em estudos recentes. Mohanty et al. (2023) aplicaram a técnica de raízes transformadas (*hairy roots*) em plantas de *Hybanthus enneaspermus*, obtidas com o auxílio da bactéria *Agrobacterium rhizogenes*, para avaliar a remoção de selênio (Se) e La. As plantas submetidas à técnica de *hairy roots*, quando expostas a 50 ppm destes elementos, acumularam 29,3 mg kg⁻¹ de La e 43,1 mg kg⁻¹ de Se.

A espécie *Pinus massoniana* também foi sugerida como candidata à restauração de solos contaminados com ETRs. Trata-se de uma árvore pioneira da família *Pinaceae*, que tem potencial para se desenvolver em locais contaminados com ETRs (Zhang et al., 2020).

Na Tabela 4, a seguir, estão reunidos os resultados e as condições experimentais de estudos relacionados a fitoextração de elementos das terras raras de solução, solo ou rejeitos de mineração, empregando-se diferentes tipos de plantas.

DESAFIOS FUTUROS

Com o crescente aumento da produção e uso dos ETRs, um dos principais desafios enfrentados pelas indústrias é a separação e recuperação desses elementos, especialmente quando se busca obtê-los em sua forma pura. Atualmente, faltam estudos relacionados às quantidades máximas de ETRs que podem estar presentes no ambiente para que não ocorram danos à saúde humana ou aos ecossistemas. São necessários estudos para verificar os efeitos à saúde humana, aos animais, a fauna e a flora decorrentes da exposição a ETRs. Em função disso, órgãos regulamentadores ainda não definiram normas estabelecendo padrões de qualidade para esses elementos em diferentes compartimentos ambientais.

O apelo por métodos mais sustentáveis de remoção de elementos tóxicos de resíduos e do ambiente tem se intensificado, impulsionando o interesse por processos biológicos que ofereçam vantagens em relação às abordagens tradicionais. Além de serem ambientalmente mais seguros, esses processos podem ainda promover a melhoria da qualidade do solo/água, especialmente quando envolvem o uso de plantas ou microrganismos capazes de remover e, ao mesmo tempo, restaurar suas propriedades.

Estudos de remoção de ETRs aplicando a fitorremediação iniciaram a possibilidade de utilização de plantas alternativas, como a samambaia, como sendo promissoras para extrair esses elementos do solo. Além disso, tais estudos surgiram como base para escolhas futuras de outras espécies vegetais, principalmente aquelas que podem ser utilizadas em áreas de mineração, devido à grande quantidade de ETRs presentes.

Tabela 4. Fitoextração de elementos das terras raras (ETRs) por diferentes tipos de plantas. (Fonte: os autores).

Organismo	ETRs	Material Tratado	Condições	Remoção	Referência
<i>Salix schwerinii</i>	La	Solução mista contendo (mg L ⁻¹): La - 11,50; Y - 11,00 Nd - 10,50; Dy - 10,00; Ce - 12,00 e Tb - 11,50.	Fotoperíodo com 16 h de luz e 8 h no escuro, a 24 °C (dia) e 16 °C (noite), 70 %de umidade relativa.	12,40 µg g ⁻¹ (massa seca das folhas)	Mohsin et al., 2022
<i>Triplernospermum maritimum</i>	La	95 % de solo e 5% lodo de esgoto + resíduos verdes.	Ensaio conduzidos em estufa durante 3 meses.	9 µg kg ⁻¹ (massa seca parte aérea)	Gmur et al., 2025
<i>Festuca arundinacea</i>	Ce	30% de cinzas da indústria de papel, 20 % lodo de esgoto + resíduos verdes e 50 % de turfa ácida.		10 µg kg ⁻¹ (massa seca parte aérea)	
<i>Trifolium pratense</i> L.	La	30% de cinzas da indústria de papel, 20% lodo de esgoto + resíduos verdes e 50 % de turfa ácida.		697 µg kg ⁻¹ (massa seca raízes)	
<i>Dryopteris erythrosora</i>	La	95 % de solo e 5% lodo de esgoto + resíduos verdes.		311 µg kg ⁻¹ (massa seca parte aérea)	
<i>Dryopteris erythrosora</i>	Ce	95 % de solo e 5% lodo de esgoto + resíduos verdes.		497 µg kg ⁻¹ (massa seca parte aérea)	
<i>Dicranopteris linearis</i>	La, Nd, Ce e Pr	Área de mineração.	Plantas coletadas na área de mineração.	La (1,1 mg g ⁻¹), Nd (0,7 mg g ⁻¹), Ce (0,35 mg g ⁻¹) e Pr (0,22 mg g ⁻¹) na biomassa seca.	Jally et al., 2021
<i>Dicranopteris linearis</i>	La, Ce, Pr e Nd	Rejeitos de mineração de elementos.	Plantas coletadas em rejeitos de mineração.	La (1240 mg·kg ⁻¹), Ce (1300 mg·kg ⁻¹), Pr (213 mg·kg ⁻¹) e Nd (680 mg·kg ⁻¹) na biomassa seca	Xie et al., 2023
<i>Chrysopogon zizanioides</i>	Y	Solo de uma região de mineração de ouro.	Câmara de crescimento, umidade de 60 %, 25 °C (dia) e 18 °C (noite), fotoperíodo de 16 h.	6,39 mg kg ⁻¹ (massa seca raiz).	Thomas et al., 2024
<i>Phalaris arundinacea</i>	Ce, La, Nd, Pr, Y	Solo de região de mineração de ETRs.	Estufa mantida entre 18 e 32 °C, com fotoperíodo de 16 h de luz e 8 h no escuro, durante 6 semanas.	27,940 µg g ⁻¹ de ETRs mistos	Richardson et al., 2025

A utilização de algas nos processos de remediação de ETRs também é uma alternativa que ainda possui lacunas que podem ser exploradas no futuro, considerando que a utilização de algas marrons para extração dos ETRs se mostrou promissora. Além disso, outras espécies de microalgas também se mostraram promissoras para o processo de recuperação desses elementos. Assim, estudos utilizando diversas espécies de algas para a remoção e obtenção de ETRs abre um leque de oportunidades pesquisas futuras.

Pesquisas sobre a utilização de microrganismos para remoção/extração de ETRs ainda se encontram em fase inicial de testes, sendo que poucas espécies desses organismos foram avaliadas. Entretanto, os estudos preliminares já demonstraram os benefícios da utilização de microrganismos para remoção de ETRs.

Os itens expostos neste trabalho evidenciam a importância da utilização de métodos sustentáveis para remoção dos ETRs. Com isso, cada vez mais a pesquisa tem papel importante na descoberta dos melhores métodos para remoção de poluentes, de forma que a aplicação desses métodos não contribua para a poluição do ambiente com substâncias secundárias ou subprodutos do tratamento e seja economicamente viável.

De forma geral, os conhecimentos sobre elementos terras-raras são relativamente novos, ainda há várias lacunas que só serão preenchidas a partir da realização de estudos futuros.

CONCLUSÃO

Diante do exposto, torna-se evidente que as atividades de extração e o manejo inadequado de resíduos contendo ETRs podem resultar em contaminação significativa de solos e recursos hídricos. Nesse cenário, a adoção de métodos de remoção eficazes torna-se essencial não apenas para a mitigação dos impactos ambientais, mas também para a recuperação dessas áreas. Embora existam técnicas convencionais de remoção, suas limitações econômicas e ambientais reforçam a necessidade de alternativas mais sustentáveis. Abordagens baseadas no uso de plantas, bactérias e algas mostram-se viáveis e promissoras, permitindo a remoção e a recuperação de ETRs de soluções e resíduos de forma eficiente e ambientalmente adequada. Além disso, essas estratégias possibilitam a recuperação econômica desses elementos, alinhando a remediação ambiental a práticas sustentáveis e ao aproveitamento responsável dos ETRs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, S. S., Hassan, L. H. S., & El-Sheekh, M. (2024). Microalgae-mediated bioremediation: current trends and opportunities—a review. *Archives of Microbiology*, 206(8), 343. <https://doi.org/10.1007/s00203-024-04052-x>
- Alliluev, I., Minkina, T., Ahmad, I., Mandzhieva, S., Chernikova, N., Chaplygin, V., Vechkanov, E., Rajput, V. D., & Wong, M. H. (2025). Phytoremediation of heavy metal-contaminated sites:

- mechanisms, limitations and recent prospects. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 1–21. <https://doi.org/10.1007/s12298-025-01660-9>
- Asadollahzadeh, M., Torkaman, R., & Torab-Mostaedi, M. (2021). Extraction and separation of rare earth elements by adsorption approaches: current status and future trends. *Separation & Purification Reviews*, 50(4), 417–444. <https://doi.org/10.1080/15422119.2020.1792930>
- Balint, R., & Boajă, I. P. (2024). Assisted phytoextraction as a nature-based solution for the sustainable remediation of metal(loid)-contaminated soils. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 20(6), 2003–2022. <https://doi.org/10.1002/ieam.4907>
- Bayarsaikhan, B., Amarsanaa, A., Daramjav, P., Batchuluun, S., Damdindorj, L., Ni He, Zhao, H., & Davaasambu, S. (2025). Enhanced recovery of rare earth elements from carbonatite ore by biological pretreatment. *RSC Advances*, 15, 4628. <https://doi.org/10.1039/d4ra07845d>
- Bergsten-Torralba, L., Magalhães, D. P., Giese, E. C., Nascimento, C. R. S., Pinho, J. V. A., & Buss, D. F. (2020). Toxicity of three rare earth elements, and their combinations to algae, microcrustaceans, and fungi. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 201, 110795. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110795>
- Brown, R. M., Mirkouei, A., Reed, D., & Thompson, V. (2023). Current nature-based biological practices for rare earth elements extraction and recovery: Bioleaching and biosorption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173, 113099. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113099>
- Calatrava, V., Gonzalez-Ballester, D., & Dubini, A. (2024). Microalgae for bioremediation: advances, challenges, and public perception on genetic engineering. *BMC Plant Biology*, 24(1), 1261. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05995-5>
- Cheng, Y., Zhang, T., Zhang, L., Ke, Z., Kovarik, L., & Dong, H. (2022). Resource recovery: adsorption and biomineralization of cerium by *Bacillus licheniformis*. *Journal of Hazardous Materials*, 426, 127844. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127844>
- Chour, Z., Laubie, B., Morel, J. L., Tang, Y.-T., Simonnot, M.-O., & Muhr, L. (2020). Basis for a new process for producing REE oxides from *Dicranopteris linearis*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 103961. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103961>
- Čížková, M., Mezricky, P., Mezricky, D., Rucki, M., Zachleder, V., & Vítová, M. (2021). Bioaccumulation of rare earth elements from waste luminophores in the red algae *Galdieria phlegrea*. *Waste and Biomass Valorization*, 12(6), 3137–3146. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01182-3>
- Dong, W., Wang, H., Ning, Z., Hu, K., & Luo, X. (2022). Bioadsorption of terbium(III) by spores of *Bacillus subtilis*. *Minerals*, 12(7), 866. <https://doi.org/10.3390/min12070866>
- Felipe, E. C. B., Batista, K. A., & Ladeira, A. C. Q. (2021). Recovery of rare earth elements from acid mine drainage by ion exchange. *Environmental Technology*, 42(17), 2721–2732. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1713219>

- Giese, E. C. (2020). Biosorption as green technology for the recovery and separation of rare earth elements. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36(4), 52. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02821-6>
- Giese, E. C., Magalhães, D. P., & Egler, S. C. (2016). Bioissorção de elementos de terras-raras. *Série Tecnologia Mineral*, 90, CETEM/MCTIC. <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2040/1/sta-90.pdf>
- Gkika, D. A., Chalaris, M., & Kyzas, G. Z. (2024). Review of methods for obtaining rare earth elements from recycling and their impact on the environment and human health. *Processes*, 12(6), 1235. <https://doi.org/10.3390/pr12061235>
- Gmur, D., Siebielec, G., & Pecio, M. (2025). Differences in accumulation of rare earth elements by plants cultivated in soil and substrates from industrial waste materials. *Plants*, 14(4), 589. <https://doi.org/10.3390/plants14040589>
- Goecke, F., Zachleder, V., & Vítová, M. (2015). Rare earth elements and algae: physiological effects, biorefinery and recycling. In *Algal Biorefineries* (pp. 339–363). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20200-6_10
- Goecke, F., Zachleder, V., & Vítová, M. (2015). Rare earth elements and algae: physiological effects, biorefinery and recycling. In *Algal Biorefineries* (pp. 339–363). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20200-6_10
- Grosjean, N., Jean, M. L., Berthelot, C., Chalot, M., Gross, E. M., & Blaudez, D. (2019). Accumulation and fractionation of rare earth elements are conserved traits in the *Phytolacca* genus. *Scientific Reports*, 9(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54238-3>
- Guo, Y., Chen, K., Lei, S., Gao, Y., Yan, S., & Yuan, M. (2023). Rare earth elements (REEs) adsorption and detoxification mechanisms in cell wall polysaccharides of *Phytolacca americana* L. *Plants*, 12(10), 1981. <https://doi.org/10.3390/plants12101981>
- Gupta, N. K., & Sengupta, A. (2017). Understanding the sorption behavior of trivalent lanthanides on amide functionalized multi walled carbon nanotubes. *Hydrometallurgy*, 171, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.03.016>
- Gupta, N. K., Gupta, A., Ramteke, P., Sahoo, H., & Sengupta, A. (2019). Biosorption—a green method for the preconcentration of rare earth elements (REEs) from waste solutions: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 274, 148–164. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.134>
- Han, L., Peng, Y., Ma, J., Shi, Z., & Jia, Q. (2022). Construction of hypercrosslinked polymers with styrene-based copolymer precursor for adsorption of rare earth elements. *Separation and Purification Technology*, 285, 120378. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120378>
- Huang, H., Pan, K., Jian, W., She, Y., Esumeh, C. O., & Dong, W. (2025). Determination of the mechanisms of terbium (III) biosorption by *Bacillus* strains with adsorption selectivity for heavy

rare earth elements. *Microorganisms*, 13(8), 1753.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms13081753>

- Iovinella, M., Lombardo, F., Ciniglia, C., Palmieri, M., Di Cicco, M. R., Trifuoggi, M., Race, M., Manfredi, C., Lubritto, C., Fabbicino, M., Stefano, M., & Davis, S. J. (2022). Bioremoval of yttrium (III), cerium (III), europium (III), and terbium (III) from single and quaternary aqueous solutions using the extremophile *Galdieria sulphuraria* (*Galdieriaceae*, *Rhodophyta*). *Plants*, 11(10), 1376. <https://doi.org/10.3390/plants11101376>
- Francisco, M. A. S. (2025). A geopolítica das terras-raras. *Ciência Hoje*, 1-18. <https://cienciahoje.org.br/artigo/a-geopolitica-das-terras-raras/>
- Hussain, Z., Dwivedi, D., & Kwon, I. (2024). Recovery of rare earth elements from low-grade coal fly ash using a recyclable protein biosorbent. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1385845>
- Jally, B., Laubie, B., Chour, Z., Muhr, L., Qiu, R., Morel, J. L., Tan, Y., & Simonnot, M. O. (2021). A new method for recovering rare earth elements from the hyperaccumulating fern *Dicranopteris linearis* from China. *Minerals Engineering*, 166, 106879. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106879>
- Jones, F., & Vasconcelos, Y. (2025). Mineração urbana. *PESQUISA FAPESP*, 356, 19-21, 2025.
- Kim, J. Y., Kim, K. Y., Kim, S. M., & Choi, Y. E. (2022). Use of rare earth element (REE)-contaminated acidic water as *Euglena gracilis* growth stimulator: a strategy for bioremediation and simultaneous increase in biodiesel productivity. *Chemical Engineering Journal*, 445, 136814. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136814>
- Liang, C., & Shen, J. (2022). Removal of yttrium from rare-earth wastewater by *Serratia marcescens*: biosorption optimization and mechanisms studies. *Scientific Reports*, 12(1), 4861. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08542-0>
- Liu, C., Liu, W., Huot, H., Yang, Y., Guo, M., Morel, J. L., Tang, Y., & Qiu, R. (2022). Responses of ramie (*Boehmeria nivea* L.) to increasing rare earth element (REE) concentrations in a hydroponic system. *Journal of Rare Earths*, 40(5), 840–846. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2021.04.002>
- Martins, T. S., & Isolani, P. C. (2005). Terras raras: aplicações industriais e biológicas. *Química Nova*, 28(1), 111-117.
- Masoud, A. M., Ammar, H., Elzoghby, A. A., El Agamy, H. H., & Taha, M. H. (2025). Rare earth elements adsorption from phosphoric acid solution using dendrimer modified silica gel as well as kinetic, isotherm, and thermodynamic studies. *Journal of Rare Earths*, 43(7), 1502–1512. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2024.06.012>
- Minoda, A., Sawada, H., Suzuki, S., Miyashita, S., Inagaki, K., Yamamoto, T., & Tsuzuki, M. (2015). Recovery of rare earth elements from the sulfothermophilic red alga *Galdieria sulphuraria* using aqueous acid. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99(3), 1513–1519. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-6070-3>

- Mohammadi, M., Reinicke, B., & Wawrousek, K. (2022). Biosorption and biomagnetic recovery of La^{3+} by *Magnetospirillum magneticum* AMB-1 biomass. Separation and Purification Technology, 303, 122140. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122140>
- Mohanty, R., Nayak, M., Sekar, T., & Thirunavoukkarasu, M. (2023). Adsorption of selenium and lanthanum by Agrobacterium-mediated hairy roots of *Hybanthus enneaspermus* (L.) F. Muell: a greener phytoremediation strategy. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 110(2), 54.
- Mohsin, M., Salam, M. M. A., Nawrot, N., Kaipainen, E., Lane, D. J., Wojciechowska, E., Kinnunen, N., Heimonen, M., Tervahauta, A., Peräniemi, S., Sippula, O., Pappinen, A., & Kuittinen, S. (2022). Phytoextraction and recovery of rare earth elements using willow (*Salix* spp.). Science of the Total Environment, 809, 152209. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152209>
- Náhlík, V., Čížková, M., Singh, A., Mezricky, D., Rucki, M., Andresen, E., & Vítová, M. (2023). Growth of the red alga *Galdieria sulphuraria* in red mud-containing medium and accumulation of rare earth elements. Waste and Biomass Valorization, 14(7), 2179-2189. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-02021-3>
- Nascimento, J. M. D., Otaviano, J. J. S., Sousa, H. S. D., & Oliveira, J. D. D. (2023). Biological method of heavy metal management: Biosorption and bioaccumulation. In Heavy Metals in the Environment: Management Strategies for Global Pollution (pp. 315–360). <https://doi.org/10.1021/bk-2023-1456.ch016>
- Osman, A. I., El-Monaem, E. M. A., Elgarahy, A. M., Aniagor, C. O., Hosny, M., Farghali, M., Rashad, E., Ejimofor, M. I., López-Maldonado, E. A., Ihara, I., Yap, P., Rooney, D. W., & Eltaweil, A. S (2023). Methods to prepare biosorbents and magnetic sorbents for water treatment: a review. Environmental Chemistry Letters, 21(4), 2337–2398. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01603-4>
- Park, D., Middleton, A., Smith, R., Deblonde, G., Laudal, D., Theaker, N., Kim-Hsu, H., & Jiao, Y. (2020). A biosorption-based approach for selective extraction of rare earth elements from coal byproducts. Separation and Purification Technology, 241, 116726. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116726>
- Pavon, S., Haneklaus, N., Meerbach, K., & Bertau, M. (2022). Iron(III) removal and rare earth element recovery from a synthetic wet phosphoric acid solution using solvent extraction. Minerals Engineering, 182, 107569. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107569>
- Pinheiro, R. F., Grimm, A., Oliveira, M. L., Vieillard, J., Silva, L. F., De Brum, I. A., Lima, E. C., Naushad, M., Sellaoui, L., Dotto, G. L., & dos Reis, G. S. (2023). Adsorptive behavior of the rare earth elements Ce and La on a soybean pod derived activated carbon: application in synthetic solutions, real leachate and mechanistic insights by statistical physics modeling. Chemical Engineering Journal, 471, 144484. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144484>

- Pinto, J., Henriques, B., Soares, J., Costa, M., Dias, M., Fabre, E., Lopes, C. B., Vale, C., Pinheiro-Torres, J., & Pereira, E. (2020). A green method based on living macroalgae for the removal of rare-earth elements from contaminated waters. *Journal of Environmental Management*, 263, 110376. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110376>
- Porto, P. A., & Queiroz, S. L. (2025). Terras Raras. *Química Nova na Escola*, 47(3), 213-214. <http://dx.doi.org/10.21577/0104-8899.20160469>
- Ramasamy, D. L., Porada, S., & Sillanpää, M. (2019). Marine algae: A promising resource for the selective recovery of scandium and rare earth elements from aqueous systems. *Chemical Engineering Journal*, 371, 759–768. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.106>
- Rasoulnia, P., Barthen, R., & Lakaniemi, A.-M. (2021). A critical review of bioleaching of rare earth elements: The mechanisms and effect of process parameters. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(4), 378–427. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1727718>
- Richardson, K., Mirkouei, A., Duellman, K., Aylward, A., Zirker, D., Schwarz, E., & Sun, Y. (2025). Extraction of rare earth elements from Idaho-sourced soil through phytomining: A case study in central Idaho, USA. *Sustainability*, 17(11), 5118. <https://doi.org/10.3390/su17115118>
- Ryabushko, V. I., Gureeva, E. V., Kapranov, S. V., Simokon, M. V., & Bobko, N. I. (2024). Rare earth elements in the red, brown, green algae and the seagrass from Kazachya Bay (Crimea, Black Sea). *Regional Studies in Marine Science*, 69, 103318. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103318>
- Santos, C. A. L., & Panossian, Z. (2017). Revisão bibliográfica sobre metais de terras raras. *Revista IPT|Tecnologia e Inovação*, 1(4), 6-19.
- Serra, O. A., Lima, J. F., & de Sousa Filho, P. C. (2015). A Luz e as Terras Raras. *Revista Virtual de Química*, 7(1), 242-264. <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20150012>
- Sethy, T. R., Biswal, T., & Sahoo, P. K. (2023). An indigenous tool for the adsorption of rare earth metal ions from the spent magnet e-waste: An eco-friendly chitosan biopolymer nanocomposite hydrogel. *Separation and Purification Technology*, 309, 122935. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122935>
- Sharma, P. (2021). Efficiency of bacteria and bacterial assisted phytoremediation of heavy metals: An update. *Bioresource Technology*, (article) 124835. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124835>
- Shen, J., Liang, C., Zhong, J., Xiao, M., Zhou, J., Liu, J., Liu, J., & Ren, S. (2021). Adsorption behavior and mechanism of *Serratia marcescens* for Eu(III) in rare earth wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(40), 56915–56926. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14668-x>
- Singh, A., Čížková, M., Náhlík, V., Mezricky, D., Schild, D., Rucki, M., & Vítová, M. (2023). Bio-removal of rare earth elements from hazardous industrial waste of CFL bulbs by the extremophile red alga *Galdieria sulphuraria*. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1130848. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1130848>

- Soleimanifar, M., & Rodriguez-Freire, L. (2024). Cerium oxide and neodymium oxide phytoextraction by ryegrass in bioenhanced hydroponic environments. *Environmental Pollution*, 349, 123978. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123978>
- Sousa Filho, P. C., Galvão, A. R. B. S., & Serra, O. A. (2019). Terras raras: tabela periódica, descobrimento, exploração no brasil e aplicações. *Química Nova*, 42(10), 1208-1224. <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170438>
- Sousa Filho, P. C., & Serra, O. A. (2014). Terras raras no brasil: histórico, produção e perspectivas. *Química Nova*, 37(4), 753-760. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20140121>
- Sun, Y., Lu, T., Pan, Y., Shi, M., Ding, D., Ma, Z., Liu, J., Yuan, Y., Fei, L., & Sun, Y. (2022). Recovering rare earth elements via immobilized red algae from ammonium-rich wastewater. *Environmental Science and Ecotechnology*, 12, 100204. <https://doi.org/10.1016/j.esec.2022.100204>
- Tayyab, Q. A., Hameed, H., Mohiuddin, M., Mukhtar, A., Shafiq, U., Majeed, A., Nazli, F., Ameen, M., Khan, M. A., Sarwar, M. T., Ali, A., Tahir, H. A. S., Abdullah, M., & Asghar, T. (2024). Metal-tolerant rhizobacteria mediated phytostabilization of heavy metal-contaminated soil: A review. *Plant and Environment*, 5(01). <https://doi.org/10.54219/plantenviro.05.01.2024.289>
- Thomas, G., Sheridan, C., & Holm, P. E. (2024). Co-cropping vetiver grass and legume for the phytoremediation of an acid mine drainage (AMD) impacted soil. *Environmental Pollution*, 341, 122873. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122873>
- Van der Ent, A., Echevarria, G., Baker, A. J. M., & Morel, J. L. (2018). *Agromining: Farming for metals: Extracting unconventional resources using plants (Mineral Resource Reviews)*. Springer International Publishing. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-61899-9>
- Viana, T., Colónia, J., Tavares, D. S., Andrade, M., Ferreira, N., Freitas, R., Pereira, E., & Henriques, B. (2025). Uptake and Effects of Yttrium on the Seaweed *Ulva* sp.: A Study on the Potential Risks of Rare Earth Elements in Aquatic Environments. *Water*, 17(20), 3023. <https://doi.org/10.3390/w17203023>
- Vijayaraghavan, K., Sathishkumar, M., & Balasubramanian, R. (2010). Biosorption of lanthanum, cerium, europium, and ytterbium by a brown marine alga, *Turbinaria conoides*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(9), 4405–4411. <https://doi.org/10.1021/ie1000373>
- Vítová, M., & Mezricky, D. (2024). Microbial recovery of rare earth elements from various waste sources: a mini review with emphasis on microalgae. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 40, 189. <https://doi.org/10.1007/s11274-024-03974-4>
- Vo, P. H. N., Kuzhiumparambil, U., Kim, M., Hinkley, C., Pernice, M., Nghiem, L. D., & Ralph, P. J. (2024). Biomining using microalgae to recover rare earth elements (REEs) from bauxite. *Bioresource Technology*, 406, e131077. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131077>
- Vo, P. H. N., Danaee, S., Hai, H. T. N., Huy, L. N., Nguyen, T. A. H., Nguyen, H. T. M., Kuzhiumparambil, U., Kim, M., Nghiem, L. D., & Ralph, P. J. (2024). Biomining for sustainable

- recovery of rare earth elements from mining waste: A comprehensive review. *Science of the Total Environment*, 908, 168210. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168210>
- Wang, J., & Delavar, M. A. (2023). Techno-economic analysis of phytoremediation: A strategic rethinking. *Science of the Total Environment*, 902, 165949. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165949>
- Xie, C., Xiao, Y., He, C., Liu, W. S., Tang, Y. T., Wang, S., Ent, A., Morel, J. L., Simonnot, M., & Qiu, R. L. (2023). Selective recovery of rare earth elements and value-added chemicals from the *Dicranopteris linearis* bio-ore produced by agromining using green fractionation. *Journal of Hazardous Materials*, 443, 130253. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130253>
- Xie, X., Tan, X., Yu, Y., Li, Y., Wang, P., Liang, Y., & Yan, Y. (2022). Effectively auto-regulated adsorption and recovery of rare earth elements via an engineered *E. coli*. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127642. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127642>
- Yan, Q., Yang, Y., Chen, W., Weng, X., Owens, G., & Chen, Z. (2023). Recovery and removal of rare earth elements from mine wastewater using synthesized bio-nanoparticles derived from *Bacillus cereus*. *Chemical Engineering Journal*, 459, 141585. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141585>
- Yin, X., Wang, Y., Bai, X., Wang, Y., Chen, L., Xiao, C., Diwu, J., Du, S., Chai, Z., Albrecht-Schmitt, T. E., & Wang, S. (2017). Rare earth separations by selective borate crystallization. *Nature Communications*, 8(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/ncomms14438>
- Zhang, L., Zhang, P., Yoza, B., Liu, W., & Liang, H. (2020). Phytoremediation of metal-contaminated rare-earth mining sites using *Paspalum conjugatum*. *Chemosphere*, 259, 127280. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127280>
- Zhang, Y., Zhang, T., Cai, W., Owens, G., & Chen, Z. (2024). Recovery of Y (III) from wastewater by *Pseudomonas psychrotolerans* isolated from a mine soil. *Journal of Hazardous Materials*, 476, 134973. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134973>
- Zhao, F., Repo, E., Meng, Y., Wang, X., Yin, D., & Sillanpää, M. (2016). An EDTA-β-cyclodextrin material for the adsorption of rare earth elements and its application in preconcentration of rare earth elements in seawater. *Journal of Colloid and Interface Science*, 465, 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.11.069>
- Zhou, H., Wang, J., Shao, S., & Yu, X. (2024). Comparison of biosorption behavior and mechanism of La^{3+} , Sm^{3+} , Y^{3+} , Nd^{3+} , Er^{3+} by *Aspergillus niger* and *Bacillus* sp. *Journal of Water Process Engineering*, 59, 104965. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104965>

Dinâmica toxicológica e repercussões clínico-produtivas nas intoxicações por plantas em bovinos de corte

Recebido em: 20/11/2025

Aceito em: 12/12/2025

 10.46420/9786585756693cap7

Guilherme Vernier Furlanetto Paixão 

Ariane Dantas 

Geraldo de Nardi Junior 

INTRODUÇÃO

Na bovinocultura de corte representa um dos pilares da economia brasileira, posicionando o Brasil entre os maiores produtores e exportadores de carne bovina do mundo. De acordo com dados da Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes (Abiec, 2024), o setor movimentou aproximadamente R\$ 108 bilhões em exportações no último ano, respondendo por parcela significativa do Produto Interno Bruto (PIB) agropecuário e desempenhando papel estratégico na geração de empregos, desenvolvimento regional e equilíbrio comercial.

Entre os principais desafios sanitários enfrentados pelo setor produtivo de bovinos de corte, as intoxicações por plantas ocupam posição de destaque devido à sua elevada frequência, potencial letal e impacto direto sobre os índices produtivos. Estimativas da Embrapa (2023), indicam que essas intoxicações figuram entre as principais causas de mortes não infecciosas em bovinos no Brasil, ocasionando perdas econômicas expressivas relacionadas a mortalidade, redução no ganho de peso, custos de tratamento, descarte precoce de animais e diminuição da eficiência reprodutiva.

Dentre as espécies vegetais tóxicas de maior relevância clínica e produtiva para bovinos de corte no Brasil, destacam-se *Palicourea marcgravii* e *Mascagnia rigida*, cuja ingestão está associada à morte súbita em decorrência da presença do monofluoracetato de sódio (Caixeta, Viu & Araujo, 2024). Além dessas, as espécies do gênero *Brachiaria*, amplamente utilizadas como base alimentar da produção de bovinos de corte, são responsáveis por quadros de fotossensibilização hepatógena e morte, sobretudo em animais jovens ou submetidos a condições de estresse nutricional (Ferreira Junior et al., 2022). As plantas do gênero *Crotalaria* também apresentam grande relevância toxicológica, em virtude da presença de alcaloides pirrolizidínicos que causam dano hepático cumulativo, levando a prejuízos produtivos e óbitos, especialmente em propriedades com pastagens contaminadas ou uso de forragens armazenadas (Leal et al., 2019).

A escolha do presente tema justifica-se, portanto, pela necessidade de consolidar o conhecimento científico disponível, oferecer subsídios para a identificação precoce das intoxicações e orientar medidas de manejo que contribuam para a sustentabilidade desse segmento nacional (Ferreira Junior et al., 2022).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo abordar os principais agentes vegetais com ação tóxica de importância clínica e econômica para bovinos de corte no Brasil abordando seus aspectos epidemiológicos, mecanismos de ação toxicológica, manifestações clínicas e impactos produtivos, a fim de fornecer subsídios técnico-científicos relevantes para o diagnóstico, prevenção e manejo dessas intoxicações na pecuária de corte brasileira.

ANÁLISE DAS PRINCIPAIS INTOXICAÇÕES POR PLANTAS EM BOVINOS DE CORTE

A flora brasileira é caracterizada por sua diversidade, abrigando mais de 130 espécies de plantas tóxicas com impacto comprovado na saúde animal. Muitas dessas espécies encontram-se adaptadas a ecossistemas de borda, áreas degradadas ou em regeneração, tornando-se altamente acessíveis aos animais em períodos de estiagem ou quando há deficiência de pastagem. Assim, a ocorrência de intoxicações em bovinos de corte está intimamente ligada às práticas de manejo inadequadas, ao desconhecimento da flora tóxica local e à falta de medidas preventivas eficazes (Ataíde, Da Silva & Santos, 2019).

A *Palicourea marcgravii*, pertencente à família *Rubiaceae*, é amplamente reconhecida na literatura científica como a principal planta tóxica responsável por mortes súbitas em bovinos criados em regime extensivo no Brasil, sobretudo em regiões de Mata Atlântica e Cerrado, onde ocorre de forma natural em áreas de sub-bosque e bordas de florestas. Essa espécie apresenta elevada importância clínica e econômica em virtude do seu potencial letal, já que pequenas quantidades ingeridas podem desencadear um quadro agudo de insuficiência cardíaca, levando o animal à morte em poucos minutos após o início dos sinais clínicos, o que torna a intervenção terapêutica praticamente ineficaz (Ubiali et al., 2020).

Do ponto de vista botânico, *Palicourea marcgravii* é um arbusto perene, com porte variável entre 1 e 3 metros de altura, folhas inteiras, opostas, de coloração verde intensa e odor característico quando maceradas, semelhante a salicilato de metila. Seus frutos, do tipo drupa, apresentam coloração inicialmente verde, tornando-se escuros quando maduros, sendo essas estruturas, juntamente com as folhas, as principais fontes do princípio tóxico. A presença da planta é mais comum em áreas sombreadas e de alta umidade, especialmente durante períodos de transição climática, quando há escassez de pastagem cultivada, levando o gado a consumir espécies vegetais nativas inadvertidamente (Riet-Correa, Machado & Micheloud, 2023).

O princípio tóxico presente na *Palicourea marcgravii* é o monofluoracetato de sódio, um composto que interfere diretamente no metabolismo energético celular. Após a ingestão e absorção pelo trato gastrointestinal, o monofluoracetato é convertido em fluorocitrato, substância que inibe a enzima aconitase no ciclo de Krebs, interrompendo a produção de energia mitocondrial. Esse bloqueio resulta no acúmulo de citrato e na falência metabólica de órgãos vitais, especialmente o coração, ocasionando arritmias graves e fibrilação ventricular. Segundo Cook et al. (2014), esse mecanismo toxicológico explica a morte súbita observada em bovinos intoxicados, mesmo quando submetidos a esforços mínimos, como a simples locomoção.

Clinicamente, os bovinos intoxicados por *Palicourea marcgravii* podem apresentar sinais inespecíficos ou evoluir diretamente para morte súbita, o que dificulta o diagnóstico precoce. Em muitos casos, animais aparentemente saudáveis são encontrados mortos próximo a áreas onde a planta é abundante. Quando presentes, os sinais clínicos incluem taquicardia, dispneia, tremores musculares, relutância ao movimento, sialorreia e decúbito lateral seguido de morte rápida. A morte geralmente ocorre entre cinco e trinta minutos após o início dos sintomas, o que evidencia o caráter fulminante da intoxicação (Pessoa, Medeiros & Riet-Correa, 2019).

A relevância econômica da *Palicourea marcgravii* está associada ao elevado índice de letalidade e à dificuldade de controle da planta em áreas de floresta secundária. Os prejuízos incluem perdas diretas por mortalidade de animais em idade produtiva, além de impactos indiretos relacionados à necessidade de isolamento de áreas de risco, redução da disponibilidade de pastagem e custos com diagnóstico diferencial. De acordo com Riet-Correa, Machado e Micheloud (2023), essa espécie é considerada a planta de maior importância toxicológica na pecuária nacional devido à sua ampla distribuição geográfica e ao elevado potencial de causar mortalidade em rebanhos de corte.

O diagnóstico da intoxicação por *Palicourea marcgravii* baseia-se na associação entre a presença da planta na pastagem, morte súbita dos animais e ausência de lesões macroscópicas significativas à necropsia. Alterações como hemorragias pontuais no miocárdio e congestão pulmonar podem ser observadas, mas não são patognomônicas. Exames histopatológicos podem demonstrar degeneração miocárdica, porém esses achados também são inespecíficos e devem ser interpretados em conjunto com os dados epidemiológicos (Caixeta, Viu & Araujo, 2024).

A prevenção da intoxicação por *Palicourea marcgravii* constitui o principal meio de controle, uma vez que não existe tratamento eficaz após a ingestão da planta e o início da manifestação clínica. As estratégias preventivas baseiam-se na identificação e erradicação da planta em áreas de pastoreio, isolamento de regiões de risco e adoção de práticas de manejo que reduzam o acesso dos bovinos às plantas tóxicas, especialmente nos períodos de transição climática e escassez de forragem. Bovinos podem desenvolver comportamento seletivo e evitar a ingestão espontânea da planta quando têm à disposição pastagem de boa qualidade, contudo, em situações de fome ou manejo inadequado, a intoxicação ocorre de forma compulsória. Nesse sentido, a suplementação estratégica e a rotação de pastagens são medidas fundamentais para minimizar o risco de surtos (Alves et al., 2021).

Sob a mesma perspectiva de risco sanitário e impacto econômico, a *Mascagnia rigida*, pertencente à família *Malpighiaceae*, é uma das principais causas de morte súbita em bovinos nas regiões semiáridas do Brasil, especialmente no Nordeste, Centro-Oeste e norte de Minas Gerais. Essa espécie ocorre de forma espontânea em áreas de caatinga e cerrado, sendo muito adaptada a solos pobres e períodos prolongados de estiagem. Sua importância toxicológica é comparável à da *Palicourea marcgravii*, devido à presença do mesmo princípio ativo, o monofluoracetato de sódio, composto que exerce ação letal sobre o sistema cardiovascular dos bovinos. O consumo da planta ocorre principalmente em épocas de seca, quando há

escassez de forragem verde, levando os animais a ingerirem folhas secas ou rebrotas jovens altamente tóxicas (Tokarnia et al., 2012).

Sob a perspectiva botânica, a *Mascagnia rigida* é um arbusto lenhoso, de 1 a 3 metros de altura, com ramos eretos, folhas simples e opostas, de formato ovalado e textura coriácea. As flores são pequenas, amarelas, dispostas em racemos terminais, e os frutos são alados, característica típica do gênero. A planta é perene e possui alta resistência à seca, o que facilita sua disseminação em áreas de pastagem nativa. Essa morfologia contribui para sua permanência nas paisagens de caatinga e para o risco constante de intoxicação, uma vez que a *Mascagnia rigida* é menos reconhecida visualmente pelos produtores em comparação com a *Palicourea margravii* (Ataíde, Da Silva & Santos, 2019).

O mecanismo de ação do monofluoracetato de sódio presente na *Mascagnia rigida* é idêntico ao descrito para a *Palicourea margravii*, afetando o metabolismo energético celular. Após a ingestão, o composto é convertido em fluorocitrato, que inibe a aconitase do ciclo de Krebs, resultando em acúmulo de citrato e depleção de energia nos tecidos, especialmente no miocárdio. Essa falência metabólica culmina em disfunção cardíaca grave, com consequente fibrilação e morte súbita. A diferença entre as espécies está na adaptação ecológica e na sazonalidade das intoxicações: enquanto a *Palicourea* predomina em regiões úmidas e sombreadas, a *Mascagnia* é característica de ambientes áridos e abertos (Nascimento et al., 2018).

Os sinais clínicos da intoxicação são semelhantes aos observados para outras plantas produtoras de fluoroacetato. Bovinos intoxicados podem apresentar relutância ao movimento, taquicardia, tremores musculares e dispneia antes da morte. Entretanto, na maioria dos casos registrados, o óbito ocorre de forma súbita, sem que o animal apresente manifestações clínicas perceptíveis. Essa semelhança clínica dificulta o diagnóstico diferencial em campo, exigindo a identificação da planta nas pastagens e a exclusão de outras causas de morte súbita, como intoxicações por *Nerium oleander* ou distúrbios metabólicos agudos (Nogueira et al., 2011). O controle da intoxicação envolve práticas preventivas como o fornecimento de alimento suplementar durante o período seco, a manutenção de pastagens cultivadas e a eliminação mecânica das plantas em áreas de maior incidência. A educação sanitária dos produtores e trabalhadores rurais é fundamental, visto que o reconhecimento precoce da planta e o manejo adequado do gado em períodos críticos são as únicas medidas efetivas de prevenção (Mohite, 2023).

No mesmo contexto de relevância epidemiológica, porém com mecanismo toxicológico distinto, as espécies do gênero *Brachiaria* (atualmente *Urochloa* em várias classificações), notadamente *B. decumbens* e *B. brizantha*, constituem a base forrageira de extensas áreas de criação de bovinos de corte no Brasil e, ao mesmo tempo, estão entre as causas mais relevantes de fotossensibilização hepatógena e perdas zootécnicas associadas a hepatopatias tóxicas em ruminantes (Araújo et al., 2017).

Quanto ao aspecto toxicológico, a patogênese da intoxicação por *Brachiaria* spp. envolve, predominantemente, saponinas esteroidais litogênicas capazes de induzir colangiopatia com formação de cristais e obstrução biliar, o que culmina em retenção de pigmentos biliares e comprometimento da

excreção de filioeritrina, principal fotossensibilizante endógeno derivado do metabolismo da clorofila. A lesão biliar e hepatocelular reduz a depuração da filioeritrina; expostos à radiação solar, animais acometidos desenvolvem fotossensibilização hepatógena com lesões cutâneas especialmente em áreas despigmentadas e pouco pilosas (Kono et al., 2022).

Esse modelo patogênico, sustentado por achados químicos e histopatológicos, consolidou-se na literatura e substituiu hipóteses anteriores que atribuíam papel central a micotoxinas de *Pithomyces chartarum* (esporidesmina) em determinadas circunstâncias de campo. Na prática, o conjunto de evidências indica que as saponinas esteroidais e a colestase cristal-associada constituem o eixo causal mais consistente, ainda que fatores ambientais (umidade, manejo do pastejo, composição botânica, sombreamento) possam modular a expressão clínica (Verma & Karapanos, 2025).

No nível clínico-epidemiológico, bovinos intoxicados em pastagens de *Brachiaria* spp. podem apresentar fotodermatite com eritema, prurido intenso, edema e necrose cutânea em áreas expostas, além de letargia, icterícia variável, inapetência e perda de condição corporal; em casos mais severos observam-se apatia marcada e evolução para óbito em parte dos animais, sobretudo jovens ou sob estresse nutricional. Um padrão frequentemente descrito em bovinos de corte é o edema de barbel e região peitoral, acompanhado de hiporexia e perda de peso, podendo ocorrer quadros sem lesões cutâneas aparentes quando a fotossensibilização não se manifesta de forma exuberante. Neurologia secundária (encefalopatia hepática) foi ocasionalmente relatada em pequenos ruminantes com colestase grave, o que reforça a necessidade de avaliação clínica e laboratorial abrangente (Low, 2015).

O diagnóstico em campo requer integração de informações: a) evidência epidemiológica de pastejo em *Brachiaria* spp. (muitas vezes em monocultura, com sobrepastejo ou déficit de oferta); b) sinais clínicos de fotossensibilização hepatógena e/ou emagrecimento progressivo; c) exclusão de diferenciais que também cursam com fotossensibilização, como *Lantana camara*, *Enterolobium contortisiliquum*, *Stryphnodendron* spp. e *Pterodon emarginatus*; d) confirmação anatomopatológica, quando possível, com os achados descritos. Em propriedades onde coexistem outras espécies potencialmente fototóxicas, o reconhecimento botânico das áreas de pastejo e a verificação do histórico de implantação da pastagem são componentes críticos do raciocínio clínico (Santos & Haas 2025).

A discussão sobre fatores de risco destaca a maior ocorrência em sistemas de manejo que favorecem ingestão de grandes quantidades de *Brachiaria* em curtos períodos (por exemplo, entrada tardia em piquetes muito formados após chuvas), a maior susceptibilidade de categorias jovens, a monotonia botânica (monocultivo de *Brachiaria*), períodos de transição seca-águas e estressores concomitantes. Acredita-se que a *B. decumbens* está entre as espécies mais frequentemente implicadas, embora *B. brizantha*, *B. humidicola* e *B. ruziziensis* também estejam associadas a quadros clínicos compatíveis, a depender do ambiente e do manejo. Em rebanhos com recorrência de casos, a substituição parcial da forragem, a consorciação com leguminosas e a rotação de áreas reduzem a pressão de ingestão e a probabilidade de surtos (Seixas et al., 2016).

No âmbito de manejo e prevenção, não existe antídoto específico para a intoxicação por *Brachiaria* spp.; as intervenções eficazes concentram-se em medidas agrônômicas e nutricionais: diversificação da pastagem (evitando monocultivo), ajuste de lotação e oferta, rotação de piquetes, retirada imediata dos animais das áreas de risco ao primeiro sinal clínico, fornecimento de sombreamento e suplementação estratégica para reduzir a ingestão compulsória. Em situações de surto, animais afetados devem ser manejados à sombra, com suporte clínico e proteção cutânea quando houver lesões; entretanto, o prognóstico é reservado nos quadros com hepatopatia avançada. Na perspectiva produtiva, ações preventivas integradas são as que melhor mitigam perdas, pois diminuem a frequência de quadros clínicos e o descarte precoce de animais (Chung et al., 2018).

Dando continuidade à análise das espécies vegetais de importância sanitária para os rebanhos bovinos, as espécies do gênero *Crotalaria*, pertencentes à família *Fabaceae*, destacam-se como importantes causas de intoxicação hepatotóxica em bovinos de corte no Brasil, especialmente em áreas de pastagem contaminadas por plantas invasoras ou em situações de contaminação de fenos, silagens e rações com sementes dessas leguminosas (Riet-Correa, Machado & Micheloud, 2023).

Diferentemente das espécies que causam morte súbita, como *Palicourea margravii* e *Mascagnia rigida*, *Crotalaria* spp. induzem um processo tóxico cumulativo, relacionado à presença de alcaloides pirrolizidínicos, substâncias que promovem lesões hepáticas progressivas, evoluindo para insuficiência hepática e morte. Entre as espécies de maior relevância toxicológica para bovinos destacam-se *Crotalaria retusa* e *Crotalaria mucronata*, frequentemente associadas a acontecimentos em regiões de criação extensiva de bovinos e atividade de produção com manejo inadequado de pastagens e armazenamento de forragens (Ribeiro et al., 2025).

Considerando o enfoque morfológico, *Crotalaria* spp. são plantas herbáceas ou subarborescentes, com folhas simples ou trifolioladas e inflorescências em racemos com flores amarelas, características que facilitam sua identificação em campo. As vagens secas, contendo sementes tóxicas, produzem som característico ao serem sacudidas, o que origina o nome popular “*rattlepod*” em inglês. A disseminação dessas plantas ocorre principalmente por sementes, que possuem alta taxa de germinação e resistência ambiental, tornando-se invasoras de áreas de pastagem, beiras de estradas e locais degradados (Da Silva et al., 2022).

A toxicidade das *Crotalaria* spp. é atribuída aos alcaloides pirrolizidínicos, especialmente monocrotalina e retusina, que, após ingeridos, são biotransformados no fígado em metabólitos tóxicos capazes de lesar células endoteliais e hepatócitos, levando à obstrução dos sinusóides e fibrose hepática. Esses alcaloides também podem comprometer o endotélio vascular pulmonar, causando lesões no parênquima respiratório em algumas espécies animais; contudo, em bovinos, a hepatotoxicidade é o principal mecanismo de ação. A ingestão repetida de pequenas quantidades de sementes ou folhas ao longo do tempo resulta em intoxicação crônica, com sinais clínicos que surgem após lesão hepática significativa (Clayton et al., 2020).

No contexto clínico, bovinos intoxicados por *Crotalaria* spp. apresentam sinais progressivos, incluindo anorexia, perda de escore corporal, apatia, fotossensibilização hepatógena, diarreia persistente, edema submandibular e distúrbios neurológicos decorrentes de encefalopatia hepática, como incoordenação, cegueira, pressão da cabeça contra objetos e decúbito prolongado. Pode evoluir para morte em poucos dias após o início dos sinais clínicos neurológicos, demonstrando o caráter irreversível do processo tóxico quando os danos hepáticos já se encontram avançados (Riet-Correa, Machado & Micheloud, 2023).

Em relação à descrição epidemiológica, a presença de *Crotalaria* spp. nas pastagens representa risco permanente, especialmente em áreas com baixa fertilidade do solo e manejo inadequado, que favorecem o estabelecimento de plantas invasoras. Surto também podem ocorrer em propriedades que utilizam feno ou silagem contaminados com sementes da planta, uma vez que os alcaloides mantêm a toxicidade mesmo após o processamento e armazenamento. Bovinos jovens e animais recém-introduzidos em áreas infestadas apresentam maior susceptibilidade clínica (Zatt et al., 2024).

A discussão científica destaca que a intoxicação por *Crotalaria* spp. representa não apenas um problema sanitário, mas também econômico, pois animais intoxicados apresentam queda acentuada de desempenho zootécnico, redução no ganho de peso, condenação de carcaças e perdas reprodutivas, além de custos elevados com tratamento paliativo e descarte precoce de animais. A ausência de terapias específicas torna a prevenção o pilar fundamental do controle, baseando-se em práticas de manejo de pastagens, rotação de áreas, eliminação mecânica das plantas e inspeção rigorosa de alimentos volumosos antes da oferta aos animais (Abdisa & Dinbiso, 2024).

A *Crotalaria* spp. constitui importante causa de hepatotoxicidade em bovinos de corte, com implicações clínicas graves e elevado impacto econômico. A compreensão dos mecanismos de ação, dos fatores predisponentes e dos sinais clínico-patológicos é essencial para o estabelecimento de estratégias eficazes de prevenção e para a mitigação de perdas na economia orientada à bovinocultura de corte nacional (Bezerra & Falcão-Silva, 2019).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As intoxicações por *Palicourea margravii*, *Mascagnia rigida*, *Brachiaria* spp. e *Crotalaria* spp. configuram importante obstáculo sanitário para a pecuária de corte, devido ao elevado potencial de causar morte ou comprometer severamente a produtividade dos rebanhos. A inexistência de terapias eficazes torna a prevenção o principal meio de controle, demandando manejo adequado das pastagens e identificação precoce das plantas tóxicas. O conhecimento sobre os mecanismos de ação e manifestações clínicas é essencial para a tomada de decisões veterinárias. A atuação técnica qualificada do Médico Veterinário contribui diretamente para a redução das perdas econômicas e a proteção da saúde animal. Assim, a compreensão dessas intoxicações é indispensável para garantir a eficiência produtiva e a sustentabilidade da bovinocultura nacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdisa, T., & Dinbiso, T. D. (2024). Toxic plants and their impact on livestock health and economic losses: A comprehensive review. *Journal of Toxicology*, 1, 1-15. DOI: 10.1155/jt/9857933. eCollection 2024.
- Abiec. Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras De Carnes. (2024). Beef Report 2024: Perfil da Pecuária no Brasil. São Paulo: ABIEC. Disponível em: <https://abiec.com.br/>. Acesso em: 20 out. 2025.
- Alves, D. A., De Aquino, R. F., De Abreu, C. M., Lima, V. A. P., Bispo, C. A. S., & Pereira, G. C. (2021). Plantas tóxicas para bovinos em Minas Gerais. *Ciência Animal*, 31, 1, 58-66.
- Araújo, R. R., Pupin, R. C., Madureira, R. C., Moraes, L. G., Quevedo, L. S., Lemos, R. A. A., Schild, A. L., Colodel, E. M., & Castro, M. B. (2017). Characterization and frequency of histological changes in bovine livers from slaughterhouses in Brazil kept on *Brachiaria* spp. *Acta Scientiae Veterinariae*, 45, 1, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.22456/1679-9216.79385>.
- Ataíde, G. M., Da Silva, A. G., & Santos, M. M. (2019). Plantas tóxicas a bovinos: análise dos processos de dispersão e regeneração das espécies. *Agrarian Academy*, 6, 11, 246-260. DOI: 10.18677/Agrarian_Academy_2019a24.
- Bezerra, J. J. L., & Falcão-Silva, V. S. (2019). Plantas relatadas como tóxicas para ruminantes no semiárido nordestino. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 18, 2, 202-211. DOI: <http://dx.doi.org/10.5965/223811711812019202>.
- Caixeta, R. P. G., Viu, M. A. O., & Araujo, G. H. M. (2024). Intoxicação por *Palicourea marcgravii* em bovinos no Brasil: Revisão. *Pubvet*, 18, 10, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.31533/pubvet.v18n10e1675>.
- Chung, E. L. T., Predith, M., Nobilly, F., Samsudin, A. A., Jesse, F. F. A., & Loh, T. C. (2018). Can treatment of *Brachiaria decumbens* (signal grass) improve its utilisation in the diet in small ruminants? A review. *Tropical Animal Health and Production*, 50, 1727-1732. DOI: 10.1007/s11250-018-1641-4.
- Clayton, M. J., Davis, T. Z., Knoppel, E. L., & Stegelmeier, B. L. (2020). Hepatotoxic plants that poison livestock. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 36, 3, 715-723. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2020.08.003>.
- Cook, D., Lee, S. T., Taylor, C. M., Bassüner, B., Riet-Correa, F., Pfister, J. A., & Gardner, D. R. (2014). Detection of toxic monofluoroacetate in *Palicourea* species. *Toxicon*, 80, 9-16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2013.12.003>.
- Da Silva, B. N. P., Masetto, T. E., Garcia, R. A., & Toledo, M. Z. (2022). Row spacing and seed physiological quality of *Crotalaria* species. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 52, e72674. DOI: DOI:10.1590/1983-40632022v5272674.

- Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2023). Intoxicações por plantas em bovinos: Panorama e estratégias de controle. Brasília: Embrapa Gado de Corte. Disponível em: <https://www.embrapa.br/gado-de-corte>. Acesso em: 12 nov. 2025.
- Ferreira Junior, J. A., Novaes, E. P. F., Barbosa, E. F. G., Nascimento, K. A., Macêdo, J. T. S. A., & Pedroso, P. M. O. (2022). Intoxicação espontânea por *Palicourea marcgravii* em bovinos no Distrito Federal, Brasil. *Ciência Animal*, 31, 2, 178-183.
- Kono, I. S., Faccin, T. C., De Lemos, G. A. A., Di Santis, G. W., Bacha, F. B., Guerreiro, Y. A., Gaspar, A. O., Lee, S. T., Guizelini, C. C., Leal, C. B., & De Lemos, R. A. A. (2022). Outbreaks of *Brachiaria ruziziensis* and *Brachiaria brizantha* intoxications in Brazilian experienced cattle. *Toxicon*, 219, 106931. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2022.106931>.
- Leal, P. V., De Melo, G. K. A., Pott, A., Martins, T. B., Gardner, D., De Barros, C. S. L., & De Lemos, R. A. A. (2019). Hepatic encephalopathy secondary to chronic liver lesions caused by *Crotalaria incana* in a bovine. *Acta Scientiae Veterinariae*, 47, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.22456/1679-9216.89439>.
- Low, S. G. (2015). Signal Grass (*Brachiaria decumbens*) toxicity in grazing ruminants. *Agriculture*, 5, 4, 971-990. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture5040971>.
- Mohite, A. M. (2023). Common plant poisoning in animals. *Acta Scientific Veterinary Sciences*, 5, 7, 53-56.
- Nascimento, N. C. F., Aires, L. D. A., Pfister, J. A., Medeiros, R. M. T., Riet-Correa, F., & Mendonça, F. S. (2018). Plantas cardiotoxicas para ruminantes no Brasil. *Pesquisa Veterinária Brasileira*, 38, 7, 1239-1249. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-5150-PVB-5548>.
- Nogueira, V. A., Peixoto, T. C., França, T. N., Caldas, S. A., & Peixoto, P. V. (2011). Intoxicação por monofluoroacetato em animais. *Pesquisa Veterinária Brasileira*, 31, 10, 823-838.
- Pessoa, D. A. N., Medeiros, R. M. T., & Riet-Correa, F. (2019). Techniques for prevention and control of poisoning by sodium monofluoroacetate (MFA)-containing plants in ruminants. *Pesquisa Veterinária Brasileira*, 39, 10, 771-779. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-5150-PVB-6373>.
- Ribeiro, M., Bianchi, I. N., Silva, W. D. M., Cavasani, J. P. S., Santos, I. G., Dias, L., Colodel, E. M., & Furlan, F. H. (2025). Subacute and chronic toxic hepatopathy in cattle grazing pasture with *Crotalaria spectabilis*. *Veterinary Pathology*, 62, 1, 82-86. DOI: 10.1177/03009858241281899.
- Riet-Correa, F., Machado, M., & Micheloud, J. F. (2023). Plants causing poisoning outbreaks of livestock in South America: A review. *Toxicon*: X, 17, 100150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxcx.2023.100150>.
- Santos, R. A., & Haas, D. J. (2025). Plantas tóxicas presentes na região amazônica que causam fotossensibilização em bovinos: Revisão de literatura. *Research, Society and Development*, 14, 6, e9914649131. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v14i6.49131>.

- Seixas, J. N., Pinto, C. A., Rodrigues, A., Tokarnia, C. H., França, T. N., Graça, F. A. S., D'Ávila, M. S., & Peixoto, P. V. (2016). Comparative study between *Brachiaria* spp. and *Pithomyces chartarum* poisoning in cattle. *Brazilian Journal of Veterinary Medicine*, 38, 2, 1-10. DOI: <https://bjvm.org.br/BJVM/article/view/192>.
- Tokarnia, C. H., Brito, M. F., Barbosa, J. D., Peixoto, P. V., & Döbereiner, J. (2012). *Plantas Tóxicas do Brasil para as Animais de Produção*. (2a ed). Rio de Janeiro: Editora Helianthus.
- Ubiali, D. G., Cardoso, L. F. C. G., Pires, C. A., & Riet-Correa, F. (2020). *Palicourea marcgravii* (Rubiaceae) poisoning in cattle grazing in Brazil. *Tropical Animal Health and Production*, 52, 6, 3527-3535. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11250-020-02388-2>.
- Verma, V. C. & Karapanos, I. (2025). Decoding Potential Co-Relation Between Endosphere Microbiome Community Composition and Mycotoxin Production in Forage Grasses. *Agriculture*, 15, 13, 1393. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15131393>.
- Zatt, N. S., De Freitas, V. M., Ribeiro, D. S. F., Borboleta, L. R., Vianna, J. V. R., Da Silva, V. F. F., & Lucas, M. H. V. (2024). Intoxicação por crotalária em bovinos no município de Mineiros - Goiás - Relato de Caso. *Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer*, 21, 49, 73-82. DOI: 10.18677/EnciBio_2024C7.

Educação ambiental na escola: ações com discentes do ensino fundamental para conservação de uma área costeira no município de Tutóia-MA

Recebido em: 21/11/2025

Aceito em: 03/12/2025

 10.46420/9786585756693cap8

Auricelia Sousa do Nascimento 

Ismarine de Assunção Vieira 

Lucas dos Santos Protazio 

Alicia Caroline Melo Lima 

Rayssa Maria Marques Pinto 

Felipe Bastos Araruna 

Selma Patrícia Diniz Cantanhede 

Luciana Patrícia Lima Alves Pereira 

INTRODUÇÃO

A educação ambiental (EA) é um dos temas mais discutidos em diferentes âmbitos da sociedade atual. Dada a sua relevância, tem obtido, no decorrer dos anos, o caráter de prática social, estando presente no currículo do ensino fundamental, de forma contínua e interdisciplinar. É de suma importância que as pessoas se tornem sensibilizadas sobre um modo de vida com escolhas voltadas à sustentabilidade visando, no futuro, um ambiente mais limpo para as gerações vindouras.

É indispensável, para que seja possível um modelo de sociedade mais consciente e sustentável, a consolidação da EA. Por meio desse processo educativo, os professores promovem aos seus respectivos alunos um ensino que os estimula a buscar meios responsáveis de tornar a relação entre os seres humanos e o meio ambiente mais equilibrada. A EA não é apenas mais uma disciplina obrigatória no currículo do sistema educacional, configura-se como um meio eficaz que gera nos discentes valores sociais, competências e habilidades necessárias para o desenvolvimento humano, tendo como pilar o respeito pelo meio ambiente em que vivem (Marques, Rios & dos Santos Alves, 2022).

A falta da EA, nas suas diferentes modalidades, resulta em um crescimento acelerado da degradação do meio ambiente, conforme demonstrado por estudos recentes que associam a ausência de processos educativos ambientais ao agravamento de problemas socioambientais em diferentes contextos, o que traria danos irreparáveis para toda uma população, pois as percepções de responsabilidade do uso sustentável dos meios naturais são construídas a partir de conhecimentos obtidos por meio da EA, do acesso ao conhecimento e à formação ambiental sistematizada (Uhmann & Vorpapel, 2018; Machado, Zaneti & Higuchi, 2019).

A presente proposta empregou métodos possíveis e eficazes para trabalhar essa tão necessária temática em uma escola de educação básica da rede pública, localizada no município de Tutóia-MA, em uma região litorânea, com o objetivo de sensibilizar os estudantes acerca da preservação de dois ricos ecossistemas locais: o mangue e as praias arenosas. O projeto focou em alunos dos anos finais do ensino fundamental, considerando seu papel como agentes multiplicadores na comunidade. A urgência em trabalhar a EA de modo mais dinâmico e eficiente na escola selecionada foi constatada por meio de visitas à comunidade na qual está inserida e da observação do descarte de resíduos sólidos, tanto nas proximidades da instituição educacional quanto nas áreas vizinhas, compostas por zonas de mangue e trechos litorâneos.

REFERENCIAL TEÓRICO

Educação ambiental: objetivos e importância

A EA tem como missão promover a ligação entre o homem e a natureza, conscientizar as pessoas sobre as questões ambientais e estimular ações com foco na conservação e na sustentabilidade (Loureiro, 2004). Ela capacita os cidadãos a participarem mais dos assuntos relacionados às questões de responsabilidade socioambiental e deve ser direcionada a todas as faixas etárias (Mello, 2017).

A educação para o desenvolvimento sustentável (EDS) visa mudar a forma como as pessoas pensam a respeito da preservação ambiental e, considerando que os recursos naturais do planeta são limitados e sua degradação é causada, principalmente, pela ação humana, a EA se torna essencial para promover mudanças, podendo ser aplicada em todos os lugares onde pode extrair e trocar conhecimentos relevantes para proteger o meio ambiente de forma mais sustentável (Silva, Oliveira, Santos, Pereira & Martins, 2015; UNESCO, 2021).

Educação ambiental na escola

Todas as escolas têm a responsabilidade de ensinar questões relacionadas à EA, que vão desde métodos de conservação até a conscientização dos alunos sobre a importância do uso dos recursos naturais de forma equilibrada. Essa educação é essencial para que os alunos entendam melhor a sustentabilidade e a importância de construir um futuro mais limpo para as gerações futuras (de Sousa, de Medeiros, Mendonça & de Oliveira, 2011).

A escola é o lugar em que os alunos adquirem conhecimentos e forma futuros cidadãos responsáveis, preparados para auxiliar na preservação do meio ambiente. Portanto, deve estar preparada para lidar com questões relacionadas à EA, incorporando temas ambientais nas sugestões de ensino, bem como incentivar o processo de reciclagem e conscientizar os discentes sobre a importância do uso dos recursos naturais de forma equilibrada (Albuquerque, 2018).

Sustentabilidade ambiental e os ODS

A Organização das Nações Unidas (ONU), em 2015, lançou a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, que contém um conjunto de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), 169 metas e 230 indicadores, formando um plano de ação para o Planeta Terra. Esta agenda inclui políticas públicas que objetivam orientar a humanidade até o ano de 2030 (Pimentel, 2019). Os 17 ODS abordam diferentes temas: saúde, educação, energia, água e saneamento, produção sustentável, padrões de consumo, mudanças climáticas, proteção e uso sustentável de ecossistemas marinhos e terrestres, entre outros. Esses ODS contêm metas a serem obtidas através de ações conjuntas, integrando a sociedade como um todo (Confederação Nacional dos Municípios, 2021).

A nova Agenda afirma que a educação é um objetivo em si e um meio para alcançar todos os outros ODS, sendo vista como uma estratégia fundamental. A Educação para o Desenvolvimento Sustentável (EDS) surgiu em 1992, quando a Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura (UNESCO) propôs iniciativas educacionais que ajudaram a mudar a forma como as pessoas ao redor do mundo pensavam e se comportavam (UNESCO, 2017).

ODS 14

Dentre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que foram estabelecidos em setembro de 2015, criou-se o ODS 14 - Vida na Água -, que tem como objetivo a conservação e uso responsável dos oceanos e recursos naturais marinhos para o desenvolvimento sustentável (Ambroggi & De Souza, 2019).

O Brasil pode se beneficiar do ODS 14. Embora o país tenha criado as áreas mais protegidas nos últimos 10 anos, suas regiões marinhas ainda são pouco preservadas (Gonçalves, 2021). Portanto, é fundamental para o desenvolvimento sustentável a gestão cuidadosa do ambiente marinho e a proteção dos recursos costeiros, pois são altamente vulneráveis à degradação ambiental, poluição, pesca excessiva e mudanças climáticas globais (Brasil, 2017; Machado Filho, 2017).

MATERIAL E MÉTODOS

O projeto foi aplicado na cidade de Tutóia, a qual localiza-se no interior do estado do Maranhão e apresenta uma grande área costeira, que faz o município ter grande potencial turístico. A Unidade Integrada São José foi a escola selecionada para o projeto e foi construída a menos de 1 km da praia de São José. Em seu entorno, há descarte de muitos resíduos sólidos de forma irregular, os quais se acumulam na costa da praia. Esta problemática motivou a idealização e aplicação das atividades dessa proposta pedagógica.

A proposta foi direcionada para 28 alunos da escola U.I São José, matriculados no 6º e 7º anos do ensino fundamental, turno vespertino e com idade entre 11 e 15 anos. Antes da implementação das

atividades educativas, o projeto precisou ser avaliado pela gestão da escola, que consentiu com o desenvolvimento da proposta. Assim, foram marcadas as datas para a realização das ações previstas. O momento também possibilitou o levantamento das metodologias utilizadas na instituição para o ensino da EA.

No primeiro encontro com os alunos, foi feita uma roda de conversa com o objetivo de introduzir o tema e coletar possíveis conhecimentos prévios que já tinham sobre o assunto. No encontro seguinte, foi ministrada uma palestra na qual foram abordadas questões relacionadas a EA. Para a realização da atividade, foram utilizados os seguintes recursos didáticos: um retroprojeto, um quadro branco, um notebook e slides em PowerPoint. Para encerrar a ação educativa, foi dado para cada aluno um adesivo com uma imagem de lixeiras ecológicas e foi explicada a importância da coleta seletiva, já preparando os alunos para a etapa seguinte: oficina de coleta seletiva.

No mês anterior à oficina, foram armazenados na escola alguns exemplares de lixo doméstico, como embalagens, caixas de papelão e garrafas pet. Para exemplificar os resíduos orgânicos, foram impressas imagens de sobras de alimentos. Os objetos foram todos higienizados e as caixas de papelão foram usadas para confecção de lixeiras ecológicas coloridas (Figura 1).



Figura 1. Lixeiras confeccionadas com caixas de papelão para a oficina da coleta seletiva realizada com os discentes. Fonte: Autoria própria (2022).

A oficina ocorreu no recreio do turno vespertino. Os exemplares de cada tipo de lixo foram levados para a escola e reforçou-se o último tópico da palestra, que abordava a coleta seletiva, explicando o significado das cores das lixeiras. Em seguida, os materiais foram postos em uma caixa neutra e as lixeiras foram removidas da ordem e viradas com os símbolos ocultos. Nesse momento, foi realizada uma dinâmica: cada turma escolheu 4 representantes para participar. Os participantes teriam que simular uma coleta seletiva, separando os materiais da caixa conforme foram instruídos. A turma que conseguisse mais acertos ganharia a competição.

Uma semana depois, outra atividade foi realizada, mas somente com os alunos do 6º ano. Antes de iniciar a dinâmica, os estudantes assistiram ao vídeo “Planeta Plástico”, que aborda o impacto do lixo nos oceanos (Figura 2). Logo após, foi feito um quiz sobre o vídeo exibido. Em um copo feito de caixa de leite, foram colocados vários números escritos em mini cartões, sendo que cada número era equivalente a uma pergunta. Os alunos escolhiam um número aleatório, como em um sorteio, e posteriormente respondiam à pergunta correspondente, que era projetada no quadro branco.



Figura 2. Alunos assistindo ao vídeo “Planeta Plástico”. Fonte: Autoria própria (2022).

Para reforçar ainda mais a consciência ambiental dos estudantes, foram selecionados 2 jogos online do site Atividades Educativas. A turma escolheu 2 alunos para jogar: no primeiro jogo, os participantes tinham que resolver questões sobre desenvolvimento sustentável, enquanto, no segundo,

deveriam guiar um robô para salvar algumas espécies em ambientes poluídos. Estes materiais didáticos virtuais foram acessados via notebook e projetados pelo datashow da escola.

A última ação educativa realizada com os alunos foi uma dinâmica do “verdadeiro ou falso”, na qual os participantes utilizaram cartões vermelhos e verdes para indicar se uma série de questões projetadas no quadro branco eram verdadeiras ou falsas.

Para constatar a contribuição da proposta na construção de uma percepção ambiental sólida e coerente, bem como avaliar o aprendizado, foi elaborado e aplicado um questionário a 28 alunos participantes do projeto. Desse total, 15 eram do 6º ano e 13 do 7º ano, 16 do sexo feminino e 12 do sexo masculino. A faixa etária dos entrevistados foi entre 11 e 15 anos, sendo que 75% estavam na faixa entre 11 e 12 anos, 22% entre 12 e 13 anos e 3% entre 13 e 15 anos. O instrumento de coleta de dados foi composto por onze questões, sendo dez questões fechadas e uma aberta. Os dados obtidos foram tabulados e analisados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na primeira visita à Escola U.I São José, a vice-gestora relatou que a instituição desenvolve ações pontuais voltadas para a EA, geralmente em datas comemorativas, com o apoio da Secretaria Municipal de Educação. Foi informado, ainda, que um projeto de EA mais amplo estava em construção, porém não foi concluído devido à interrupção das aulas durante a pandemia de Covid-19. Trabalhar datas comemorativas no âmbito escolar é uma prática fundamental, pois valoriza a diversidade cultural e a interdisciplinaridade. No entanto, a constatação de que as iniciativas carecem de continuidade sistemática reforça a necessidade de a EA ser uma prática permanente no contexto escolar, e não apenas eventual (Greff & Treviso, 2020).

A palestra sobre EA foi muito produtiva, proporcionando troca de experiências e aquisição de conhecimento. Os alunos demonstraram atenção e, ao final, afirmaram estar dispostos a contribuir para a preservação da vida marinha, uma consonância direta com os propósitos do ODS 14.

Em relação ao questionário aplicado aos alunos, ao indagar se os estudantes já tinham ouvido falar em educação ambiental antes da realização desse projeto, todos os discentes responderam que sim. Esse resultado evidencia que a temática já era conhecida pelos estudantes antes da intervenção realizada.

dos Santos, Gomes e França (2018), ao analisarem a Unidade Escolar Zezita Sampaio, no município de Buriti dos Lopes, estado do Piauí, apontam que a Educação Ambiental é um tema complexo, pois possui um leque considerável de campos de estudo, o que reforça a necessidade de abordagens sistemáticas no contexto escolar.

A análise das respostas obtidas com o questionário aplicado revelou que a compreensão prévia dos alunos sobre EA era restrita. Quando solicitados a descrever o que entendiam por EA, 70% dos alunos associaram o conceito a “não jogar lixo na rua”, 20% à “preservação” e 10% à “reciclagem” (Figura 3). Este resultado evidencia uma percepção inicial focada em ações pontuais, o que corrobora com os

achados de Fão, Schmitt, Perondi, Dalla Corte e Basso (2020), os quais associam a superficialidade do entendimento dos discentes à possível falta de capacitação dos docentes nesta área do ensino, resultando em um conhecimento, por vezes, teórico e desconectado da realidade complexa da EA.

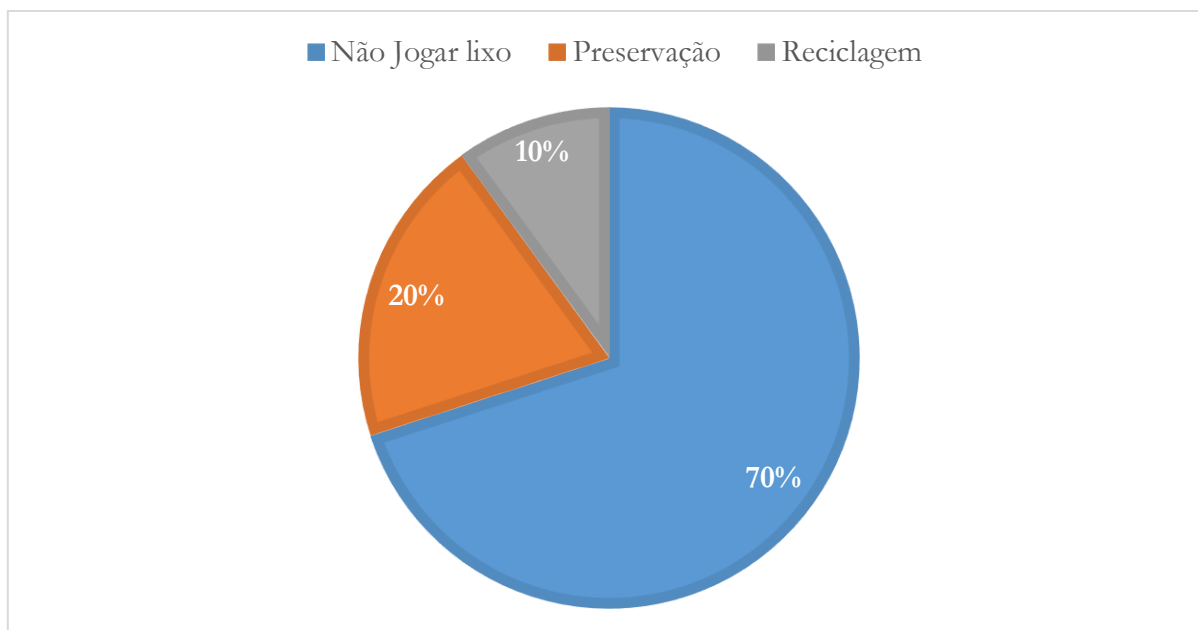


Figura 3. Percepção dos alunos entrevistados sobre educação ambiental. Fonte: Autoria própria (2022).

Em relação à participação dos discentes em alguma atividade no âmbito da EA na escola, 68% responderam que já participaram e 32% informaram que não (Figura 4). Em estudo semelhante, Costa e Pontarolo (2019) obtiveram 51,9% das respostas positivas à participação de atividades relacionadas à EA. Isto demonstra a necessidade e relevância de trabalhos dessa natureza.

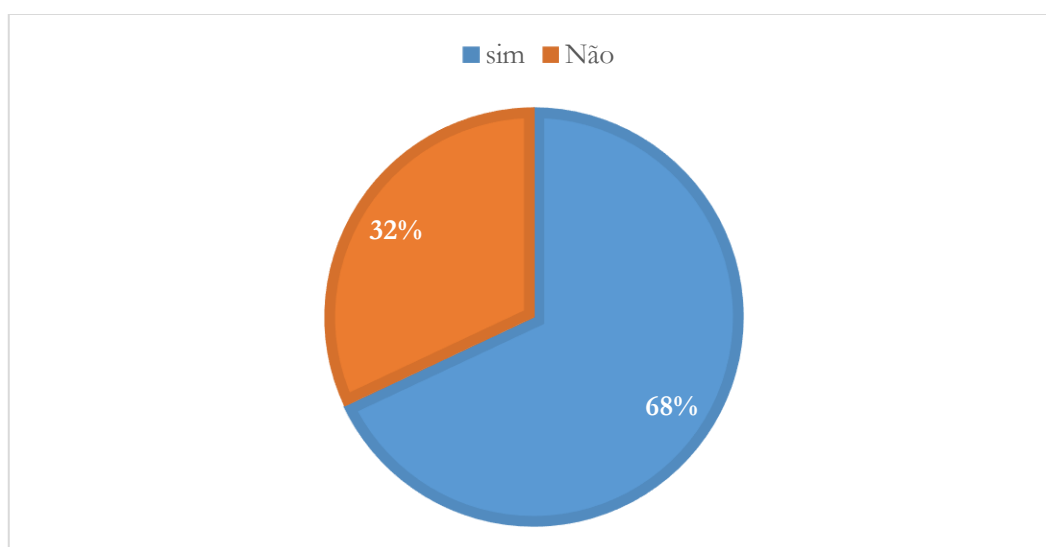


Figura 4. Participação dos estudantes em ações de educação ambiental. Fonte: Autoria própria (2022).

O bairro onde a U.I. São José está localizada é uma área costeira, no entanto, isso não impede o acúmulo de lixo descartado de forma irregular nas ruas e proximidades do prédio da instituição (Figura

5). Esta situação leva a se deduzir que a comunidade do bairro não tem informações acerca das medidas que propiciam o melhor gerenciamento dos resíduos sólidos, como a coleta seletiva, por exemplo.



Figura 5. Rua próxima à escola com lixo espalhado (A) e lixo que foi descartado de forma irregular próxima à área costeira – praia do bairro São José (B). Fonte: Autoria própria (2022).

A problemática relatada anteriormente motivou o questionamento referente à realização de coleta seletiva em casa e na escola pelos discentes. A maioria informou que faz essa coleta às vezes (80%), 18% disseram raramente e 2% nunca fizeram, conforme demonstrado na Figura 6. Em pesquisa realizada por Rodrigues (2018), foi constatado que as temáticas reciclagem, reutilização, compostagem e coleta seletiva são as mais trabalhadas nas instituições de ensino, sendo práticas que conseguem atrair de forma considerável a atenção dos alunos.

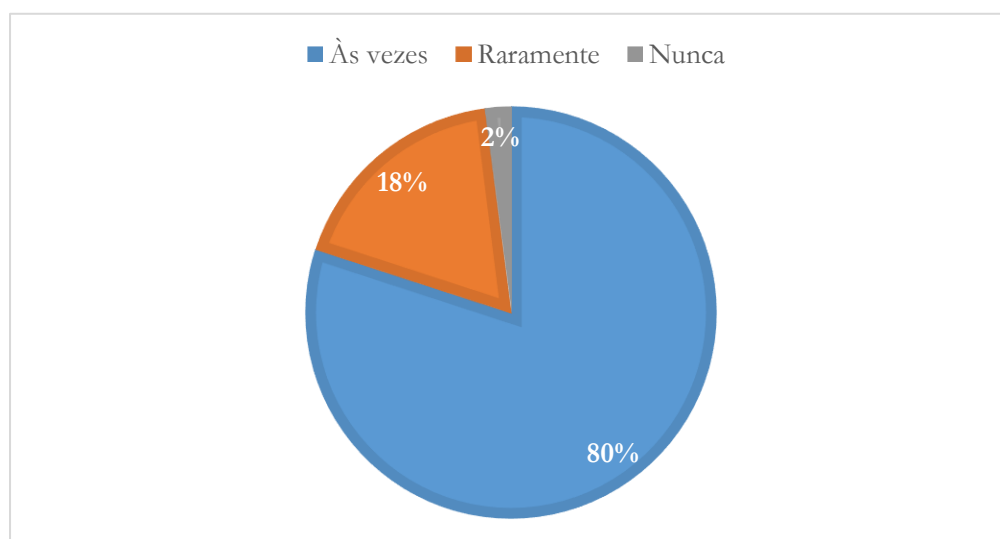


Figura 6. Realização de coleta seletiva pelos discentes. Fonte: Autoria própria (2022).

Pode-se inferir que a oficina sobre coleta seletiva em sala de aula terá como possível resultado a mudança de hábitos, tornando a separação de resíduos algo rotineiro entre os discentes e até mesmo entre seus familiares. Mendes e Amorim (2019) definem a escola como o local ideal para se aprender

novas práticas, que estão ligadas diretamente à construção da cidadania e obtenção de novos valores, fazendo uso das mais diferentes metodologias para o alcance desse ideal.

A receptividade às metodologias ativas aplicadas foi extremamente positiva. A percepção sobre a forma de abordagem foi majoritariamente favorável, com 98% dos discentes avaliando as atividades como interessantes. Este alto índice de aprovação confirma a relevância de abordagens participativas e interativas. A escolha de recursos pedagógicos alternativos é imprescindível por estar diretamente ligada à formação de indivíduos críticos e atuantes (de Sousa, da Silva Mendes, Marinho, Vasconcelos & Marinho, 2020). A opção por jogos online e dinâmicas lúdicas mostrou-se, portanto, uma estratégia eficaz para favorecer a aprendizagem significativa.

O principal objetivo da proposta, que era sensibilizar e promover uma mudança de atitude, também foi alcançado. Quando interrogados se seu comportamento em relação ao meio ambiente havia mudado após as atividades, 80% dos informantes relataram que suas atitudes melhoraram. Este dado vai ao encontro do que propõem projetos com viés ambiental, que visam não apenas uma cobrança ecológica, mas uma real mudança de postura e mentalidade (Simões, 2018). A oficina prática e os jogos permitiram uma compreensão satisfatória dos conteúdos, refletindo positivamente na percepção e nas intenções de ação dos discentes.

Não apenas como uma cobrança ecológica, projetos com viés ambiental propõem um olhar acompanhado por mudança de postura/mentalidade e uma execução real dos novos conhecimentos (Simões, 2018). Neste sentido, foi questionado se os escolares estavam dispostos a colocar em prática o que haviam aprendido com as ações realizadas. Todos responderam que estavam dispostos.

Buscou-se, também, identificar se o conhecimento adquirido foi disseminado no âmbito familiar, ampliando o raio de ação da proposta. Quando perguntados se haviam conversado com suas famílias sobre problemas ambientais, 78% dos estudantes responderam afirmativamente e 22% indicaram como resposta não (Figura 7). Esse resultado é particularmente significativo, pois sugere que os alunos atuaram como agentes multiplicadores. Ações educativas promovem o envolvimento necessário para oportunizar melhorias ambientais e, conseqüentemente, favorecer a qualidade de vida na família e comunidade (de Miranda, Mendonça, de Melo & de Melo, 2021). Levar a discussão para além dos muros da escola potencializa, de fato, o impacto educativo e fortalece a formação para uma cidadania ambiental. Após as atividades educativas, todos os discentes demonstraram entusiasmo e uma maior compreensão sobre a EA.

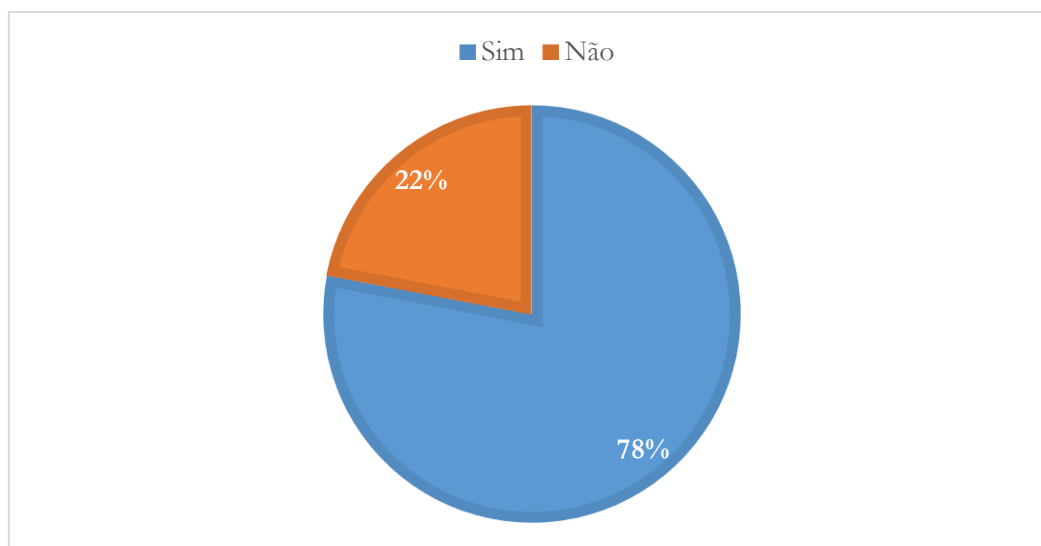


Figura 7. Percentual de alunos que conversaram e que não dialogaram com suas famílias sobre questões ambientais após a realização da proposta. Fonte: Autoria própria (2022).

Objetivou-se, ainda, saber qual seria a reação dos discentes caso observassem alguém cometendo qualquer tipo de infração ambiental, como jogar lixo no chão, fazendo, assim, descarte de resíduos sólidos de forma irregular. Conforme a Figura 8, um percentual de 56% disse que pediria para a pessoa evitar esse tipo comportamento, 28% responderam que explicariam os danos de tal atitude e 16% revelaram ignorar a ação. Este dado assemelha-se ao obtido no estudo de Cabral e do Nascimento (2020). Estes autores, quando questionaram alunos do ensino fundamental de duas escolas de Goiânia–GO, com uma pergunta semelhante da presente proposta, verificaram que 46% dos entrevistados responderam agir com indiferença e 54% indicaram a resposta “reprenderia o infrator”.

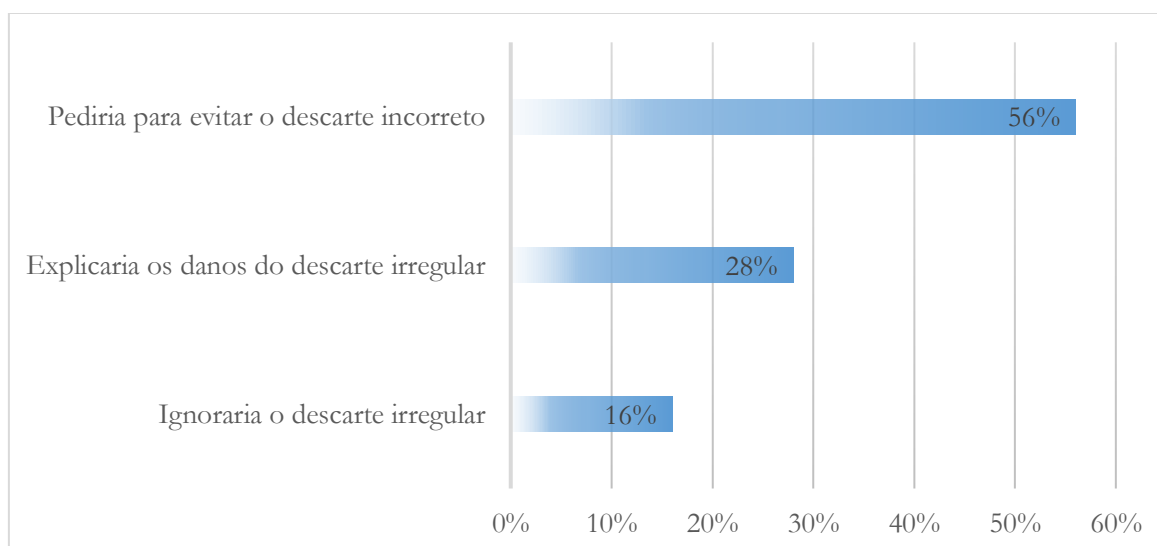


Figura 8. Reação dos alunos caso presenciassem o descarte de lixo de forma irregular. Fonte: Autoria própria (2022).

Cada ser humano compreende o meio ambiente de forma única e individual, o que leva a inferir que, para a EA ser de fato uma realidade aplicada na escola e na comunidade, é necessário um entendimento sobre si mesmo e suas próprias relações com a natureza que o rodeia. A partir daí é possível a criação de meios, práticos e teóricos, para um resultado positivo e significativo das ações voltadas à preservação e ao desenvolvimento sustentável.

CONCLUSÕES

Durante todo o processo de aplicação desta proposta foi possível notar o quão necessário é que um maior número de projetos sobre questões ambientais estejam presentes nas atividades interdisciplinares da escola. Trabalhos estes que sejam capazes de tornarem os discentes cidadãos que pensem criticamente e estejam aptos a repassarem para sua comunidade conhecimentos, atitudes e bons hábitos adquiridos a partir de uma EA de qualidade.

Foi notável o quanto os alunos envolvidos nesse trabalho foram sensibilizados pelas ações educativas realizadas, devido às suas realidades estarem tão próximas da ideia central da proposta. As atividades executadas foram pensadas de acordo com a faixa etária dos educandos, a oficina prática e os jogos permitiram uma atenção e compreensão dos conteúdos satisfatórias, o que refletirá positivamente não apenas na vida de cada participante, mas também nos futuros alunos e pais daquela comunidade.

Nesta perspectiva, fica clara a relevância de parcerias entre gestão municipal, gestão escolar e comunidade, para que aconteça mais atividades que tenham a EA, a preservação dos recursos naturais e meios sustentáveis como enfoque principal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, M. J. F. C. (2018). Educação ambiental e EJA: percepção dos alunos sobre o ambiente. *Educação Ambiental em Ação*. Novo Hamburgo, (42).
- Ambroggi, V. B., & de Souza, R. O. C. (2019). ODS 14 - Vida na água.
- Brasil. Secretaria de Governo da Presidência da República. (2017). Relatório Nacional Voluntário sobre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: Brasil 2017.
- Cabral, H. M., & do Nascimento, G. P. (2020). A percepção ambiental de discentes do ensino fundamental II em escolas públicas de Goiânia (GO). *Brazilian Applied Science Review*, 4(1), 186-201.
- Confederação Nacional dos Municípios. (2021). Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável.
- Costa, D. D., & Pontarolo, E. (2019). Aspectos da educação ambiental crítica no ensino fundamental por meio de atividades de modelagem matemática. *Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos*, 100(254), 149-168.

- de Miranda, D. L., Mendonça, A. T., de Melo, M. C., & de Melo, E. D. Educação ambiental a partir da agenda 2030: experiências da conscientização e do uso racional da água em uma escola municipal de varginha (mg). (2021). *Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)*, 16(2).
- de Sousa, D. S., da Silva Mendes, F. R., Marinho, M. M., Vasconcelos, S. O. S., & Marinho, E. S. (2020). Utilização de animações como metodologia ativa no ensino da Educação Ambiental. *Educação ambiental (brasil)*, 1(3).
- de Sousa, G. L., de Medeiros, A. B., Mendonça, M. J. D. S. L., & de Oliveira, I. P. (2011). A Importância da educação ambiental na escola nas séries iniciais. *Revista Eletrônica Faculdade Montes Belos*, 4(1).
- dos Santos, L. A., Gomes, J. N. D., & França, A. A. C. (2018). Educação ambiental na conscientização e preservação do meio ambiente: unidade escolar Zezita Sampaio, Buriti dos Lopes, PI. *Ambiente & Educação: Revista de Educação Ambiental*, 23(1), 225-247.
- Fão, J. M., Schmitt, A. R., Perondi, D. P., Dalla Corte, V. F., & Basso, N. R. (2020). A importância da educação ambiental nas escolas: um estudo nas escolas municipais de ensino fundamental de Frederico Westphalen/RS. *Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo*, 5(1), 108-123.
- Gonçalves, P. R. (2021). Diagnóstico, desafios e caminhos da conservação e uso sustentável das zonas costeiras e marinhas do Brasil: agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável, ODS-14.
- Greff, R. F., & Treviso, V. C. (2020). Datas comemorativas nos anos iniciais do ensino fundamental: perspectivas docentes acerca dessas práticas.
- Loureiro, C. F. B. (2004). Educação ambiental transformadora. *Identidades da educação ambiental brasileira. Brasília: Ministério do Meio Ambiente*, 65-84.
- Machado Filho, H. (2017). Documentos sustentáveis: objetivo de desenvolvimento sustentável 1, 2, 3, 5, 9, 14.
- Machado, A. L. S., Zaneti, I. C., & Higuchi, M. I. G. (2019). A degradação dos cursos hídricos urbanos, uma abordagem sobre gestão e educação ambiental. *Revista Ibero-Americana de Estudos em Educação*, 14(3), 1124-1138.
- Marques, W. R. A., Rios, D. L., & dos Santos Alves, K. (2022). A percepção ambiental na aplicação da Educação Ambiental em escolas. *Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)*, 17(2), 527-545.
- Mello, L. D. (2017). A importância da Educação Ambiental no ambiente escolar. *EcoDebate*, ISSN, 2446-9394.
- Mendes, S., & Amorim, M. C. D. C. T. (2019). Educação ambiental para a implantação da coleta seletiva em Junqueirópolis/SP. *Formação (Online)*, 26(48).
- Pimentel, G. S. R. (2019). O Brasil e os desafios da educação e dos educadores na agenda 2030 da ONU. *Revista Nova Paideia-Revista Interdisciplinar em Educação e Pesquisa*, 1(3), 22-33.
- Rodrigues, J. C. R. (2018). A educação ambiental nas escolas de Santa Catarina. *Ambiente & Educação: Revista de Educação Ambiental*, 23(1), 140-160.

- Silva, D., Oliveira, P. R., Santos, L. M., Pereira, A. G., & Martins, C. F. (2015). A educação ambiental no contexto do desenvolvimento sustentável. *Revista Eletrônica*.
- Simões, R. M. (2018). A educação ambiental como atividade interdisciplinar em escolas do ensino fundamental. *BARBAQUÁ*, 2(4), 63-77.
- Uhmman, R. I. M., & Vorpapel, F. S. (2018). Educação ambiental em foco no ensino básico. *Pesquisa em Educação Ambiental*, 13(2), 53-68.
- UNESCO (2017). *Educação para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: Objetivos de aprendizagem*.
- UNESCO (2021). *Educação para o desenvolvimento sustentável*.

Índice Remissivo

A

Agenda 2030, 106, 114
Algas, 79, 80

B

Bactérias, 77
Biossorção, 75, 87

C

captação superficial, 43, 46

D

dessedentação animal, 41, 42, 45, 46, 48
disponibilidade hídrica, 42, 46, 48

E

Educação Profissional, 65, 68, 69, 70, 71
Educação Profissional e Tecnológica, 69, 70, 71

F

Fitoextração, 84

G

gestão hídrica, 41, 42, 45, 46

M

Mata Atlântica, 6, 8

O

ODS 14, 106, 109, 114

R

recursos hídricos, 41, 42, 44, 47, 48

S

Sistemas Agroflorestais, 6, 7, 8, 12, 13, 15, 16, 17
Sistemas Agroflorestais (SAFs), 15, 16, 17
Sustentabilidade, 3, 106, 115

T

Terras raras, 4, 72, 74, 76, 77, 78, 79, 80, 83, 84, 91

Sobre os organizadores



  **Alan Mario Zuffo**

Engenheiro Agrônomo, graduado em Agronomia (2010) na Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT). Mestre (2013) em Agronomia - Fitotecnia (Produção Vegetal) na Universidade Federal do Piauí (UFPI). Doutor (2016) em Agronomia - Fitotecnia (Produção Vegetal) na Universidade Federal de Lavras (UFLA). Pós-Doutorado (2018) em Agronomia na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS). Atualmente, possui 237 artigos publicados/aceitos em revistas nacionais e internacionais, 131 resumos simples/expandidos, 86 organizações de e-books, 53 capítulos de e-books. É editor chefe da Pantanal editora e da Revista Trends in Agricultural and Environmental Sciences, e revisor de 23 revistas nacionais e internacionais. Professor adjunto II na UEMA em Balsas. Contato: alan_zuffo@hotmail.com.



  **Jorge González Aguilera**

Engenheiro Agrônomo, graduado em Agronomia (1996) na Universidad de Granma (UG), Bayamo, Cuba. Especialista em Biotecnologia (2002) pela Universidad de Oriente (UO), Santiago de Cuba, Cuba. Mestre (2007) em Fitotecnia na Universidade Federal do Viçosa (UFV), Minas Gerais, Brasil. Doutor (2011) em Genética e Melhoramento de Plantas na Universidade Federal do Viçosa (UFV), Minas Gerais, Brasil. Pós - Doutorado (2016) em Genética e Melhoramento de Plantas na EMBRAPA Trigo, Rio Grande do Sul, Brasil. Professor Visitante (2018-2022) na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) no campus Chapadão do Sul (CPCS), MS, Brasil. Professor substituto (2023-Atual) na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Cassilândia, MS, Brasil. Atualmente, possui 184 artigos publicados/aceitos em revistas nacionais e internacionais, 29 resumos simples/expandidos, 69 organizações de e-books, 53 capítulos de e-books. É editor da Pantanal Editora, e da Revista Trends in Agricultural and Environmental Sciences, e revisor de 19 revistas nacionais e internacionais. Contato: j51173@yahoo.com



  **Bruno Rodrigues de Oliveira**

Graduado em Matemática pela UEMS/Cassilândia (2008). Mestrado (2015) e Doutorado (2020) em Engenharia Elétrica pela UNESP/Ilha Solteira. Pós-doutorado pela UFMS/Chapadão do Sul na área de Inteligência Artificial aplicada na Engenharia Florestar/Agronômica. É editor da Pantanal Editora e da Revista Trends in Agricultural and Environmental Sciences e Analista no Tribunal de Justiça de Mato Grosso do Sul. Tem experiência nos temas: Matemática, Processamento de Sinais via Transformada Wavelet, Análise Hierárquica de Processos, Teoria de Aprendizagem de Máquina e Inteligência Artificial, com ênfase em aplicações nas áreas de Engenharia Biomédica, Ciências Agrárias e Organizações Públicas. Contato: bruno@editorapantanal.com.br



9786585756693

O nono volume do e-book Inovações em Pesquisas Agrárias e Ambientais apresenta estudos científicos focados nos desafios atuais do Brasil, como as mudanças climáticas e a necessidade de sistemas produtivos sustentáveis.



Pantanal Editora

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000
Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil
Telefone (66) 9608-6133 (Whatsapp)
<https://www.editorapantanal.com.br>
contato@editorapantanal.com.br