



# TECNOLOGIA, SAÚDE E MEIO AMBIENTE NO CONTEXTO AMAZÔNICO

*ABORDAGENS APLICADAS E INOVAÇÃO*

**Bruno Mori**  
**Victor Celso C. Capibaribe**  
**Geraldo José N. de Vasconcelos**  
*Organizadores*

**ARCO**  
EDITORES

**FAPEAM**  
Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas



# AMAZONAS

GOVERNO DO ESTADO

Wilson Miranda Lima  
Governador do Estado do Amazonas

Secretaria de  
**Desenvolvimento  
Econômico, Ciência,  
Tecnologia e Inovação**

Serafim Fernandes Corrêa  
Secretário de Estado de Desenvolvimento Econômico,  
Ciência, Tecnologia e Inovação - SEDECTI



**FAPEAM**  
Fundação de Amparo à Pesquisa  
do Estado do Amazonas

Márcia Perales Mendes Silva  
Diretora-Presidente da Fundação de Amparo  
à Pesquisa do Estado do Amazonas

## **Conselho Editorial**

Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva - UNIDAVI  
Prof. Dr. Astor João Schönell Júnior - IFFAR  
Prof. Dr. Alan Ricardo Costa - UFRR  
Prof. Dr. Allan Diêgo Rodrigues Figueiredo - UESPI  
Profa. Dra. Andréia Bulaty -UNESPAR  
Profa. Dra. Carla da Conceição de Lima - UFVJM  
Prof. Dr. Camilo Darsie de Souza - UNISC  
Profa. Dra. Clarice Caldeira Leite - UFRGS  
Profa. Dra. Cecilia Decarli - UFRGS  
Prof. Dr. Carlos Adriano Martins - UNICID  
Prof. Dr. Christian Dennys Monteiro de Oliveira - UFCE  
Profa. Dra. Dayse Marinho Martins - UFMA  
Prof. Dr. Deivid Alex dos Santos - UEL  
Prof. Dr. Dioni Paulo Pastorio -UFRGS  
Prof. Dr. Douglas Manoel Antonio de Abreu Pestana dos Santos - FASESP  
Profa. Dra. Elane da Silva Barbosa - UERN  
Profa. Dra. Elen Gomes Pereira - IFBA  
Profa. Dra. Francielle Benini Agne Tybusch - UFN  
Prof. Dr. Francisco Odécio Sales - IFCE  
Prof. Dr. Francisco Ricardo Miranda Pinto - UFCAT  
Prof. Dr. Gilvan Charles Cerqueira de Araújo - UCB  
Prof. Dr. Ismar Inácio dos Santos Filho - UFAL  
Prof. Dr. Leonardo Bigolin Jantsch - UFSM  
Profa. Dra. Liziany Müller Medeiros - UFSM  
Profa. Lucianne Oliveira Monteiro Andrade - IFGOIANO  
Profa. Dra. Marcela Mary José da Silva - UFRB  
Prof. Dr. Mateus Henrique Köhler - UFSM  
Prof. Dr. Michel Canuto de Sena - UFMS  
Profa. Dra. Mônica Aparecida Bortolotti - UNICENTRO  
Prof. Nilton David Vilchez Galarza - UPLA  
Prof. Dr. Olavo Barreto de Souza - UEPB  
Prof. Dr. Rafael Nogueira Furtado - UFABC  
Prof. Dr. Roberto Araújo da Silva Vasques Rabelo - UNISANTOS  
Prof. Dr. Rodrigo Toledo - USCS  
Prof. Dr. Rodolfo Rodrigues de Souza - UERJ  
Prof. Dr. Sidnei Renato Silveira - UFSM  
Prof. Dr. Thiago Ribeiro Rafagnin - UFOB  
Prof. Dr. Tomás Raúl Gómez Hernández - UCLV

**Editor Chefe:** Ivanio Folmer

**Projeto gráfico e Diagramação:** Gabriel Eldereti Machado

**Imagem capa:** www.canva.com

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Tecnologia, Saúde e Meio Ambiente no Contexto  
Amazônico [livro eletrônico] : Abordagens Aplicadas e  
Inovação / [organização] Bruno Mori, Victor Celso C.  
Capibaribe, Geraldo José N. de Vasconcelos. -- 1. ed.  
-- Santa Maria, RS : Arco Editores, 2026.

PDF

Vários autores.

Bibliografia

ISBN 978-65-5417-702-3

1. Tecnologia, 2. Saúde, 3. Meio ambiente,  
4. Amazônia, 5. Inovação. I. Mori, Bruno. II. Capibaribe,  
Victor Celso C. III. Vasconcelos, Geraldo José N. de.

CDD-363.7

**Índices para catálogo sistemático:**

363.7 – Problemas e serviços ambientais)



10.48209/978-65-5417-702-3

*Esta obra foi construída de forma coletiva, reunindo diferentes vozes, experiências e perspectivas. As opiniões expressas nos capítulos são de responsabilidade exclusiva de seus respectivos autores e não representam, necessariamente, a posição desta editora. Esta obra é de acesso aberto. É permitida a reprodução parcial ou total desta obra, desde que citada a fonte e a autoria e respeitando a Licença Creative Commons indicada.*



## APRESENTAÇÃO

A obra *Tecnologia, Saúde e Meio Ambiente no Contexto Amazônico: Abordagens Aplicadas e Inovação*

A Amazônia transcende a definição de mero bioma; é um ecossistema vivo, dinâmico e de complexidade ímpar, no qual os desafios do desenvolvimento humano, da preservação ambiental e da promoção da saúde se entrelaçam diariamente. É exatamente neste cenário — que exige não apenas compreensão, mas também ação transformadora — que nasce a obra *Tecnologia, Saúde e Meio Ambiente no Contexto Amazônico: Abordagens Aplicadas e Inovação*.

Este livro representa um marco histórico e científico de imensurável valor. Ele consolida os frutos de uma iniciativa acadêmico-científica de grande envergadura: o I Congresso Nacional em Ciências, Tecnologia e Saúde da Amazônia do ICET/UFAM, realizado em articulação com o I Encontro Regional de Pedagogia do Médio Amazonas do ICET/UFAM. Trata-se, assim, da primeira obra do Programa de Pós-Graduação em Ciências, Tecnologia e Saúde (PPGCTS), promovida em estreita parceria com o Curso de Pedagogia do Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia (ICET) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Mais do que uma coletânea de artigos, este volume é a materialização do compromisso de produzir um conhecimento que dialoga diretamente com as urgências e as potencialidades da nossa região.

Nos capítulos que compõem esta obra, o leitor encontrará uma verdadeira imersão na interdisciplinaridade. A tríade que dá título ao livro atua como um fio condutor para pesquisas de vanguarda:

**Tecnologia e Inovação:** Não abordadas como conceitos abstratos, mas como ferramentas aplicadas e adaptadas para responder às demandas específicas das populações e da geografia amazônicas.

**Saúde:** Encarada na sua dimensão mais ampla, considerando os determinantes sociais, biológicos e geográficos que impactam a qualidade de vida das comunidades urbanas, ribeirinhas e indígenas.

**Meio Ambiente:** Compreendido não apenas como o espaço a ser preservado, mas como a matriz fundamental que sustenta a vida, a saúde e o desenvolvimento socioeconômico.

A concretização deste projeto, desde as profícuas discussões nos eventos que lhe deram origem até à materialização deste livro, não seria possível sem a confiança e o fomento de parceiros estratégicos. Cumpre-nos, portanto, registrar um profundo e merecido agradecimento às entidades que apoiaram esta iniciativa: a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Federal do Amazonas (PROPESP-UFAM), a MOTOROLA, bem como os Laboratórios de Pesquisa LOGAR e NAVIR do ICET. O apoio destas instituições reitera a importância de unir esforços entre o poder público, a iniciativa privada e as infraestruturas de investigação para o avanço da ciência na região.

O ineditismo desta publicação serve também como um convite e uma inspiração para as futuras gerações. Ela prova que é possível (e necessário) fazer ciência de excelência a partir da Amazônia e para a Amazônia, exportando saberes para o mundo sem perder de vista as nossas raízes.

Convidamos o leitor — seja ele acadêmico, gestor, profissional da saúde, da educação, da tecnologia ou um entusiasta das ciências — a mergulhar nestas páginas. Que as abordagens aqui apresentadas suscitem novas reflexões, fomentem debates construtivos e catalisem inovações em prol de um futuro mais saudável, tecnológico e sustentável.

Boa leitura.  
Os organizadores

# SUMÁRIO

## **CAPÍTULO 1.....9**

### **AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE ALGORITMOS DE BOOSTING E BAGGING PARA DETECÇÃO DE SURTOS DE MALÁRIA NO ESTADO DO AMAZONAS, BRASIL**

Felipe Maklouf Coelho; Alfredo Paulo Oliveira Barros; João Victor Neves Machado da Silva; Vandermi João da Silva; Carlos Alberto de Oliveira Freitas

Doi: 10.48209/978-65-5417-702-0

## **CAPÍTULO 2.....24**

### **CATADORES DE MATERIAIS RECICLÁVEIS: DESAFIOS E POTENCIALIDADES NA INTERFACE ENTRE EDUCAÇÃO, SAÚDE E SUSTENTABILIDADE**

Kalise Nunes Lamêgo; Evely Laranjeira Marques; Katarina Cordovil de Nazaré; Yana Gomes Inhuma; Rute Holanda Lopes

Doi: 10.48209/978-65-5417-702-1

## **CAPÍTULO 3.....38**

### **DEGRADAÇÃO FOTOCATALÍTICA DO CORANTE AZUL DE METILENO UTILIZANDO OS ELETRODOS DE $Ti/TiO_2-Cu_2O$ e $Ti/Cu_2O$**

Fabiana Maria Monteiro Paschoal; Juliana Silva Asevedo Maia; Jamilly Pereira Marques; Evelyn Perlayne Serrão da Silva; Wanderson Gonçalves Trindade

Doi: 10.48209/978-65-5417-702-2

## **CAPÍTULO 4.....52**

### **DESCRIÇÃO DE PROJETOS DE MELHORAMENTO EM ESPÉCIES FLORESTAIS NA REGIÃO NORTE**

Thayanny Nunes de Oliveira Leite; Deolinda Lucianne Ferreira Garcia

Doi: 10.48209/978-65-5417-702-4

## **CAPÍTULO 5.....63**

### **LEVANTAMENTO ETNOBOTÂNICO E ETNOFARMACÊUTICO DE PLANTAS MEDICINAIS EM COMUNIDADES AMAZÔNICAS: UMA REVISÃO DE LITERATURA**

Adriana Paula Farias; Stéfani Ferreira de Oliveira; Kathlem Souza Nelson; Manoele Sofia Farias Coutinho; Maria Paula Biase Fernandes

Doi: 10.48209/978-65-5417-702-5

**CAPÍTULO 6.....77**

**POTENCIAL DE EXTRATOS E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS MADEIREIROS DE *Zygia racemosa* PARA A BIOECONOMIA AMAZÔNICA**

Larissa Castro Rodrigues; Priscila Carvalho Dahmer; Deolinda Lucianne Ferreira Garcia

Doi: 10.48209/978-65-5417-702-6

**CAPÍTULO 7.....91**

**SISTEMA INTELIGENTE EMBARCADO PARA MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM REGIÕES REMOTAS DA AMAZÔNIA**

Alfredo Paulo Oliveira Barros; Felipe de Vasconcelos Assunção; Reyner Carlos Silva Alegria;

Alex Martins Ramos; Carlos Alberto Oliveira de Freitas

Doi: 10.48209/978-65-5417-702-7

**CAPÍTULO 8.....107**

**USO DE ELETRODOS COMBINADOS NA DEGRADAÇÃO DO IMIDACLOPRID POR FOTOCATÁLISE**

Fabiana Maria Monteiro Paschoal; Jamilly Pereira Marques; Juliana Silva Asevedo Maia;

Evelyn Perlayne Serrão da Silva; Rodrigo Bísvaro Nogueira; Wanderson Gonçalves Trindade

Doi: 10.48209/978-65-5417-702-8

**SOBRE OS ORGANIZADORES.....119**

**SOBRE AS AUTORAS E OS AUTORES.....121**

## CAPÍTULO 1

# AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE ALGORITMOS DE BOOSTING E BAGGING PARA DETECÇÃO DE SURTOS DE MALÁRIA NO ESTADO DO AMAZONAS, BRASIL

Felipe Maklouf Coelho  
Alfredo Paulo Oliveira Barros  
João Victor Neves Machado da Silva  
Vandermi João da Silva  
Carlos Alberto de Oliveira Freitas  
Doi: 10.48209/978-65-5417-702-0

**Resumo:** A detecção precoce de surtos de malária na Amazônia é um desafio relevante para a vigilância em saúde, especialmente em contextos com limitações de infraestrutura, dados escassos e alta variabilidade temporal. Neste trabalho, investiga-se a aplicação de modelos preditivos para apoio à identificação de surtos no estado do Amazonas, utilizando dados municipais compostos por variáveis epidemiológicas, climáticas e atributos temporais. Os dados foram organizados com separação temporal estrita entre treino e teste, buscando refletir condições reais de uso em sistemas de monitoramento. Foram avaliadas abordagens baseadas em aprendizado de máquina e modelos de referência, incluindo métodos estatísticos e regras heurísticas de baixo custo computacional. A análise considerou métricas apropriadas para eventos raros, como AUC-ROC, AUC-PR, F1, MAE e Brier Score, em um conjunto de teste composto por 291 observações, das quais 28 correspondem a surtos. Os resultados indicam que a regra baseada em média móvel apresentou desempenho competitivo na identificação de surtos, alcançando os melhores valores de AUC-ROC e F1, enquanto modelos mais complexos, como LightGBM, contribuíram principalmente para a melhoria da calibração probabilística das previsões. Conclui-se que, no contexto amazônico, métodos simples e interpretáveis podem oferecer suporte eficaz à vigilância epidemiológica, enquanto modelos mais sofisticados agregam valor complementar. A integração dessas abordagens pode contribuir para estratégias mais robustas de monitoramento e resposta a surtos em regiões de difícil acesso.

**Palavras-Chaves:** malária; aprendizado de máquina; boosting; bagging; detecção de surtos.

## 1 INTRODUÇÃO

A malária permanece entre os principais desafios de saúde pública da Amazônia brasileira, onde fatores ambientais, climáticos e territoriais ampliam a complexidade da vigilância epidemiológica (ARISCO et al., 2025). No estado do Amazonas, a distribuição espacial dispersa da população e as limitações logísticas dificultam o reconhecimento rápido de mudanças no padrão de transmissão, o que reforça a relevância de ferramentas preditivas orientadas por dados.

Nos últimos anos, a literatura tem mostrado que técnicas de aprendizado de máquina podem contribuir para a previsão de casos de malária quando combinadas a informações epidemiológicas, climáticas e espaciais (MONTEIRO et al., 2025). Entretanto, do ponto de vista operacional, a estimativa do número exato de casos nem sempre é suficiente. Em cenários de vigilância, muitas vezes a necessidade central é identificar com antecedência períodos de risco elevado que exijam reforço de monitoramento, investigação local ou mobilização das equipes de saúde.

Esse problema pode ser formulado como classificação binária de eventos raros, situação em que a distribuição entre classes é desbalanceada e a acurácia deixa de ser uma medida adequada de desempenho (HE; GARCIA, 2009). Nesses contextos, curvas ROC e Precision-Recall, além de métricas como F1 e *Brier Score*, tendem a oferecer leitura mais informativa da utilidade prática do modelo (SAITO; REHMSMEIER, 2015; DAVIS; GOADRICH, 2006).

Neste contexto, o objetivo deste artigo é comparar algoritmos representativos de *bagging* e *boosting* para a detecção de surtos de malária no Amazonas. Para isso, são avaliados os modelos Random Forest, XGBoost e LightGBM em um protocolo com separação temporal estrita, atributos derivados de séries temporais e análise complementar de estabilidade dos resultados. A contribuição principal do trabalho está em organizar uma comparação metodologicamente consistente entre essas famílias de modelos em um problema relevante para a saúde na Amazônia.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A modelagem preditiva em saúde tem avançado com a integração de variáveis ambientais, temporais e territoriais, especialmente em doenças sensíveis ao clima e à sazonalidade. No caso da malária, estudos recentes demonstram que o uso combinado de aprendizado de máquina e organização espacial dos dados pode melhorar a previsão de casos na Amazônia Legal (MONTEIRO et al., 2025). Além disso, evidências epidemiológicas apontam que eventos climáticos extremos e condições meteorológicas influenciam a transmissão da doença (ARISCO et al., 2025).

Do ponto de vista metodológico, a comparação entre métodos de *ensemble* é particularmente relevante para dados tabulares. O Random Forest representa a estratégia clássica de *bagging*, baseada na combinação de árvores independentes para reduzir variância e aumentar robustez (BREIMAN, 2001). Já o *gradient boosting* constrói modelos de forma sequencial, concentrando-se nos erros residuais das etapas anteriores, o que pode gerar maior poder discriminativo em relações não lineares (FRIEDMAN, 2001).

Entre as implementações contemporâneas, o XGBoost se destaca pela eficiência computacional e regularização (CHEN; GUESTRIN, 2016), enquanto o LightGBM apresenta ganho adicional de velocidade por uso de histogramas e partições otimizadas. Estudos com CatBoost também reforçam o potencial de abordagens de *boosting* quando o tratamento de variáveis categóricas e o controle de vazamento de alvo são adequadamente considerados (PROKHORENKOVA et al., 2019).

Em problemas de classes raras, a literatura recomenda cautela na escolha das métricas de avaliação. He e Garcia (2009) argumentam que distribuições desbalanceadas exigem leitura específica do comportamento do modelo sobre a classe minoritária. Revisões posteriores e estudos sistemáticos mostram que o melhor desempenho depende da interação entre separabilidade dos dados, proporção da classe rara e estratégia de reamostragem ou ponderação (BRANCO; TORGO; RIBEIRO, 2015; JOHNSON; KHOSHGOFTAAR, 2019; BUDA; MAKI; MAZUROWSKI, 2018). Nessa linha, Saito e Rehmsmeier (2015) mos-

tram que a curva Precision-Recall pode ser mais informativa do que a ROC quando a prevalência do evento é baixa.

Assim, a fundamentação teórica deste estudo combina dois eixos. O primeiro é epidemio- lógico, ao reconhecer que a malária no Amazonas responde à interação entre dinâmica recente de casos e condições climáticas. O segundo é computacional, ao assumir que a comparação entre *bagging*, *boosting* e baselines simples deve ser realizada com protocolo temporal rigoroso e com métricas apropriadas para eventos raros. Nesse contexto, a literatura indica que regras transparentes e modelos clássicos permanecem referências relevantes quando o número de eventos é pequeno e a variância das métricas é elevada.

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Caracterização do estudo**

O estudo possui natureza aplicada, abordagem quantitativa e finalidade comparativa. O problema foi modelado em duas tarefas paralelas: regressão para estimar o número mensal de casos e classificação binária para detectar surtos. Neste trabalho, considera-se surto a ocorrência de valor mensal acima do percentil 0,9 da série histórica do respectivo município, desde que o total de casos seja positivo, conforme a Equação 1. O uso desse quantil tem caráter operacional e foi adotado para normalizar escalas distintas entre municípios sem depender de um limiar absoluto único. Ainda assim, sua sensibilidade foi avaliada adicionalmente nos quantis 0,85 e 0,95.

$$\text{surto}_t = \mathbb{I}(y_t^{0,9} \geq Q^{(m)} \wedge y_t > 0)$$

(1) Em que  $y_t$  representa o número de casos no tempo  $t$ ,  $Q^{(m)}$  corresponde ao percentil 0,9 da série do município  $m$  e  $\mathbb{I}$  denota a função indicadora.

## 3.2 Dados e engenharia de atributos

Foram utilizados dados municipais do estado do Amazonas, com variáveis epidemiológicas e climáticas previamente processadas. O procedimento incluiu ordenação temporal por município, geração de *lags*, médias móveis, tendência, componentes sazonais senoidais/cossenoidais e interações entre clima e incidência. As variáveis de média móvel e tendência foram derivadas exclusivamente de séries defasadas em um período, de modo a utilizar apenas informações anteriores ao mês de previsão. Também foi aplicado tratamento de valores extremos por *capping* baseado em *z-score* dentro de cada município.

Figura 1 -Estrutura geral de ingestão, modelagem e avaliação.



Fonte: elaboração própria, com base nos experimentos do estudo.

A Figura 1 sintetiza a organização do estudo em quatro etapas. A primeira corresponde à ingestão e ao pré-processamento dos dados, em que são integradas séries históricas municipais de casos de malária e variáveis climáticas, seguidas por rotinas de limpeza, imputação, normalização e engenharia de atributos, com destaque para defasagens temporais, médias móveis construídas apenas com informação passada e rotulagem de surtos a partir do quantil de 90%. A segunda etapa corresponde à modelagem, com validação cruzada temporal por *TimeSeriesSplit* e busca de hiperparâmetros por *GridSearchCV*, em um conjunto comparativo composto por Random Forest, XGBoost, LightGBM e modelos de referência. A terceira etapa reúne a avaliação do desempenho na regressão, por meio de MAE e RMSE, e na

classificação de surtos, por meio de matriz de confusão, AUC-ROC, PR-AUC, curva Precision-Recall, calibração e análise de importância global via SHAP. A quarta etapa corresponde à interpretação dos resultados, com análise por município, custo operacional de alertas e visualizações temporais das previsões.

### 3.3 Modelos e protocolo experimental

Foram comparados três algoritmos amplamente utilizados em dados tabulares: Random Forest, XGBoost e LightGBM. O Random Forest foi adotado como referência da família *bagging*, enquanto XGBoost e LightGBM representaram a família *boosting*. Também foram incluídos três modelos de referência: um modelo linear (Ridge na regressão e regressão logística na classificação), uma regra heurística baseada em média móvel de casos e um modelo SARIMA por município. O treinamento considerou ajuste de pesos para a classe minoritária, visando reduzir o impacto do desbalanceamento.

A separação entre treino e teste foi temporal e estrita: os anos anteriores a 2024 foram usados para treinamento, enquanto 2024 em diante compuseram o teste final. No conjunto de teste, foram observadas 291 instâncias, sendo 28 surtos e 263 não surtos. A busca de hiperparâmetros foi realizada por *grid search* com *TimeSeriesSplit* de três divisões no conjunto de treino.

Tabela 1 -Resumo da configuração experimental.

Componente	Configuração	Observação
Validação	<i>TimeSeriesSplit</i> (3 dobras)	Preserva ordem temporal
Treino principal	Anos anteriores a 2024	Ajuste de modelos e limiar
Teste principal	Anos de 2024 em diante	Avaliação final
Classe minoritária	28 surtos em 291 observações	9,62% do teste
Limiar de decisão	Máximo F1 na validação	Aplicado sem reajuste no teste

Fonte: elaboração própria.

Para manter comparabilidade entre as famílias de modelos e custo computacional viável, foi utilizado um espaço de busca reduzido, suficiente para uma comparação controlada, embora não exaustiva. Esse procedimento permitiu avaliar os algoritmos sob o mesmo protocolo temporal e o mesmo espaço experimental, sem privilegiar ajuste fino extensivo de um modelo específico. Buscas mais amplas, incluindo estratégias aleatórias ou bayesianas, permanecem como possibilidade de aprofundamento em trabalhos futuros.

Outra decisão importante foi priorizar ponderação da classe minoritária durante o treinamento, em vez de reamostragem sintética. Essa escolha buscou preservar a estrutura temporal dos dados, embora estratégias como SMOTE e aprendizado custo-sensível permaneçam relevantes como referência metodológica e comparação futura (CHAWLA et al., 2002; ELKAN, 2001).

Tabela 2 -Grade resumida de hiperparâmetros utilizada na busca.

Modelo/Tarefa	Hiperparâmetro	Valores
XGBoost	n_estimators	{100, 200}
XGBoost	learning_rate	{0,01; 0,05}
XGBoost	max_depth	{3, 5}
LightGBM	n_estimators	{100, 200}
LightGBM	learning_rate	{0,01; 0,05}
LightGBM	max_depth	{3, 5}
Random Forest	n_estimators	{100, 200}
Random Forest	max_depth	{5, 10}

Fonte: elaboração própria com base no protocolo experimental.

### 3.4 Métricas de avaliação

Na regressão, foram consideradas as métricas MAE e RMSE. Na classificação, foram usadas AUC-ROC, AUC-PR, F1 e *Brier Score*. As duas primeiras foram tratadas como métricas principais por serem independentes de limiar e mais adequadas para comparação global entre modelos em cenários de baixa prevalência. O F1 foi mantido como medida complementar de utilidade operacional, enquanto o *Brier Score* foi utilizado para avaliar qualidade probabilística. Nas comparações pareadas de AUC-ROC e AUC-PR, a incerteza na diferença entre métricas foi examinada por intervalos de confiança *bootstrap*

com 500 reamostragens, considerando-se evidência de diferença quando o intervalo de 95% não incluía zero.

Além das métricas principais no recorte base, foram consideradas análises complementares de calibração, sensibilidade ao quantil de definição de surto, importância de atributos, custo operacional de falsos alertas, análise por município e robustez temporal anual. Essas extensões permitem interpretar não apenas qual modelo apresenta melhor desempenho, mas também quão estável e operacionalmente utilizável ele permanece quando o regime temporal, a formulação do alvo ou o custo relativo entre erros se altera.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

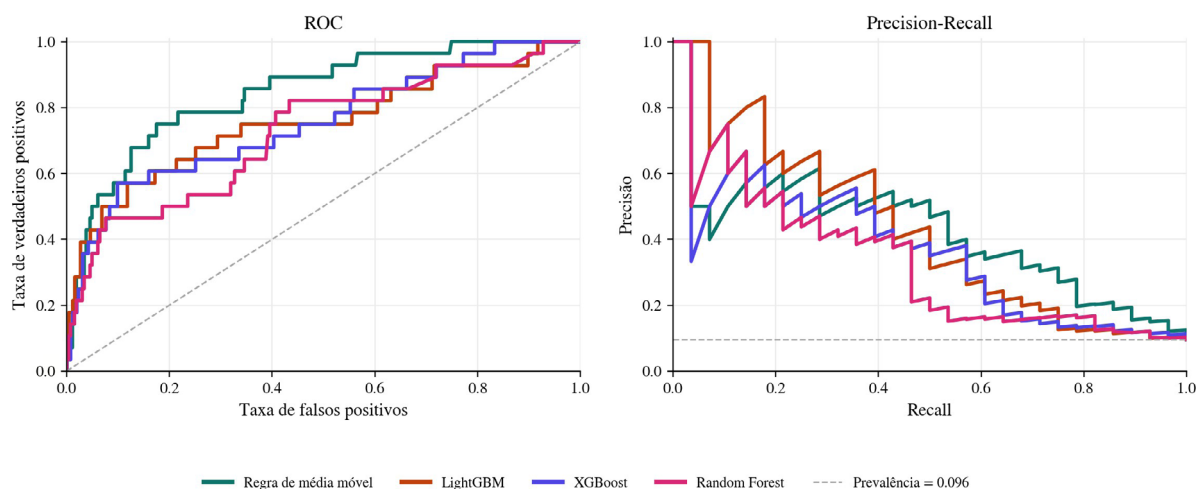
A Tabela 3 apresenta a síntese quantitativa dos resultados no conjunto de teste temporal. A regra simples baseada em média móvel apresentou a maior AUC-ROC e o maior F1 observados, enquanto entre os modelos de aprendizado de máquina não houve separação nítida em discriminação. O LightGBM apresentou a melhor calibração probabilística entre os modelos ajustados, com a maior AUC-PR e o menor *Brier Score*. A Figura 2 complementa essa leitura ao comparar explicitamente as curvas ROC e Precision-Recall dos modelos centrais.

Tabela 3 -Desempenho comparativo dos modelos no conjunto de teste, com IC95% *bootstrap* para AUC-ROC e AUC-PR.

Modelo	AUC-ROC [IC95%]	AUC-PR [IC95%]	Brier	F1	Precisão	Recall	MAE
Regra de média móvel	0,846 [0,781–0,915]	0,417 [0,270–0,583]	0,119	0,462	0,405	0,536	64,63
LightGBM	0,755 [0,627–0,851]	0,423 [0,205–0,619]	0,074	0,213	0,123	0,786	53,11
XGBoost	0,756 [0,653–0,844]	0,358 [0,192–0,548]	0,090	0,250	0,153	0,679	52,85
Random Forest	0,726 [0,585–0,807]	0,327 [0,164–0,526]	0,079	0,265	0,163	0,714	54,78
Baseline linear	0,657 [0,544–0,739]	0,196 [0,123–0,381]	0,216	0,241	0,146	0,679	70,15
SARIMA	0,631 [0,517–0,735]	0,138 [0,094–0,226]	0,154	0,089	0,118	0,071	132,44

Fonte: elaboração própria a partir dos relatórios experimentais.

Figura 2 -Curvas ROC e Precision-Recall para os principais modelos avaliados no teste temporal. Linhas tracejadas indicam a referência aleatória na ROC e a prevalência observada na curva Precision-Recall.



Fonte: elaboração própria a partir das probabilidades preditas no conjunto de teste.

Os resultados reforçam dois pontos principais. Primeiro, sinais epidemiológicos simples continuam carregando parte substantiva da informação útil para alertas, o que explica o bom desempenho da regra de média móvel. Segundo, variáveis climáticas não se mostraram suficientes de forma isolada, mas agregaram valor quando combinadas aos atributos epidemiológicos. Esse comportamento é coerente com a literatura que descreve a transmissão de malária como fenômeno dependente de múltiplos fatores ambientais e temporais (ARISCO et al., 2025).

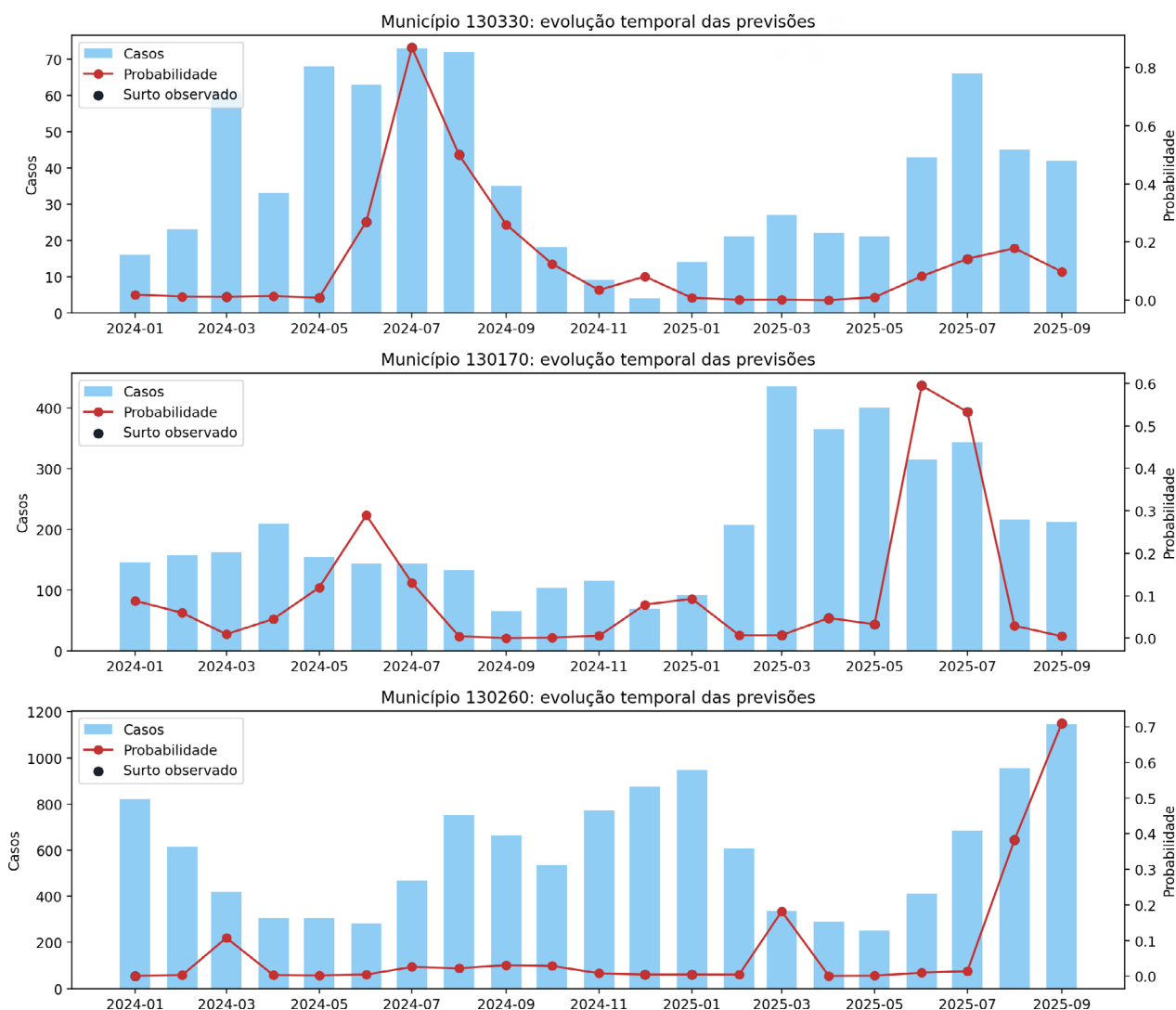
Em leitura conjunta das métricas, a principal diferença entre os modelos passa a ser operacional. A regra de média móvel apresentou maior equilíbrio entre precisão e *recall* no teste, enquanto o LightGBM concentrou a melhor qualidade probabilística. XGBoost e Random Forest permaneceram próximos do LightGBM em discriminação, sem diferença estatística clara nas comparações pareadas. Em particular, LightGBM e XGBoost permaneceram estatisticamente empatados em AUC-ROC e AUC-PR, e a regra de média móvel também permaneceu estatisticamente empatada com esses modelos mais complexos.

Esse padrão é consistente com a literatura que recomenda priorizar curvas Precision- Recall e medidas de calibração em classes raras, em vez de indicadores agregados simplificados (SAITO; REHMSMEIER, 2015;

DAVIS; GOADRICH, 2006). Os resultados reforçam, portanto, a importância de comparar modelos complexos com referências simples e transparentes em cenários de baixa prevalência.

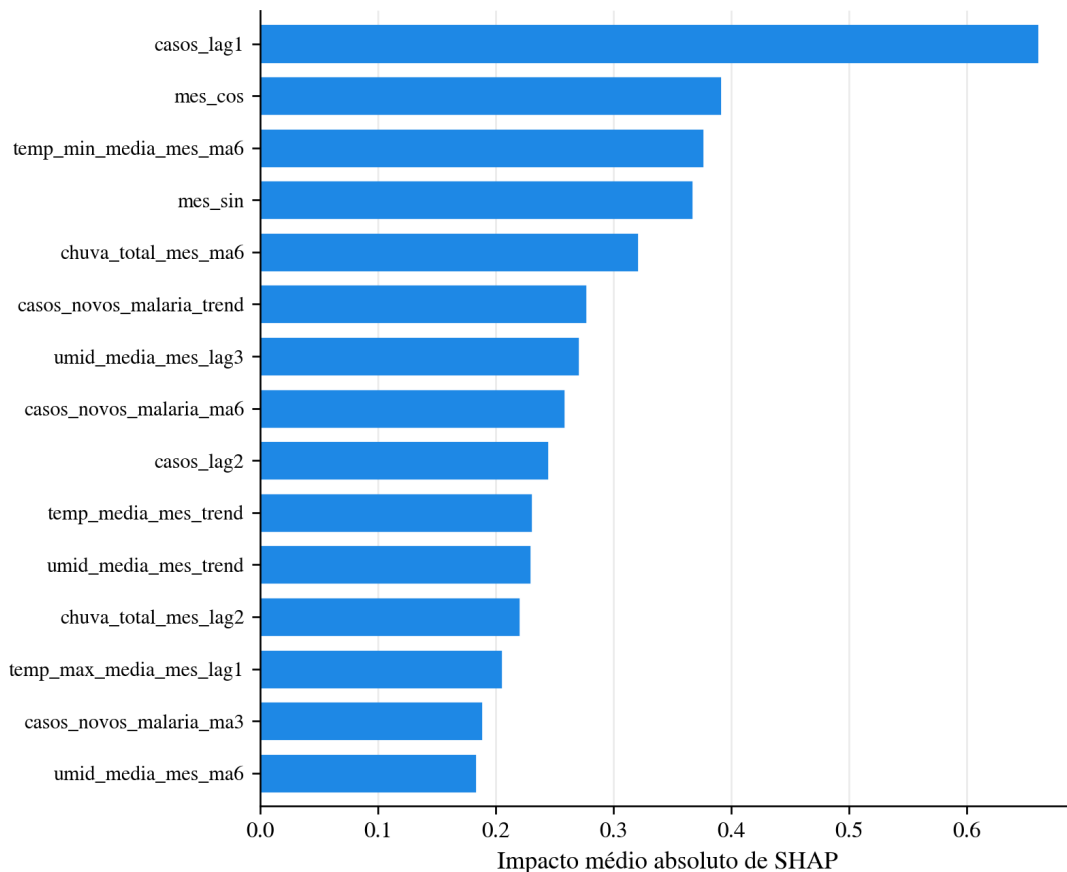
Do ponto de vista operacional, também foi avaliado um custo simples em que o peso do falso negativo varia entre uma e dez vezes o peso do falso positivo. Quando os dois erros têm o mesmo peso, a regra de média móvel apresenta o menor custo total. Quando o custo de perder um surto cresce, o XGBoost passa a oferecer o menor custo total, seguido de perto pelo LightGBM. Isso evidencia que a escolha do modelo depende do cenário institucional de uso, e não apenas de uma métrica agregada.

Figura 3 -Exemplos de evolução temporal das previsões probabilísticas do LightGBM em municípios com surtos no período de teste.



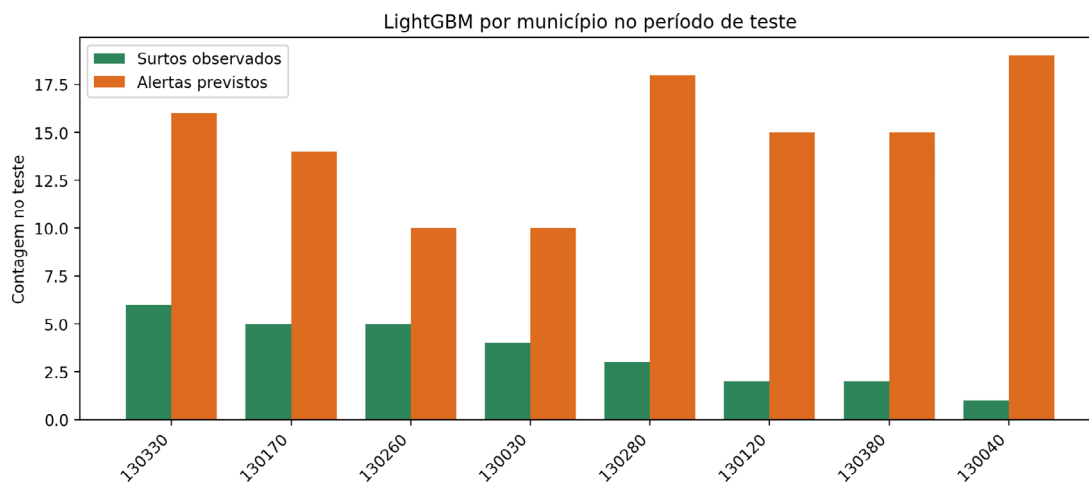
Fonte: elaboração própria.

Figura 4 -Importância global por SHAP no classificador LightGBM.



Fonte: elaboração própria.

Figura 5 -Heterogeneidade do desempenho do LightGBM por município no período de teste.



Fonte: elaboração própria.

## 4.1 Análise complementar

A análise de explicabilidade por SHAP mostrou que o atributo mais importante do LightGBM foi `casos_lag1`, seguido por componentes sazonais como `mes_cos` e `mes_sin` e por agregados climáticos como `temp_min_media_mes_ma6` e `chuva_total_mes_ma6`. Isso indica que a maior parte do sinal está concentrada na memória curta da série, modulada por sazonalidade e contexto ambiental.

Os testes de ablação e de robustez temporal reforçaram essa interpretação. O uso isolado de variáveis climáticas gerou desempenho fraco, enquanto o bloco epidemiológico isolado preservou parte relevante da capacidade discriminativa e alcançou o maior F1 entre as variantes do LightGBM. Ainda assim, a configuração completa foi a melhor em AUC-ROC, AUC-PR e *Brier Score*, sugerindo que clima e sazonalidade agregam valor principalmente em ordenação probabilística e calibração.

Tabela 4 -Resumo de ablação, robustez temporal e sensibilidade do alvo. IC95% *bootstrap* são informados nas linhas de sensibilidade do quantil, para as quais havia reamostragens disponíveis.

Cenário	ROC-AUC	PR-AUC	F1	Brier
Completo	0,755	0,432	0,213	0,074
Sem interações	0,709	0,345	0,190	0,078
Epidemiológico apenas	0,721	0,352	0,388	0,108
Climático apenas	0,545	0,239	0,198	0,110
Clima + epidemiologia	0,709	0,345	0,190	0,078
Robustez 2023	0,678	0,286	0,194	0,092
Robustez 2024	0,682	0,368	0,186	0,082
Robustez 2025	0,790	0,304	0,218	0,108
Quantil 0,85	0,701 [0,591–0,775]	0,312 [0,167–0,485]	0,238	0,135
Quantil 0,90	0,755 [0,627–0,851]	0,423 [0,205–0,619]	0,213	0,074
Quantil 0,95	0,751 [0,631–0,834]	0,237 [0,063–0,496]	0,232	0,063

Fonte: elaboração própria a partir dos relatórios de ablação, robustez temporal e sensibilidade do alvo.

Os valores da Tabela 4 mostram que o quantil 0,90 oferece o melhor compromisso entre discriminação e prevalência operacional da classe positiva. Ao mesmo tempo, o teste anual revela grande oscilação do F1 e dos limiares selecionados, o que confirma a existência de alta variância nas métricas sensíveis a limiar quando o conjunto de teste possui apenas 28 surtos.

Em termos interpretativos, os resultados indicam que, em um cenário com poucos eventos positivos, alta variância e dependência temporal, a comparação sistemática com modelos de referência é central para a interpretação dos achados.

Assim, a contribuição do trabalho deve ser interpretada como evidência aplicada e contextualizada, e não como uma afirmação universal sobre superioridade de algoritmos em diferentes cenários epidemiológicos.

Estrutura do estudo foi mantida modular, com separação entre pré-processamento, treinamento e análise dos resultados. Essa organização favorece reprodutibilidade e reavaliação em novas janelas temporais. Em cenários de uso real, recomenda-se complementar o modelo com monitoramento de deriva, recalibração de limiares e rastreabilidade de versões, em sintonia com recomendações de governança para IA em saúde (World Health Organization, A 2024).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo comparou algoritmos de *bagging*, *boosting* e modelos de referência para detecção de surtos de malária no estado do Amazonas com base em um protocolo temporal rigoroso. A regra de média móvel mostrou desempenho competitivo e, em algumas métricas operacionais, superior aos modelos de aprendizado de máquina. Entre os modelos ajustados, LightGBM e XGBoost permaneceram estatisticamente próximos em discriminação, enquanto o LightGBM apresentou a melhor calibração probabilística. Os resultados reforçam que, em cenários de baixa prevalência, modelos simples devem ser considerados como referência obrigatória em avaliações comparativas.

Como implicação prática, a aplicação desses modelos pode contribuir para orientar monitoramento preventivo, priorização territorial e revisão de limiares de risco em rotinas de vigilância, mas a escolha do modelo deve refle-

tir explicitamente o custo relativo entre falsos positivos e falsos negativos. O uso operacional deve permanecer vinculado à avaliação técnica das equipes de saúde, com monitoramento contínuo de desempenho, recalibração periódica e transparência sobre os critérios de decisão.

Como trabalhos futuros, recomenda-se ampliar a validação para diferentes recortes geográficos, incorporar critérios epidemiológicos formais de surto, explorar calibração probabilística formal e comparar o ajuste por peso de classe com técnicas de reamostragem e abordagens custo-sensíveis, como SMOTE e aprendizado custo-sensível (CHAWLA et al., 2002; ELKAN, 2001). Também são relevantes estudos com múltiplos anos, deriva de atributos, monitoramento de prevalência e estabilidade da taxa de alertas por município. Essas extensões podem fortalecer a robustez metodológica e a aplicabilidade do sistema em outros cenários amazônicos.

## **6 REFERÊNCIAS**

ARISCO, N. J. et al. The impact of weather and extreme events on malaria transmission in the brazilian amazon: A case-crossover and population-based study. *The Lancet Regional Health – Americas*, v. 49, 2025.

BRANCO, P.; TORGO, L.; RIBEIRO, R. *A Survey of Predictive Modelling under Imbalanced Distributions*. 2015. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1505.01658>>.

BREIMAN, L. Random forests. *Machine Learning*, v. 45, n. 1, p. 5–32, 2001.

BUDA, M.; MAKI, A.; MAZUROWSKI, M. A. A systematic study of the class imbalance problem in convolutional neural networks. *Neural Networks*, v. 106, p. 249–259, 2018.

CHAWLA, N. V. et al. Smote: Synthetic minority over-sampling technique. *Journal of Artificial Intelligence Research*, v. 16, p. 321–357, 2002.

CHEN, T.; GUESTRIN, C. Xgboost: A scalable tree boosting system. In: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 785–794.

DAVIS, J.; GOADRICH, M. The relationship between precision-recall and roc curves. In: *Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 233–240.

ELKAN, C. The foundations of cost-sensitive learning. In: *International Joint Conference on Artificial Intelligence*. [S.l.: s.n.], 2001. v. 17, n. 1, p. 973–978.

FRIEDMAN, J. H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *The Annals of Statistics*, v. 29, n. 5, p. 1189–1232, 2001.

HE, H.; GARCIA, E. A. Learning from imbalanced data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, v. 21, n. 9, p. 1263–1284, 2009.

JOHNSON, J. M.; KHOSHGOFTAAR, T. M. Survey on deep learning with class imbalance. *Journal of Big Data*, v. 6, n. 1, p. 27, 2019.

MONTEIRO, K. H. d. C. et al. Integrating machine learning and spatial clustering for malaria case prediction in brazil's legal amazon. *BMC Infectious Diseases*, v. 25, n. 1, p. 802, 2025.

PROKHORENKOVA, L. et al. *CatBoost: Unbiased Boosting with Categorical Features*. 2019. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1706.09516>>.

SAITO, T.; REHMSMEIER, M. The precision-recall plot is more informative than the roc plot when evaluating binary classifiers on imbalanced datasets. *PLOS ONE*, v. 10, n. 3, p. e0118432, 2015.

World Health Organization. *Ethics and Governance of Artificial Intelligence for Health: Large Multi-Modal Models. WHO Guidance*. [S.l.]: World Health Organization, 2024.

## CAPÍTULO 2

# CATADORES DE MATERIAIS RECICLÁVEIS: DESAFIOS E POTENCIALIDADES NA INTERFACE ENTRE EDUCAÇÃO, SAÚDE E SUSTENTABILIDADE

Kalise Nunes Lamêgo

Evely Laranjeira Marques

Katarina Cordovil de Nazaré

Yana Gomes Inhumá

Rute Holanda Lopes

Doi: 10.48209/978-65-5417-702-1

**Resumo:** O presente estudo analisa o papel dos catadores de materiais recicláveis no Brasil, destacando suas contribuições para a economia circular e os desafios estruturais que limitam sua valorização social e institucional. Embora desempenhem função estratégica na gestão de resíduos sólidos, esses trabalhadores permanecem inseridos em um contexto de vulnerabilidade caracterizado pela informalidade, precarização das condições de trabalho e exposição a riscos ocupacionais. A pesquisa tem como objetivo compreender como a integração entre educação, saúde e sustentabilidade pode promover o empoderamento e a inclusão social dos catadores. Trata-se de um estudo qualitativo, de natureza exploratória e descritiva, baseado em revisão bibliográfica interdisciplinar, com apoio em autores como Freire, Leff, Castel e Sachs, além de documentos institucionais como a Política Nacional de Resíduos Sólidos e relatórios do IPEA. Os resultados indicam que os catadores exercem papel central no reaproveitamento de resíduos, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para a consolidação de práticas sustentáveis, ainda que enfrentem limitações decorrentes da fragilidade das políticas públicas. Evidencia-se que a organização coletiva, por meio de cooperativas, fortalece a inclusão produtiva e amplia o acesso a direitos, enquanto a educação popular e a educação ambiental crítica configuram-se como instrumentos fundamentais para a formação cidadã e o protagonismo social. Conclui-se que a articulação entre políticas de educação, saúde e meio ambiente é essencial para a construção de modelos de governança mais inclusivos, capazes de promover justiça socioambiental e reconhecer os catadores como agentes centrais do desenvolvimento sustentável.

**Palavras-chave:** Catadores de materiais recicláveis; Sustentabilidade; Educação popular; Saúde do trabalhador; Inclusão social.

## **1 INTRODUÇÃO**

A atividade dos catadores de materiais recicláveis constitui um elemento central na cadeia da reciclagem e na economia circular brasileira, sendo responsável por parcela significativa dos resíduos reaproveitados, conforme apontam estudos do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2017). Apesar dessa relevância socioambiental, esses trabalhadores permanecem inseridos em um contexto de vulnerabilidade marcado pela informalidade, baixos rendimentos, ausência de reconhecimento institucional e exposição a riscos ocupacionais.

No Brasil, a gestão de resíduos sólidos ainda apresenta limitações estruturais relacionadas à destinação inadequada e à baixa cobertura da coleta seletiva, o que reforça o papel estratégico dos catadores na mitigação desses problemas. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) reconhece a importância dessa atividade, embora sua efetiva inclusão nas políticas públicas ainda ocorra de forma desigual e insuficiente.

Nesse contexto, evidencia-se uma contradição entre os avanços na sustentabilidade ambiental e a persistência de desigualdades sociais que atingem diretamente os catadores. Conforme Bosi (2008), a associação histórica dessa atividade à pobreza e à informalidade revela tensões entre a valorização ambiental da reciclagem e a invisibilidade social dos trabalhadores que a sustentam.

A problematização do tema se insere justamente nessa dualidade, na qual práticas ambientalmente sustentáveis coexistem com condições precárias de trabalho e exclusão social. Tal realidade evidencia a fragilidade das políticas públicas na articulação entre dimensões sociais, econômicas e ambientais, apontando para a necessidade de abordagens integradas.

A relevância deste estudo reside na compreensão das inter-relações entre educação, saúde e sustentabilidade no contexto da catação, contribuindo para o avanço do debate acadêmico e para a formulação de políticas públicas mais eficazes. Sob o ponto de vista social, busca-se valorizar esses trabalhadores,

enquanto, sob o aspecto ambiental, destaca-se sua contribuição para práticas sustentáveis.

Do ponto de vista teórico, o estudo dialoga com a ecologia política ao considerar a sustentabilidade como um processo que integra saberes locais, equidade social e prudência ecológica, conforme Leff (2001) e Sachs (2008). Nessa perspectiva, a educação ambiental crítica e a educação popular, conforme Jacobi (2003) e Gohn (2011), configuram-se como instrumentos fundamentais para o fortalecimento da cidadania e do protagonismo dos catadores.

Diante desse cenário, o estudo tem como objetivo analisar de que forma a articulação entre educação, saúde e sustentabilidade pode contribuir para o empoderamento e a valorização dos catadores, promovendo sua inclusão social e produtiva. Para isso, busca-se compreender as vulnerabilidades associadas à atividade, bem como o papel das práticas educativas na formação cidadã desses trabalhadores.

Além disso, a pesquisa propõe discutir a relação entre condições de trabalho e saúde dos catadores, evidenciando os impactos da precarização laboral e da ausência de políticas estruturadas de proteção. Também analisa o potencial das práticas associativas e das políticas públicas na promoção da sustentabilidade e da justiça socioambiental, contribuindo para uma abordagem interdisciplinar voltada à construção de alternativas de desenvolvimento sustentável com inclusão social.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Catadores e exclusão social**

A inserção dos catadores de materiais recicláveis no contexto urbano brasileiro está diretamente associada a processos históricos de exclusão social, nos quais determinados grupos são sistematicamente afastados das estruturas formais de trabalho e proteção social. Nesse sentido, Castel (1998) interpreta a exclusão como resultado de dinâmicas de desfiliação, caracterizadas pela fragilidade dos vínculos sociais e pela precarização das relações

laborais, o que se evidencia nas condições de informalidade predominantes na atividade da catação.

Essa realidade se intensifica no contexto das transformações contemporâneas do mundo do trabalho, marcado pela flexibilização e pela perda de direitos, conforme discutido por Antunes (2009). Para o autor, a precarização laboral se expressa na ampliação de formas de trabalho instáveis e desprovidas de garantias, o que se aplica diretamente aos catadores, cuja atividade, embora essencial para a sustentabilidade urbana, permanece socialmente desvalorizada e economicamente vulnerável.

Além disso, Bosi (2008) destaca que a organização social dos catadores reflete tanto estratégias de sobrevivência quanto formas emergentes de resistência, evidenciando que, mesmo em contextos adversos, esses trabalhadores constroem redes de solidariedade e práticas coletivas. Essa dualidade entre exclusão e resistência constitui elemento central para compreender a complexidade da atividade de catação no Brasil.

## **2.2 Sustentabilidade e economia circular**

A discussão sobre sustentabilidade, no contexto da gestão de resíduos sólidos, exige uma abordagem que ultrapasse dimensões estritamente técnicas e incorpore aspectos sociais e econômicos. Leff (2001) propõe uma concepção de sustentabilidade baseada na integração entre saberes ambientais, justiça social e racionalidade ecológica, destacando a importância de reconhecer práticas locais como parte fundamental da construção de modelos sustentáveis.

Complementarmente, Sachs (2008) defende que o desenvolvimento sustentável deve ser compreendido a partir de uma perspectiva multidimensional, articulando inclusão produtiva, equidade social e preservação ambiental. Essa abordagem permite situar os catadores como agentes estratégicos na economia circular, na medida em que sua atuação contribui diretamente para o reaproveitamento de materiais e a redução da pressão sobre os recursos naturais.

No contexto brasileiro, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) representa um marco normativo ao reconhecer a importância dos

catadores na gestão integrada de resíduos, incentivando sua inclusão em sistemas formais de coleta seletiva. Essa diretriz também se alinha aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), especialmente àqueles relacionados à redução das desigualdades, consumo responsável e cidades sustentáveis.

## **2.3 Educação popular e emancipação**

A educação, sob a perspectiva da transformação social, é compreendida como instrumento fundamental para a construção da autonomia e da cidadania, especialmente em contextos de vulnerabilidade. Freire (1996) propõe uma pedagogia baseada no diálogo e na valorização do saber popular, na qual o processo educativo se orienta pela conscientização crítica e pela capacidade dos sujeitos de intervir em sua própria realidade.

Essa abordagem é particularmente relevante no contexto dos catadores, pois possibilita a construção de processos formativos que ultrapassam a dimensão técnica e incorporam elementos de emancipação social. Nesse sentido, Jacobi (2003) destaca que a educação ambiental crítica deve promover a participação ativa dos sujeitos na construção de soluções sustentáveis, articulando conhecimento e prática social.

De forma complementar, Gohn (2011) enfatiza o papel da educação popular como instrumento de transformação, ao integrar saberes locais e científicos na construção de práticas coletivas e participativas. Essa perspectiva reforça a importância de processos educativos que contribuam para o fortalecimento das organizações de catadores e para a ampliação de seu protagonismo social e político.

## **2.4 Saúde do trabalhador**

A saúde do trabalhador constitui uma dimensão essencial na análise da atividade dos catadores, considerando os múltiplos riscos ocupacionais aos quais estão expostos. Estudos da Fiocruz (2013) indicam que esses trabalhadores enfrentam condições insalubres, incluindo exposição a agentes biológicos,

químicos e físicos, além de riscos ergonômicos decorrentes de esforço repetitivo e transporte manual de cargas.

A Funasa (2010) reforça que a ausência de equipamentos de proteção individual e de acompanhamento médico adequado agrava a vulnerabilidade desses trabalhadores, contribuindo para o desenvolvimento de doenças ocupacionais e problemas crônicos de saúde.

Esse cenário evidencia a necessidade de políticas públicas específicas voltadas à promoção da saúde e à prevenção de riscos no ambiente de trabalho.

Além dos aspectos físicos, a saúde dos catadores também envolve dimensões psicossociais, relacionadas à estigmatização e à desvalorização social da atividade. Nesse contexto, a integração entre políticas de saúde, educação e assistência social torna-se fundamental para a promoção de condições dignas de trabalho e para a melhoria da qualidade de vida desses trabalhadores.

### **3 METODOLOGIA**

A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, de natureza exploratória e descritiva, fundamentada em revisão bibliográfica interdisciplinar, o que possibilita a compreensão aprofundada de fenômenos sociais complexos, como a realidade dos catadores de materiais recicláveis. Essa abordagem permite a articulação de diferentes perspectivas teóricas e institucionais, conforme orienta Demo (2011), ao tratar da construção do conhecimento científico em contextos sociais.

O levantamento bibliográfico contemplou obras clássicas e contemporâneas relacionadas à educação emancipatória, sustentabilidade, exclusão social e saúde do trabalhador, com destaque para Freire (1996), Leff (2001) e Castel (1998). Além disso, foram utilizados relatórios institucionais da Fio-cruz (2013), da Funasa (2010) e do IPEA (2012; 2017), bem como documentos normativos como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), dada sua relevância para a gestão de resíduos e inclusão dos catadores.

Os materiais foram selecionados com base na relevância temática, consistência teórica e atualidade, priorizando estudos que dialogam diretamente com a interface entre educação, saúde e sustentabilidade. Essa seleção também considerou documentos institucionais com reconhecida legitimidade no contexto brasileiro, especialmente aqueles voltados à análise das condições de trabalho e organização social dos catadores.

O procedimento analítico adotado foi interpretativo, utilizando a análise temática proposta por Bardin (2011), o que permitiu identificar e sistematizar categorias analíticas a partir do conteúdo das obras. Esse processo envolveu leitura exploratória, categorização e interpretação à luz do referencial teórico, possibilitando a construção de uma análise crítica e articulada.

As categorias analíticas definidas incluíram vulnerabilidade social, educação emancipatória, saúde do trabalhador e sustentabilidade, permitindo compreender de forma integrada as múltiplas dimensões do fenômeno estudado. A análise dessas categorias, fundamentada em autores como Freire (1996), Leff (2001) e Sachs (2008), evidenciou as inter-relações entre exclusão social, condições de trabalho e práticas sustentáveis, resultando em uma interpretação crítica e consistente da realidade dos catadores.

## **4 RESULTADOS**

Os achados da pesquisa indicam que os catadores constituem o principal elo operacional da cadeia da reciclagem no Brasil, sendo responsáveis por parcela majoritária dos materiais efetivamente reaproveitados, conforme evidenciado por estudos do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2017). Esse protagonismo reforça a centralidade desses trabalhadores na economia circular, contribuindo para a redução de custos na gestão de resíduos e para a mitigação de impactos ambientais, em consonância com os princípios da sustentabilidade discutidos por Leff (2001) e Sachs (2008).

No plano econômico, a atuação dos catadores revela-se estratégica ao promover a reinserção de materiais no ciclo produtivo, reduzindo a extração de recursos naturais e fortalecendo práticas de reaproveitamento, conforme argumenta Demajorovic (2011) ao analisar o papel das cooperativas na sus-

tentabilidade. Essa dinâmica evidencia que, mesmo inseridos em contextos de informalidade, os catadores desempenham função essencial na geração de valor econômico, ainda que marcada por instabilidade e ausência de garantias trabalhistas, conforme problematizado por Antunes (2009) ao discutir as transformações do trabalho contemporâneo.

Sob a perspectiva ambiental, os resultados demonstram que os catadores atuam como agentes fundamentais na consolidação de práticas sustentáveis, contribuindo diretamente para a redução da poluição urbana e para a efetivação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). Nessa direção, Leff (2001) destaca que a sustentabilidade depende da integração entre práticas sociais e saberes ambientais, o que se materializa na atuação cotidiana desses trabalhadores na gestão dos resíduos sólidos.

No âmbito social, verifica-se que a atividade da catação está inserida em um cenário de fragilidade estrutural, caracterizado por baixos níveis de escolaridade, precarização das condições de trabalho e ausência de reconhecimento profissional, conforme apontam estudos da Fiocruz (2013) e da Funasa (2010). Esse contexto reflete o que Castel (1998) define como processos de desfiliação social, nos quais grupos vulneráveis permanecem à margem das estruturas formais de proteção social.

A análise dos dados permite organizar os resultados em três categorias centrais, sendo a primeira a fragilidade estrutural, marcada pela informalidade e pela insuficiência de políticas públicas efetivas voltadas à proteção desses trabalhadores. Essa condição reforça a necessidade de intervenções estatais que promovam inclusão social e garantia de direitos, conforme indicado pelo IPEA (2017) ao analisar o perfil socioeconômico dos catadores no Brasil.

A segunda categoria refere-se ao potencial organizativo, evidenciado pelo fortalecimento das cooperativas e associações de catadores, que ampliam o poder de negociação e o acesso a políticas públicas, conforme destaca Demajorovic (2011). Nesse sentido, Singer (2002) argumenta que a economia solidária constitui uma alternativa ao modelo tradicional de organização do trabalho, promovendo autogestão, cooperação e distribuição mais equitativa dos resultados.

A terceira categoria diz respeito à inclusão produtiva, observada na ampliação de iniciativas de capacitação, alfabetização e formação cidadã, muitas vezes apoiadas por universidades e instituições públicas. Essa perspectiva dialoga com a concepção de educação emancipatória proposta por Freire (1996), bem como com a abordagem de educação popular discutida por Gohn (2011), que enfatiza o papel da formação crítica na construção da autonomia dos sujeitos.

De forma comparativa, observa-se que os catadores inseridos em organizações coletivas apresentam melhores condições de trabalho, maior acesso a políticas públicas e níveis mais elevados de renda em relação àqueles que atuam de forma individual, conforme evidenciam dados do IPEA (2017). Essa diferença evidencia que a organização coletiva não apenas melhora as condições materiais, mas também fortalece o reconhecimento social e político desses trabalhadores, contribuindo para sua inserção cidadã.

De maneira geral, os resultados demonstram que, apesar das fragilidades estruturais persistentes, as práticas associativas e o fortalecimento institucional têm contribuído para consolidar os catadores como agentes centrais da economia solidária e do desenvolvimento sustentável. Esse cenário evidencia uma tensão entre vulnerabilidade e potencialidade, na qual a integração entre políticas públicas, educação e organização social se apresenta como elemento fundamental para a promoção da justiça socioambiental, conforme defendem Leff (2001) e Sachs (2008).

## **5 DISCUSSÃO**

Os resultados evidenciam que a educação desempenha papel central na transformação das condições de vulnerabilidade vivenciadas pelos catadores, especialmente quando orientada por uma perspectiva crítica e emancipatória. A constatação empírica de baixos níveis de escolaridade e limitada inserção cidadã indica que a educação, conforme propõe Freire (1996), deve partir do reconhecimento do saber popular para promover processos de conscientização capazes de ampliar a autonomia e o protagonismo desses trabalhadores,

implicando diretamente na sua capacidade de reivindicação de direitos e organização coletiva.

A partir dos achados que demonstram a relevância ambiental da atuação dos catadores, observa-se que sua prática cotidiana já incorpora princípios da sustentabilidade, ainda que de forma não institucionalizada. Essa realidade dialoga com a abordagem de Leff (2001), ao indicar que a sustentabilidade não se restringe a modelos técnicos de gestão ambiental, mas depende da valorização de saberes locais e práticas sociais, implicando na necessidade de políticas que reconheçam e integrem esses sujeitos como agentes ativos da governança ambiental.

No que se refere à dimensão econômica, os dados que apontam o fortalecimento das cooperativas permitem interpretar que a organização coletiva atua como mecanismo de superação parcial das condições de precarização. Essa evidência encontra respaldo na teoria da economia solidária de Singer (2002), segundo a qual formas cooperativas de organização do trabalho promovem maior autonomia e distribuição equitativa dos resultados, implicando na construção de alternativas concretas frente às limitações do mercado formal e às desigualdades estruturais.

Entretanto, os resultados também revelam que, apesar dos avanços organizativos, persistem fragilidades estruturais significativas relacionadas à informalidade, à ausência de proteção social e à insuficiência de políticas públicas efetivas. Essa condição evidencia limites na implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, na medida em que, embora reconheça a importância dos catadores, não garante plenamente sua inclusão produtiva e social, implicando em uma lacuna entre o marco legal e a realidade vivenciada por esses trabalhadores.

A análise da dimensão da saúde reforça essa problemática, uma vez que os dados indicam exposição constante a riscos ocupacionais sem a devida assistência institucional. À luz dos estudos da FUNASA (2010) e da Fiocruz (2013), essa situação evidencia a ausência de políticas estruturadas de saúde do trabalhador, implicando na reprodução de condições que comprometem a qualidade de vida e a capacidade produtiva dos catadores.

A atuação de universidades e centros de pesquisa, identificada nos resultados como elemento de apoio à capacitação e formação cidadã, pode ser interpretada como um fator de mediação entre conhecimento técnico e prática social. No entanto, essa atuação ainda se apresenta de forma pontual e fragmentada, o que limita seu impacto estrutural, indicando a necessidade de maior institucionalização dessas iniciativas no âmbito das políticas públicas.

A educação ambiental crítica, conforme discutida por Jacobi (2003), emerge nesse contexto como um instrumento capaz de articular formação técnica e consciência cidadã, superando abordagens meramente informativas. Essa perspectiva se conecta à proposta de Gohn (2011), ao evidenciar que a educação popular transformadora deve promover a articulação entre saberes científicos e experiências locais, implicando na construção de práticas educativas que ampliem o protagonismo dos catadores nos processos decisórios.

A partir da integração entre os resultados e o referencial teórico, observa-se que a atuação dos catadores se insere em um campo de tensões entre vulnerabilidade estrutural e potencial transformador. Se, por um lado, os dados evidenciam precarização e invisibilidade social, por outro, revelam a existência de práticas coletivas e sustentáveis que apontam para a construção de alternativas baseadas na cooperação e na economia solidária.

Nesse sentido, a perspectiva de Sachs (2008) contribui para compreender que o desenvolvimento sustentável exige uma abordagem multidimensional que articule inclusão produtiva, equidade social e equilíbrio ecológico. A atuação dos catadores, ao reduzir a pressão sobre recursos naturais e promover práticas de reaproveitamento, materializa essa integração, ainda que limitada pela fragilidade institucional e pela ausência de políticas públicas mais efetivas.

Por fim, a articulação entre educação, saúde e sustentabilidade, embora reconhecida como.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O presente estudo teve como objetivo analisar de que forma a integração entre educação, saúde e sustentabilidade pode contribuir para o empoderamento e a valorização dos catadores de materiais recicláveis, promovendo

sua inclusão social e produtiva. A partir de uma abordagem qualitativa e de revisão bibliográfica interdisciplinar, evidenciou-se que, embora a catação desempenhe papel central na economia circular, essa atividade ainda é marcada por contradições estruturais que limitam seu reconhecimento social e institucional.

Os resultados demonstraram que os catadores exercem função estratégica na gestão de resíduos sólidos, contribuindo significativamente para o reaproveitamento de materiais e a redução de impactos ambientais. Contudo, persistem fragilidades relacionadas à informalidade, à precarização das condições de trabalho e à insuficiência de políticas públicas integradas, o que compromete sua plena inserção social e econômica.

A análise evidenciou também que a organização coletiva, por meio de cooperativas e associações, constitui um importante mecanismo de fortalecimento da categoria, ampliando o acesso a direitos e melhorando as condições de trabalho e renda. Nesse contexto, a educação popular e a educação ambiental crítica destacam-se como instrumentos fundamentais para a formação cidadã e o fortalecimento do protagonismo dos catadores, contribuindo para práticas emancipatórias.

No que se refere à saúde, constatou-se que esses trabalhadores permanecem expostos a diversos riscos ocupacionais, sem o devido suporte institucional, o que reforça a necessidade de políticas específicas voltadas à saúde do trabalhador. Essa lacuna evidencia a importância da articulação entre diferentes áreas do conhecimento e setores institucionais na promoção de condições dignas de trabalho e qualidade de vida.

Por fim, reconhecem-se limitações relacionadas ao caráter exclusivamente bibliográfico do estudo, indicando a necessidade de pesquisas futuras com abordagem empírica. Conclui-se que o reconhecimento dos catadores como atores centrais na sustentabilidade urbana exige ações concretas baseadas na integração entre políticas públicas, práticas educativas e organização coletiva, visando à construção de modelos mais justos, inclusivos e ambientalmente responsáveis.

## 7 REFERÊNCIAS

ANTUNES, Ricardo. *Os sentidos do trabalho: ensaio sobre a afirmação e a negação do trabalho*. São Paulo: Boitempo, 2009.

BARDIN, Laurence. *Análise de conteúdo*. São Paulo: Edições 70, 2011.

BOSI, Ana. *A organização social dos catadores de material reciclável*. São Paulo: Cortez, 2008.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

CASTEL, Robert. *As metamorfoses da questão social: uma crônica do salário*. Petrópolis: Vozes, 1998.

DEMAJOROVIC, Jacques. *Responsabilidade social e sustentabilidade: o papel das cooperativas de catadores*. São Paulo: Educ, 2011.

DEMO, Pedro. *Metodologia do conhecimento científico*. São Paulo: Atlas, 2011.

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ (FIOCRUZ). *Saúde e trabalho dos catadores de materiais recicláveis*. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2013.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). *Guia de vigilância em saúde do trabalhador*. Brasília: Funasa, 2010.

FREIRE, Paulo. *Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa*. São Paulo: Paz e Terra, 1996.

GOHN, Maria da Glória. *Educação não formal e o educador social: atuação no desenvolvimento de projetos sociais*. São Paulo: Cortez, 2011.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). *Diagnóstico sobre catadores de materiais recicláveis*. Brasília: IPEA, 2012.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). *Diagnóstico sobre catadores de materiais recicláveis*. Brasília: IPEA, 2017.

JACOBI, Pedro Roberto. Educação ambiental, cidadania e sustentabilidade. *Cadernos de Pesquisa*, São Paulo, n. 118, p. 189–205, mar. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-15742003000100008>.

LEFF, Enrique. *Epistemologia ambiental*. São Paulo: Cortez, 2001.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável*. Nova York: ONU, 2015.

SACHS, Ignacy. *Caminhos para o desenvolvimento sustentável*. Rio de Janeiro: Garamond, 2008.

SINGER, Paul. *Introdução à economia solidária*. São Paulo: Fundação Perseu Abramo, 2002.

## CAPÍTULO 3

# DEGRADAÇÃO FOTOCATALÍTICA DO CORANTE AZUL DE METILENO UTILIZANDO OS ELETRODOS DE $Ti/TiO_2-Cu_2O$ e $Ti/Cu_2O$

Fabiana Maria Monteiro Paschoal  
Juliana Silva Asevedo Maia  
Jamilly Pereira Marques  
Evelyn Perlayne Serrão da Silva  
Wanderson Gonçalves Trindade  
Doi: 10.48209/978-65-5417-702-2

**Resumo:** Os corantes sintéticos são amplamente utilizados na indústria, mas seu descarte inadequado, como no caso do azul de metileno, provoca impactos ambientais, reduzindo o oxigênio dissolvido e comprometendo a fotossíntese aquática. Além de sua toxicidade e baixa biodegradabilidade, esse composto representa riscos à saúde humana e ao ecossistema. A cloração, embora eficaz no tratamento da água, pode gerar subprodutos prejudiciais. Em contraste, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) utilizam semicondutores fotoativados para degradar poluentes de forma eficiente e sustentável, sendo uma alternativa promissora para a remoção de corantes da água. No presente estudo, a fotólise e a fotocatalise utilizando eletrodos de  $Ti/TiO_2-Cu_2O$  e  $Ti/Cu_2O$  demonstraram altas taxas de degradação do azul de metileno, variando entre 94% e 98% em 665 nm e de 94% e 78% em 290 nm após 180 minutos. O desempenho do eletrodo híbrido  $Ti/TiO_2-Cu_2O$  foi de 96%/84%, enquanto o eletrodo  $Ti/Cu_2O$  apresentou ligeiramente menor eficiência com 94%/78%. Esses resultados indicam que a morfologia nanotubular e a combinação de filmes podem influenciar positivamente a separação de cargas e a degradação do corante.

**Palavras-Chaves:** Eletrodo de  $Ti/Cu_2O$  e  $Ti/TiO_2-Cu_2O$ ; fotocatalise, tratamento de água, corante azul de metileno.

## **1 INTRODUÇÃO**

A água é um recurso indispensável para a manutenção de todas as formas de vida no planeta, sendo vital para a sobrevivência. A preservação e a manutenção de sua qualidade são essenciais para assegurar o futuro bem-estar da população global. Contudo, o crescimento populacional e a expansão das atividades industriais têm provocado uma crescente contaminação dos corpos d'água, tanto por substâncias orgânicas e inorgânicas quanto por compostos difíceis de decompor.

Nos últimos anos, questões como o desenvolvimento sustentável e a poluição ambiental têm gerado intensos debates, impulsionados tanto pelos impactos das atividades humanas no ambiente quanto pelas reações do próprio meio ambiente a essas intervenções. De acordo com o Relatório de Brundtland (1987), o conceito de desenvolvimento sustentável é definido como “aquele que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atenderem às suas próprias necessidades” (COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1988).

No Brasil, a indústria têxtil tem um papel fundamental na história e no desenvolvimento tecnológico do país, com fábricas que operam há mais de 200 anos, abrangendo todas as etapas do processo produtivo, desde o cultivo do algodão até a confecção e acabamento dos tecidos. Essa indústria representa 3,5% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. Estima-se que existam cerca de 27,5 mil empresas formais no setor, que geram empregos para 1,5 milhão de pessoas de maneira direta e 8 milhões de forma indireta (ABIT, 2019).

Com o crescimento econômico, o impacto ambiental causado pela indústria têxtil também aumenta. Esse setor gera uma grande quantidade de resíduos ao longo de sua cadeia produtiva, especialmente nas fases de acabamento, lavagem e tingimento, sendo esta última particularmente relevante devido ao uso de corantes (CARDOSO; RAMALHO, 2004).

Os efluentes gerados pelas indústrias têxteis são ricos em matéria orgânica e corantes, contendo também fios e fibras originados das etapas de fabricação e tingimento de tecidos. Quando esses efluentes são lançados em corpos

hídricos, a alta carga orgânica presente pode reduzir a quantidade de oxigênio dissolvido na água, prejudicando assim o ecossistema aquático (DILARRI et al., 2016). Além disso, a água contaminada com corantes dificulta a penetração da luz solar, o que compromete a fotossíntese realizada por microrganismos e algas, resultando na diminuição da produção de oxigênio (LALNUNHLIMI; KRISHNASWAMY, 2016).

Neste contexto, emergiram os Processos Oxidativos Avançados (POA), que se mostram eficazes na remoção de poluentes orgânicos recalcitrantes em águas, especialmente em sistemas com baixa biodegradabilidade (MALATO et al., 2009; POYATOS et al., 2010; SANTOS DE ARAÚJO et al., 2016). Esses processos são baseados na geração de espécies radicalares reativas pouco seletivas, com comprovada capacidade de degradação de matéria orgânica (Salazar, 2009).

A fotocatalise heterogênea tem sido explorada como uma técnica de tratamento de efluentes por mais de vinte anos (desde 1983). As primeiras pesquisas mostraram a viabilidade da mineralização de compostos como clorofórmio e tricloroetileno por meio da irradiação de suspensões de  $\text{TiO}_2$ . Desde então, essa abordagem tem sido amplamente investigada como uma alternativa eficaz para a degradação de poluentes orgânicos (ZIOLLI; JARDIM, 1998)

Diante disso, a criação de um sistema híbrido envolvendo  $\text{TiO}_2$  e  $\text{Cu}_2\text{O}$  pode ser uma abordagem eficaz para obter um catalisador com propriedades magnéticas e fotocatalíticas. Esse material poderia ser utilizado em processos oxidativos avançados para a desinfecção de águas contaminadas pelo inseticida.

## **2 METODOLOGIA**

O filme de  $\text{Ti/TiO}_2$  foi depositado catodicamente em um banho de solução de sulfato cúprico  $0,4 \text{ mol.L}^{-1}$  contendo  $3,0 \text{ mol.L}^{-1}$  de lactato de sódio utilizando uma placa de titânio metálica como substrato. O pH da solução foi ajustado para 9,0 utilizando  $\text{NaOH } 4,0 \text{ mol.L}^{-1}$ . O crescimento do filme ocorreu a  $-0,4 \text{ V}$  (vs  $\text{Ag/AgCl}$ ,  $\text{KCl}$  saturado) ao longo de 30 minutos. O processo de deposição foi conduzido em uma célula de um compartimento, utilizando um sistema de três eletrodos. Esse sistema consistiu em uma rede de platina como

contra-eletródo, um eletródo de Ag/AgCl, KCl saturado como eletródo de referência, e uma chapa de titânio metálico como eletródo de trabalho, onde o filme foi depositado. A temperatura do banho foi mantida constante a 60°C durante todo o procedimento.

O filme de TiO<sub>2</sub>-Cu<sub>2</sub>O foi preparando seguindo a seguinte metodologia: Inicialmente foi formado o filme de TiO<sub>2</sub> nanotubular na superfície de uma placa de titânio. Os fotoeletródos de Ti/TiO<sub>2</sub> nanotubular foram preparados por oxidação anódica de uma placa de titânio metálico (5 × 5 cm, 0,5 mm de espessura, 99,45% de pureza). As placas passaram por desbaste mecânico com lixas de diferentes granulometrias (200 a 1200) e posterior limpeza em banho ultrassônico por 20 min em acetona, álcool etílico e água, sendo então secas e inseridas na célula eletroquímica. No reator, as chapas atuaram como ânodo e uma rede de platina como cátodo, imersos em eletrólito contendo íons fluoreto, sob aplicação de 30 V por 50 h. Após a anodização, as placas foram lavadas com água deionizada, secas com gás nitrogênio e calcinadas a 350 °C por 30 min em mufla, etapa essencial para a formação dos nanotubos de TiO<sub>2</sub> auto-organizados (CARDOSO et al., 2010).

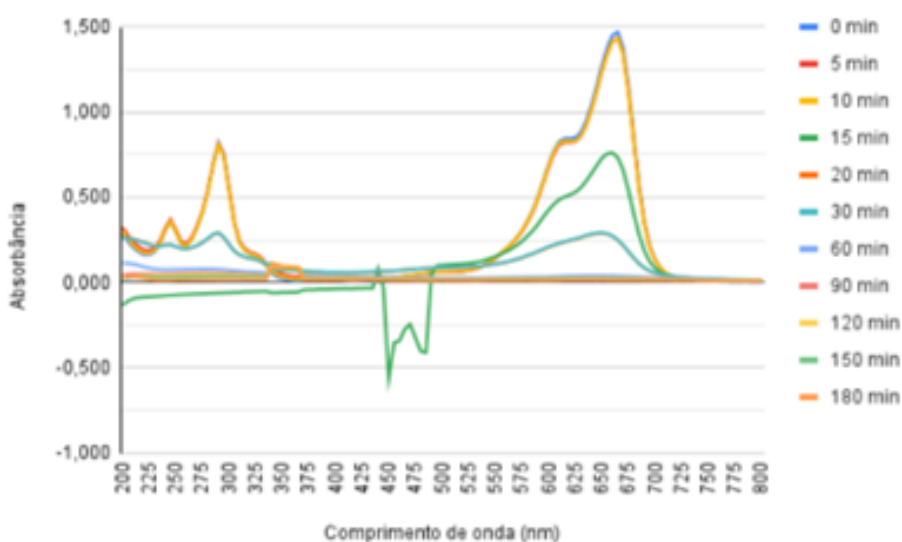
Após o preparo dos nanotubos de titânio foi feito o depósito catódicamente do Cu<sub>2</sub>O em um banho de solução de sulfato cúprico 0,4 mol.L<sup>-1</sup> contendo 3,0 mol.L<sup>-1</sup> de lactato de sódio utilizando o eletródo nanotubular de TiO<sub>2</sub> como substrato. O pH da solução foi ajustado para 9,0 utilizando NaOH 4,0 mol.L<sup>-1</sup>. O crescimento do filme ocorreu a -0,4 V (vs Ag/AgCl, KCl saturado) ao longo de 30 minutos. O processo de deposição foi conduzido em uma célula de um compartimento, utilizando um sistema de três eletródos. Esse sistema consistiu em uma rede de platina como contra-eletródo, um eletródo de Ag/AgCl, KCl saturado como eletródo de referência, e o eletródo nanotubular de TiO<sub>2</sub> como eletródo de trabalho, onde o filme foi depositado. A temperatura do banho foi mantida constante a 60°C durante todo o procedimento.

Soluções-estoque do corante azul de metileno nas concentrações de 5 ppm foram preparadas pela dissolução direta do corante em água milli-Q. As soluções de trabalho foram preparadas pela transferência de alíquotas da solução estoque do analito para um volume final apropriado na célula eletroquímica.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O procedimento experimental teve início com o ensaio de fotólise, conduzido sob radiação UV sem a presença de eletrodo, estabelecendo um parâmetro de referência para os experimentos fotocatalíticos. Em seguida, foi realizada a fotocatalise com o eletrodo de  $\text{Ti}/\text{Cu}_2\text{O}$ . Na Figura 1 é apresentado o gráfico da varredura referente à fotólise, onde se observa a diminuição da absorbância do azul de metileno em 290 nm : iniciando de 0,8208 no tempo e finalizando em 0,0185 em 180 min; e o comprimento em 665 nm: partindo de 1,4688 no tempo inicial (0 min) e alcançando 0,00178 após 180 min. Esses resultados correspondem a uma taxa de degradação de 97% e 98%, respectivamente, calculados pela equação  $\% = (\text{Abs inicial} - \text{Abs final}) \div \text{Abs inicial}$  (Paschoal, 2008).

Figura 1 - Espectros de absorção na região UV-Vis da solução do corante azul de metileno fotolisada por 180 minutos em reator de um compartimento.

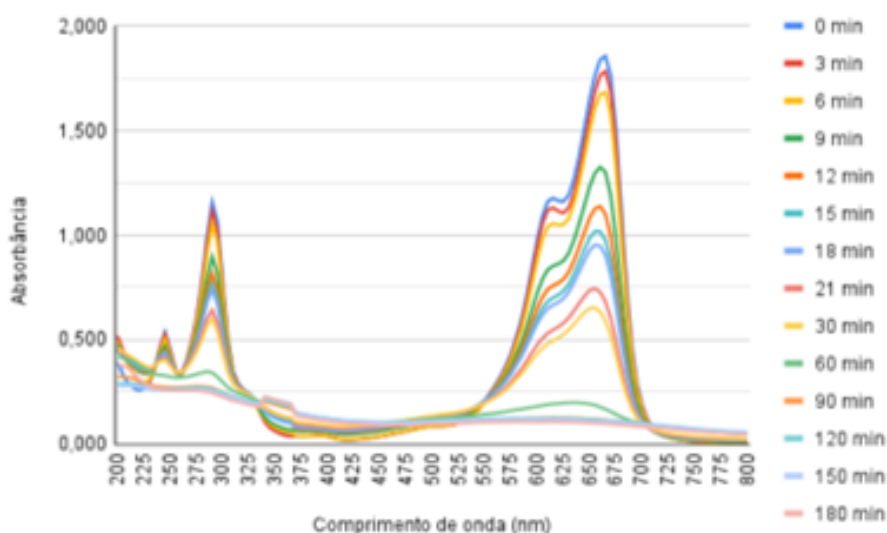


Fonte - Elaborado pelos autores, 2025.

Na Figura 2, observa-se o gráfico referente à fotocatalise utilizando o eletrodo de  $\text{Ti}/\text{TiO}_2\text{-Cu}_2\text{O}$ , no qual se observa a diminuição da absorbância do azul de metileno em 290 nm : iniciando de 1,0855 no tempo e finalizando em 0,1709 em 180 min; e no comprimento de onda de 665 nm: partindo de 1,7495 no tempo inicial (0 min) e atingindo 0,0675 após 180 min. Esse resultado corresponde a uma taxa de degradação de 84% e 96%, respectivamente, de acordo com a equação  $\% = (\text{Abs inicial} - \text{Abs final}) \div \text{Abs inicial}$  (Paschoal, 2008).

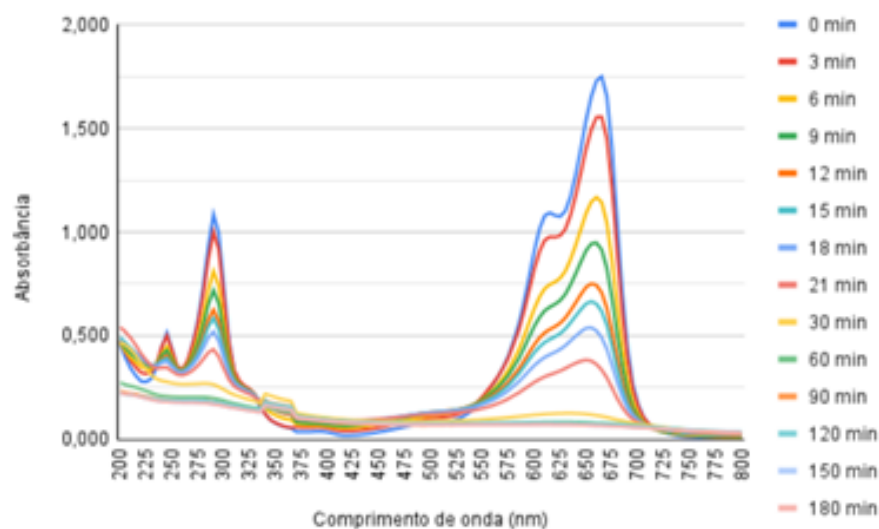
Na Figura 3, é exibido o gráfico de varredura da fotocatalise empregando o eletrodo de  $Ti/Cu_2O$ . Verifica-se a redução da absorbância em 290 nm de 1,158 no tempo inicial e de 0,2444 em 180 min; e no comprimento de onda de 665 nm, de 1,855 no tempo inicial (0 min) para 0,0983 ao final de 180 min, resultando em uma taxa de degradação de 78% e 94%, respectivamente (Paschoal, 2008).

Figura 2- Espectros de absorção na região UV-Vis da solução de corante azul de metileno fotocatalisada por 180 minutos com o eletrodo  $Ti/TiO_2-Cu_2O$  em reator de um compartimento.



Fonte - Elaborado pelos autores, 2025

Figura 3- Espectros de absorção na região UV-Vis da solução de corante azul de metileno fotocatalisada por 180 minutos com o eletrodo  $Ti/Cu_2O$  em reator de um compartimento.



Fonte - Elaborado pelos autores, 2025

Os resultados obtidos demonstram que todos os métodos avaliados foram eficazes na degradação do azul de metileno, com taxas de remoção variando entre 94% e 98% em 665 nm e de 97% e 78% em 290 nm após 180 minutos.

Entretanto, é possível observar diferenças sutis no desempenho de cada eletrodo que podem ser relacionadas à estrutura e à composição do filme fotocatalítico. O ensaio de fotólise, conduzido sem eletrodo, apresentou alta taxa de degradação (98% e 94%), indicando que a radiação UV foi suficiente para decompor o corante; No entanto, apesar da alta eficiência da fotólise, é relevante apontar que após apenas 30 minutos sua taxa de degradação mostrou-se inferior à obtida com o eletrodo fotocatalítico.

Enquanto a fotólise alcançou 83% de degradação, o eletrodo de Ti/Cu<sub>2</sub>O atingiu 93% no mesmo intervalo (30 minutos), indicando que, na presença dos eletrodos, a degradação ocorreu de maneira mais eficaz em tempo reduzido.

Além disso, a fotólise carece do controle, da estabilidade e da adaptabilidade que os eletrodos fotocatalíticos proporcionam. Estes últimos permitem ajustes precisos na arquitetura do material, operação em radiação visível e manutenção da eficiência sob diferentes intensidades de luz, características essenciais para aplicações práticas e sustentáveis no tratamento de água.

A fotocatalise com eletrodo Ti/TiO<sub>2</sub>-Cu<sub>2</sub>O resultou em uma taxa de degradação de 96% e 84%, enquanto o eletrodo de Ti/Cu<sub>2</sub>O apresentou ligeiramente menor eficiência (94% e 78%). Essa diferença sugere que a presença da interface entre TiO<sub>2</sub> nanotubular e Cu<sub>2</sub>O favoreceu a separação de cargas fotoinduzidas, reduzindo parcialmente a recombinação e aumentando a atividade fotocatalítica. Entretanto, a literatura também mostra que a simples combinação de semicondutores não garante desempenho superior, uma vez que, se os níveis de energia ou a interface não forem otimizados, a atividade pode ser comprometida (Zhang et al., 2010).

No caso do Ti/Cu<sub>2</sub>O, a atividade fotocatalítica está relacionada à capacidade do Cu<sub>2</sub>O em absorver fótons na região do visível, promovendo a geração de pares elétron–lacuna. Contudo, sua eficiência foi ligeiramente

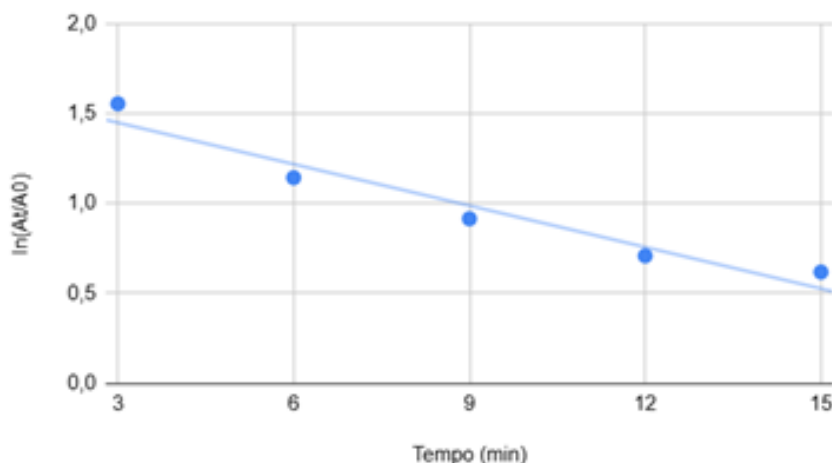
inferior, o que pode ser explicado pela recombinação de cargas fotoinduzidas, fenômeno comum em semicondutores com interfaces pouco otimizadas, reduzindo a disponibilidade de radicais oxidantes. Esse comportamento já foi descrito na literatura em sistemas híbridos envolvendo  $\text{TiO}_2$  associado a outros óxidos, como  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , nos quais a combinação de materiais não resultou em desempenho superior ao do semicondutor isolado (Xuhui, S. 2014).

Por outro lado, o eletrodo  $\text{Ti}/\text{TiO}_2\text{-Cu}_2\text{O}$  apresentou desempenho levemente superior, sugerindo que a presença da interface entre o  $\text{TiO}_2$  e o  $\text{Cu}_2\text{O}$  favoreceu a separação de elétrons e lacunas, reduzindo a recombinação e aumentando a eficiência do processo. Esse efeito de sinergia em filmes é consistente com observações em heteroestruturas  $\text{Cu-Cu}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ , nas quais a interface entre os materiais favoreceu a separação de cargas e ampliou a absorção de luz, resultando em maior degradação de corantes orgânicos (Zhao & Liu, 2020).

Além disso, o desempenho do eletrodo híbrido  $\text{Ti}/\text{TiO}_2\text{-Cu}_2\text{O}$  demonstra que a morfologia nanotubular contribui significativamente para a eficiência fotocatalítica, possivelmente devido à maior área superficial, melhor difusão de reagentes e redução na recombinação de cargas, alinhando-se com observações de eletrodos bicamadas de  $\text{TiO}_2$  (nanoporos + nanopartículas), onde a combinação de morfologias favoreceu a separação de cargas e a eficiência de conversão (Zhang et al., 2010).

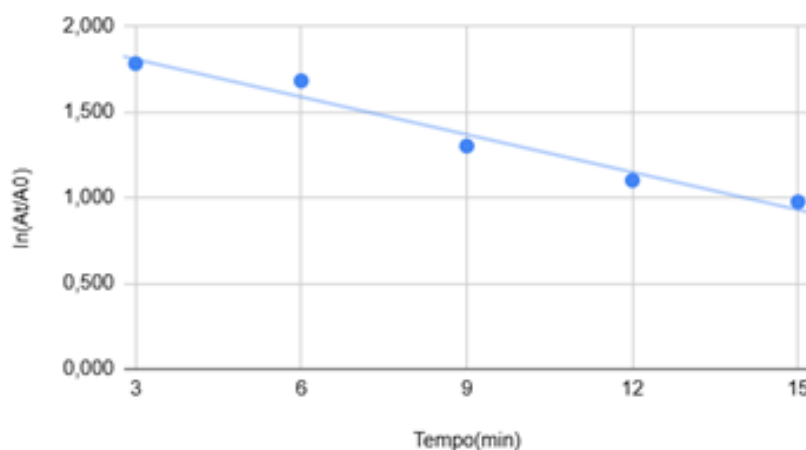
Para determinação da cinética de degradação do azul de metileno, foi realizado o cálculo do  $\ln(\text{At}/\text{A0})$  em função do tempo. Nesse cálculo,  $\text{At}$  corresponde à absorbância do corante em um determinado intervalo durante o processo fotocatalítico, enquanto  $\text{A0}$  representa a absorbância inicial em 665 nm. A fotocatalise com o eletrodo  $\text{Ti}/\text{TiO}_2\text{-Cu}_2\text{O}$ , apresentada na Figura 4, resultou em uma constante de velocidade de oxidação fotocatalítica de  $0,92 \text{ min}^{-1}$  e coeficiente de correlação ( $\text{R}^2$ ) de 0,942. Já para o eletrodo  $\text{Ti}/\text{Cu}_2\text{O}$ , mostrado na Figura 5, pode-se observar uma constante de velocidade de  $0,60 \text{ min}^{-1}$  e  $\text{R}^2$  de 0,963.

Figura 4- Gráfico de cinética de degradação da solução do corante azul de metileno fotocatalisada com eletrodo Ti/TiO<sub>2</sub>-Cu<sub>2</sub>O.



Fonte - Elaborado pelos autores, 2025

Figura 5- Gráfico de cinética de degradação da solução do corante azul de metileno fotocatalisada com eletrodo Ti/Cu<sub>2</sub>O.



Fonte - Elaborado pelos autores, 2025

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os eletrodos fotocatalíticos avaliados demonstraram alta eficiência na degradação do azul de metileno. O Ti/TiO<sub>2</sub>-Cu<sub>2</sub>O apresentou 96% e 84% de remoção após 180 minutos nos comprimentos de onda de 665 nm e 290 nm, respectivamente, com constante de velocidade fotocatalítica de 0,92 min<sup>-1</sup> (R<sup>2</sup> = 0,942), enquanto o Ti/Cu<sub>2</sub>O alcançou 94% e 78% de degradação, com constante de 0,60 min<sup>-1</sup> (R<sup>2</sup> = 0,963). Esses resultados evidenciam que a presença da interface entre TiO<sub>2</sub> e Cu<sub>2</sub>O favorece a separação de cargas, aumentando

a eficiência do processo em relação ao  $\text{Cu}_2\text{O}$  isolado. Assim, a combinação  $\text{Ti}/\text{TiO}_2\text{-Cu}_2\text{O}$  se mostra uma estratégia promissora para aplicação em tratamento de efluentes contendo corantes orgânicos.

Agradecimento para os dois artigos:

Os autores agradecem a FAPEAM pelo auxílio financeiro concedido no Processo 01.02.016301.02509/2022-44. Edital 007/2022 - Mulheres das Águas.

## **6 REFERÊNCIAS**

AMARAL, L. H. Fundamentos de Fotocatálise Heterogênea. São Paulo: Editora Unesp, 2016.

ANDRÉOZZI, R. et al. Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Water Research*, v. 33, n. 10, p. 2201-2217, 1999.

Araújo, K. S. de ., Antonelli, R., Gaydeczka, B., Granato, A. C., & Malpass, G. R. P.. Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais. *Revista Ambiente & Água*, Feb de 2016.

BAO, N. et al. Electrodeposition of  $\text{Cu}_2\text{O}$  films and their photoelectrochemical properties. *Journal of Materials Chemistry*, v. 22, n. 28, p. 14061-14067, 2012.

Bharti. V, K. Vikrant, M. Goswami, H. Tiwari, R.K. Sonwani, J. Lee, D.C.W. Tsang, K.-H. Kim, M. Saeed, S. Kumar, B.N. Rai, B.S. Giri, R.S. Singh, Biodegradation of methylene blue dye in a batch and continuous mode using biochar as packing media, *Environ. Res.* 171 (2019) 356–364, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.01.051>.

BYSTROV, V. et al. Photocatalytic properties of semiconductor materials: A review. *Materials Science and Engineering*, v. 123, p. 45-62, 2016.

CARDOSO, M. H.; RAMALHO, P. Biodegradação de corantes de efluentes têxteis por leveduras. *Universidade do Minho, FW-Science-2004*, 2004.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. *Nosso futuro comum*. 2. ed. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1991.

CONDIE, L. W. Toxicological effects associated with drinking water disinfectants and their byproducts. Em Joley, R. L.; Condie, I. W.; Johnson, J. D.; Kats, S; Minear, R. A.; Jacobs, V. A. *Water Chlorination Chemistry, Environmental Impact and Health Effects*, v.6, p. 281-291, 1990.

Contreras. M, C.D. Grande-Tovar, W. Vallejo, C. Chaves-Lopez, Bio-removal of methylene blue from aqueous solution by galactomyces geotrichum KL20A, *Water* 11 (2019) 282, <https://doi.org/10.3390/w11020282>.

DELATORRE, R. G. \*Técnicas de Deposição de Filmes Finos\*. São Paulo: Editora Unesp, 2007.

DILARRI, Guilherme et al. Removal of Dye Toxicity from an Aqueous Solution Using an Industrial Strain of *Saccharomyces Cerevisiae* (Meyen). *Water, Air, & Soil Pollution*, [s.l.], v. 227, n. 8, p.269, 14 jul. 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-016-2973-1>.

DILARRI, Guilherme; SILVA, Bruna F.; PEREIRA, Rafael A.; et al. *Remoção de corantes têxteis: aspectos gerais e processos biotecnológicos*. **Química Nova**, São Paulo, v. 39, n. 3, p. 401–414, 2016.

FRADE, T. et al. Photocatalytic degradation of organic pollutants: Mechanisms and applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 1, n. 3, p. 123-130, 2012.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Corantes têxteis. *Química Nova*, v. 23, n. 1, p. 71–78, 2000.

HARA, M. et al. Photocatalytic decomposition of water using Cu<sub>2</sub>O powder under visible light irradiation. *\*Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry\**, v. 118, n. 2, p. 123-128, 1998.

HERRMANN, J.-M. Fundamentals and misconceptions in photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, v. 216, n. 2-3, p. 85-93, 2010.

HODGSKISS, T.; WADLEY, L. How people used ochre at Rose Cottage Cave, South Africa: Sixty thousand years of evidence from the Middle Stone Age *PLOS ONE* , v. 12, n. 4, p. 1–24,2017.

ISENMANN, A. F. *Corantes*. 2.ed. Timóteo: CEFET, 2014. 345 p

JONGH, P. E. et al. Stability of Cu<sub>2</sub>O in aqueous solutions. *Journal of Physical Chemistry B*, v. 104, n. 15, p. 3456-3462, 2000.

Katheresan. V, J. Kansedo, S.Y. Lau, Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: a review, *J. Environ. Chem. Eng.* 6 (2018) 4676–4697, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060>.

LALNUNHLIMI, S.; KRISHNASWAMY, V. *Decolorization of azo dyes (Direct Blue 151 and Direct Red 31) by moderately alkaliphilic bacterial consortium*. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 47, n. 1, p. 39–46, 2016.

Liu. J , M.-F. Li, S.K. Singh, Manganese-modified lignin biochar as adsorbent for removal of methylene blue, *J. Mater. Res. Technol.* 12 (2021) 1434–1445, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.076>

LU, X. et al. Electrodeposition: Fundamentals and applications. *\*Journal of Materials Science\**, v. 51, n. 5, p. 2261-2280, 2016.

MALATO, Sixto; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ, Pilar; MALDONADO, María I.; BLANCO, Julián; GERNJAK, Wioleta. *Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: recent overview and trends*. **Catalysis Today**, Amsterdam, v. 147, n. 1, p. 1–59, 2009.

MARUSKA, H. P. Photoelectrochemical properties of Cu<sub>2</sub>O. *\*Journal of the Electrochemical Society\**, v. 126, n. 5, p. 785-790, 1979.

MOURA, F. C. C. Processos oxidativos avançados: fundamentos e aplicações no tratamento de efluentes. *Química Nova*, v. 36, n. 1, p. 143-150, 2013.

PASCHOAL, F. Aplicações da técnica de fotoeletrocatalise na oxidação de corantes ácidos, corantes dispersos, surfatantes e na redução de Cr(VI) e bromato em efluentes usando eletrodos nanoporosos de Ti/TiO<sub>2</sub>. 159 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), São Paulo, 2008b.

PESSOA Junior, Wanison André Gil; AZEVEDO, Flávia Regina Porto de. CO-RANTES SINTÉTICOS E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS: DESAFIOS, LEGISLAÇÃO E INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS SUSTENTÁVEIS. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, [S. l.], v. 10, n. 12, p. 3972–3991, 2024. DOI: 10.51891/rease.v10i12.17742.

POYATOS, Juan M.; MUÑO, M. M.; ALMECIJA, M. C.; TORRES, J. C.; HONTORIA, E.; OSORIO, F. *Advanced oxidation processes for wastewater treatment: state of the art*. **Water, Air, & Soil Pollution**, Dordrecht, v. 205, p. 187–204, 2010.

R.R. Ramsay, C. Dunford, C.K. Gillman, Methylene blue and serotonin toxicity: inhibition of monoamine oxidase A (MAO A) confirms a theoretical prediction, *Br. J. Pharmacol.* 152 (6) (2007) 946–951, <https://doi.org/10.1038/sj.bjp.0707430>

REVANKAR, M. S.; LELE, S. S. Synthetic dye decolorization by *Ganoderma* sp. WR-1. *Bioresource Technology*, v. 98, p. 775-780, 2007.

ROBINSON, T. et al. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Biore-source Technology*, v. 77, n. 3, p. 247–255, 2001.

SANTOS DE ARAÚJO, Karina; ANTONIO, Juliana; et al. *Processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes têxteis*. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 11, n. 2, p. 387–401, 2016.

SHANKS.G.D, Chapter six - control and elimination of plasmodium vivax, in: S. I. Hay, R. Price, J.K. Baird (Eds.), *Advances in Parasitology*, Academic Press, 2012

SHAKOOR, S. & NASAR, A. Adsorptive treatment of hazardous methylene blue dye from artificially contaminated water using cucumis sativus peel waste as a low-cost adsorbent, *Groundw. Sustain. Dev.* 5 (2017) 152–159, <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.06.005>.

SIRIPALA, W. et al. A Cu<sub>2</sub>O-based solar cell: A review. *\*Solar Energy Materials and Solar Cells\**, v. 77, n. 3, p. 229-237, 2003.

TOMINAGA, M. Y.; MIDIO, A. F. Exposição humana a trihalometanos presentes em águas tratadas. *Revista Saúde Pública*, v. 33, n. 4, p. 413-421, 1999

YAGUB, M. T. et al. Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 209, p. 172-184, 2014.

YEFIM R.S, S. CHRISTOPHER, S.L. PHILIP, G. MARC, Effect of Methylene Blue, Indigo Carmine, and Renografin on Human Sperm Motility, vol. 53, Elsevier Science Inc *UROLOGY*, 1999, pp. 214–217.

Zhang, Q., et al. (2010). High efficiency dye-sensitized solar cell based on novel TiO<sub>2</sub> nanorod/nanoparticle bilayer electrode. *Nanotechnol. Sci. Appl.*, 3, 123–130. PMC3781742

XUHUI, S. et al. Performance comparison of dye-sensitized solar cells by using different metal oxide-coated TiO<sub>2</sub> as the photoanode. *AIP Advances*, v. 4, n. 3, 23 jan. 2014.

ZHAO, W.; LIU, C. Mesoporous Cu–Cu<sub>2</sub>O/TiO<sub>2</sub> heterojunction photocatalysts derived from metal–organic frameworks. *RSC Advances*, v. 10, n. 25, p. 14550–14555, 2020.

ZIOLLI, R. L.; JARDIM, W. F. *Mecanismos de fotodegradação de compostos orgânicos catalisados por TiO<sub>2</sub>*. **Química Nova**, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 319–325, 1998.

## CAPÍTULO 4

# DESCRIÇÃO DE PROJETOS DE MELHORAMENTO EM ESPÉCIES FLORESTAIS NA REGIÃO NORTE

Thayanny Nunes de Oliveira Leite  
Deolinda Lucianne Ferreira Garcia  
Doi: 10.48209/978-65-5417-702-4

**Resumo:** O melhoramento genético teve origem a partir das contribuições de Charles Darwin e Gregor Mendel, cujos estudos impulsionaram debates científicos que se estenderam por anos. Apesar desses avanços, o melhoramento florestal ainda é considerado uma área relativamente recente, principalmente devido ao baixo investimento no setor. As espécies florestais possuem grande importância econômica, fornecendo diversos produtos e serviços ambientais. Nesse contexto, técnicas de melhoramento, como a propagação vegetativa — com destaque para enxertia e cultura in vitro, têm sido utilizadas para aumentar a produtividade, reduzir impactos ambientais e obter características desejáveis. Contudo, desafios como a baixa variabilidade genética e o longo ciclo das espécies dificultam a aplicação dessas técnicas. O presente estudo teve como objetivo fazer um panorama dos projetos de melhoramento de espécies florestais em instituições de pesquisa da região Norte do Brasil. Os dados foram coletados por meio de solicitações formais enviadas a centros de pesquisa. Os resultados indicaram maior concentração de projetos na EMBRAPA de Roraima e Acre, com destaque para a espécie *Bertholletia excelsa*, voltada à produção de biomassa e resistência a pragas.

**Palavras-chave:** melhoramento florestal; Amazônia; espécies nativas; biotecnologia; pesquisa científica.

## 1 INTRODUÇÃO

A origem do melhoramento foi influenciada pelos trabalhos de dois biólogos, Charles Darwin e Gregor Mendel, que originaram numerosos debates que se estenderam até o início do século XX (BETRAN *et al.*, 2009).

O melhoramento genético é o principal processo que transforma um componente da biodiversidade em um recurso genético e, finalmente, em um produto com valor econômico no mercado contemporâneo. É essencial porque é raríssimo encontrar um componente da biodiversidade que possa ser usado diretamente no processo produtivo. Isto não é uma deficiência da biodiversidade; é um requerimento da concorrência do mercado, pois o mercado exige alta qualidade com baixo custo, uma combinação importantíssima na natureza (CLEMENT, 2001).

A crise na demanda de madeira no Brasil, tem-se intensificado, levando pesquisadores e demais profissionais da área a pensar em estratégias para aumentar a intensidade da produção florestal (TUOTO, 2003).

As espécies florestais possuem grande importância econômica, pois oferecem diversos produtos fundamentais para a sociedade, de modo geral as estratégias básicas de melhoramento podem ser resumidas em seleção de procedências e seleção individual dentro das populações base, utilizando-se a variabilidade existente naturalmente dentro das populações e entre os indivíduos (GOLLE *et al.*, 2009).

Com base no exposto, o presente trabalho teve por objetivo descrever os projetos na área de melhoramento de espécies florestais nas principais instituições de pesquisas existentes na região Norte: UNIVERSIDADES FEDERAIS, INPA e EMBRAPA.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Segundo Cunha (2005), poucas pessoas, na História da ciência, contribuíram tanto quanto Gregor Johann Mendel para a evolução do conhecimento e suas transformações em tecnologias, ressalte-se, que Darwin foi contemporâneo de Gregor Mendel, mas afortunadamente, passou batido pelas publicações de Mendel. Não obstante, o Darwinismo foi uma força dominante em biologia, no século XX. As dificuldades para formular uma teoria genética, em pleno século, eram devidas a várias coisas, entre elas a falta de compreensão da variação contínua e descontínua e da interação com o ambiente. Sem

falar que, na mesma época que Mendel realizou suas experiências, foi quando começaram os estudos da célula de forma mais aprofundada.

Com a descoberta das leis da genética, por Mendel publicadas em 1865, o homem passou a ter acesso a um conhecimento que lhe permitiria a modificação genética das espécies de forma mais precisa e rápida. Entretanto Mendel foi ignorado por seus contemporâneos e seus escritos permaneceram inutilizados por 35 anos, até que em 1900 as Leis da Genética foram redescobertas e a modificação genética das plantas pôde ser realizada de forma científica (BORÉM, 2005).

Nascia então o melhoramento genético de plantas, mostrando que Mendel estava certo, o conhecimento científico continuou evoluindo desde Mendel e a genética começou a contar com recursos ainda mais modernos no decorrer dos tempos.

O trabalho dos melhoristas Jonh Le Couter e Patrick Sherrif, no século XIX, foram um dos primeiros a utilizar progênies para a obtenção de novos cultivares (MACHADO, 2014).

Depois da segunda guerra (1939-1945) houve um desenvolvimento explosivo das ciências no mundo todo, e nisto foi acompanhado também pela genética florestal. Houve o estabelecimento de grandes plantios florestais, conheciam-se os conceitos de evolução, a estrutura do DNA, além dos métodos de estatística experimental de Fisher, ocorrendo a contribuição para o desenvolvimento do melhoramento florestal (BRUNE, 2007).

Os programas de melhoramento florestal se iniciam com a formação da população base e evoluem com a extração da variabilidade existente nesta população. A manutenção desta variabilidade é essencial para a continuidade e sucesso do programa de melhoramento, pois evita a erosão genética, que é irreversível, e que ocasiona na perda de genótipos de importância (FERNANDES, 2014).

Uma das preocupações dos melhoristas é de selecionar variedades com objetivo bastante acentuado de minimizar os efeitos ambientais na expressão do fenótipo para que a cultivar pudesse responder de forma bastante efetiva às finalidades propostas, como por exemplo ter variedades uniformes e que respondam adequadamente a aplicação de produtos. Neste sentido os testes de

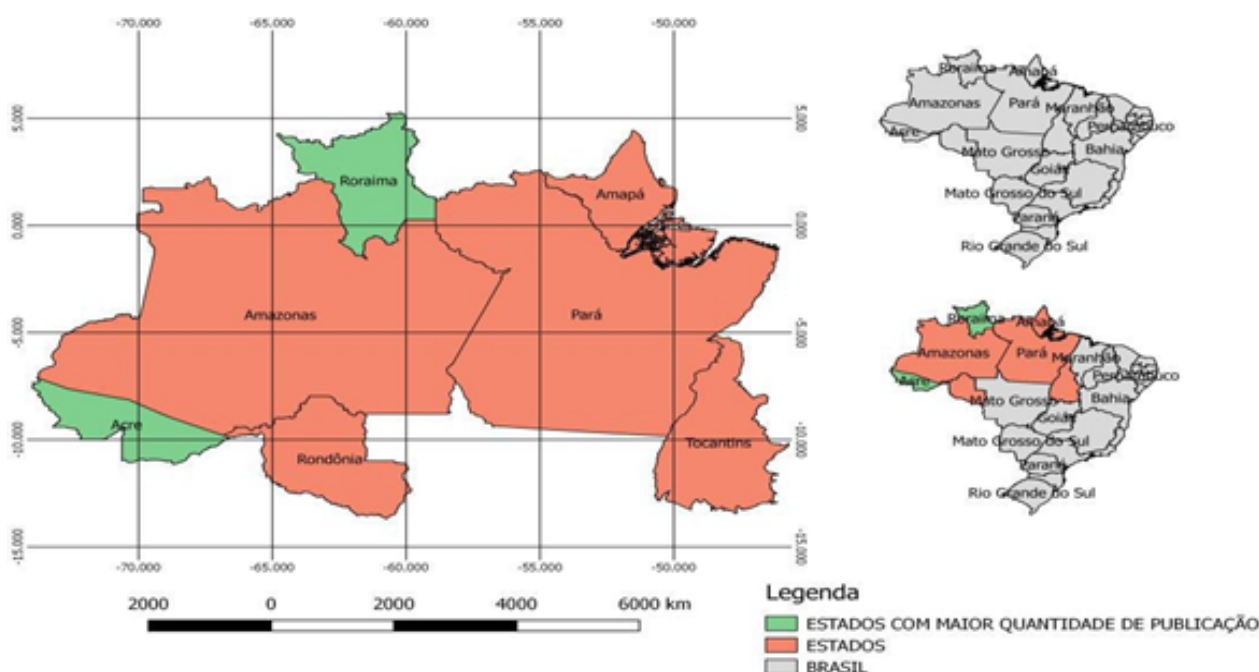
progênes das variedades em processo de seleção foi um marco na revolução do melhoramento genético (MACHADO, 2014).

Diversas técnicas de melhoramento vêm sendo trabalhadas para o aumento da produtividade, como a cultura de tecidos, a utilização de marcadores moleculares e a transformação genética, que oferecem soluções únicas para o melhoramento (SARTORETTO *et al.*, 2008).

No entanto, a baixa variabilidade existente em espécies florestais de crescimento rápido, o longo período para os ciclos reprodutivos e as dificuldades encontradas para a realização de cruzamentos controlados podem inviabilizar tais procedimentos (GOLLE, 2009).

### **3 METODOLOGIA**

Figura 1: Mapa da Região Norte



Fonte: Thayanny Nunes, 2018.

A Região Norte do Brasil é a maior região em extensão territorial, com uma área de 3.853.676.948 km<sup>2</sup>, equivalente a 42,27% do território nacional. O clima predominante na maior parte da Região norte do Brasil é o equatorial úmido, apresentando elevadas temperaturas, com médias acima de 25°C, chuvas abundantes durante todo o ano, superiores a 2.000 a 3.000 mm anuais, variando conforme os movimentos das massas de ar (BEZERRA, 2018).

### **3.1 Coleta de Dados**

Utilizou-se como critério para seleção das instituições o fato de serem referência como centro de pesquisa da região Norte e por desenvolverem projetos envolvendo melhoramento de plantas. Os dados foram obtidos a partir da solicitação de informações através de documentos formais, enviados por e-mail e direcionados aos chefes de departamento na área de interesse ou programas de pós-graduação com produção de espécies florestais, nos últimos trinta (30) anos.

No tangente as instituições de ensino, os e-mails foram direcionados aos coordenadores de mestrados de Agronomia tropical, coordenadores dos cursos de Engenharia 24 coordenadores dos programas de Ciências Florestais e Ambientais e demais pesquisadores da área, das instituições escolhidas da região Norte.

As instituições de referência com trabalhos de genética e melhoramento de plantas selecionadas foram: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária do Acre, Pará, Tocantins, Roraima, Rondônia, Amapá e Amazonas; Universidade federal do Acre (UFAC), Universidade federal do Amapá (UFAP), Universidade Federal de Roraima (UFRR), Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Universidade Federal Tocantins (UFT), Universidade Federal do Pará (UFPA), Universidade Federal do Amazonas (UFAM); e o instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA).

A pesquisa foi realizada durante os meses de agosto, setembro, outubro e novembro de 2018, a seleção dos dados ocorreu mediante a pesquisa na internet, nos portais das instituições e por respostas dos documentos enviados.

Posteriormente feito uma análise dos dados coletados em cada projeto, com o objetivo de investigar o contexto e processo que envolve cada um para elucidar questões teóricas que são estudadas, caracterizando a profundidade da investigação.

A região Norte foi escolhida pela extensa área territorial e por abranger grande quantidade de espécies florestais de grande importância para a sociedade e economia da região, os e-mails passados para os representantes de cada instituição, foram respondidos conforme o esperado e posteriormente disponibilizados alguns trabalhos de melhoramento com espécies florestais.

Entre os tópicos que foram analisados, destacou-se a espécie mais utilizada, local de estudo, método de melhoramento aplicado e ferramentas usadas na execução. Retiradas essas informações foram feitas a comparação com a literatura para justificar os métodos aplicados e como em algumas instituições foi confirmado a inexistência de projetos com espécies florestais de ciclo longo, foi apontado métodos que contribuam com o fornecimento de informações no meio acadêmico ainda não registrados na literatura.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Foram enviados 47 ofícios, 38 foram respondidos e dentro dos 38, 5 contemplavam resultados com melhoramento de espécies florestais. Correspondendo 13,16 % de respostas com programas de melhoramento com espécies florestais.

A maioria dos e-mails respondidos alguns pesquisadores concentraram em informar fontes de pesquisas e outros de que não havia quaisquer projetos com espécie florestal.

As instituições representadas pelo maior número de projetos foram: Embrapa Acre e Embrapa Roraima, (Tabela 1).

Instituições, espécies, números de projetos e local de estudo

Instituição	Nome científico	Nome vulgar	Nº de projetos	Estado
Embrapa	<i>Tectona grandis</i>	Teca	2	Acre
Embrapa	<i>Tachigali rubiginosa</i> Mat. Ex Tul.	Tachi-branco	1	Amapá
Embrapa	<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl. <i>Tachigali rubiginosa</i> Mat. Ex Tul.	Castanheira-do-Brasil Tachi branco	3 1	Roraima
Embrapa	-	-	-	Rondônia
Embrapa	-	-	-	Tocantins
Embrapa	<i>Anadenanthera peregrina</i> L. Speg	Paricá	1	Pará
Embrapa/ Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia	<i>Aniba rosaeodora</i> Ducke	Pau-rosa	1	Amazonas
Universidade Federal	<i>Khaya ivorensis</i> A. Chey.	Mogno africano	1	Roraima
Universidade Federal	-	-	-	Tocantins
Universidade Federal	-	-	-	Pará
Universidade Federal	-	-	-	Amazonas
Universidade Federal	-	-	-	Acre
Universidade Federal	-	-	-	Rondônia
Universidade Federal	-	-	-	Amapá
<b>TOTAL</b>			<b>10</b>	

Tabela 1: Instituições, espécies, número de projetos e local de estudo.

Os estados do Pará, Amapá, Amazonas, Acre e Roraima apresentaram trabalhos com as espécies *Tectona grandis*, *Tachigali rubiginosa*, *Bertholletia excelsa* e *Anadenanthera peregrina*, como demonstra na tabela 1.

A seguir serão descritos os referidos trabalhos, com seus respectivos autores, desenvolvido em cada instituto.

### Embrapa Amapá

Trabalho este com o tema: **Aplicação de Diferentes critérios de Seleção no Melhoramento Genético do Taxi-Branco**, conduzido por João Tomé de Farias Neto e Alberto William Viana de Castro, teve como objetivo avaliar diferentes critérios de seleção no melhoramento genético do taxi-branco (*Tachigali rubiginosa*). O experimento foi conduzido no Campo Experimental do Cerrado, no Amapá, utilizando 21 progênies de meios-irmãos, dispostas em blocos ao acaso com dez repetições.

Foram analisadas características como altura da planta, diâmetro à altura do peito (DAP) e biomassa, aos 96 meses após o plantio. Os resultados mostraram diferenças genéticas significativas entre as progênes e altos valores de herdabilidade, indicando grande potencial para o melhoramento genético da espécie.

Entre os métodos avaliados, a seleção combinada e o índice clássico de Smith e Hazel apresentaram maiores ganhos genéticos em comparação com a seleção direta e indireta. A seleção combinada destacou-se como a mais eficiente, especialmente por maximizar o ganho em biomassa, característica mais importante para a produção de madeira destinada ao carvão.

O estudo também discute que a seleção indireta pode ser vantajosa quando o caráter auxiliar apresenta maior herdabilidade e forte correlação genética com o caráter principal, embora, em geral, não supere a seleção direta.

Além da relevância genética, o taxi-branco possui grande importância econômica e ambiental, sendo utilizado na recuperação de áreas degradadas e na produção de energia, como lenha, carvão vegetal, álcool e coque, devido à sua alta produção de biomassa e boa aceitação no mercado.

### **Embrapa Pará**

O estudo foi realizado por Andredy Murilo Trindade Amorim, Oriel Figueira de Lemos, Camila Beatriz Lima de Souza e Dávia Rosane Rodrigues Leite. Tendo como título: **Influência da quebra de Dormência na Germinação *In Vitro* de Sementes de Paricá**, teve como objetivo avaliar métodos de quebra de dormência para germinação *in vitro* de sementes de paricá, visando apoiar o desenvolvimento de protocolos de micropropagação no melhoramento genético da espécie.

A pesquisa foi conduzida no Laboratório de Biotecnologia e Recursos Genéticos da Embrapa Amazônia Oriental, em Belém. Foram testados quatro tratamentos de quebra de dormência, com cultivo em meio MS, acompanhando desde a emissão da radícula até a formação de plântulas.

Os resultados mostraram que a escarificação química com ácido sulfúrico por 60 minutos foi o método mais eficiente, proporcionando maiores índices de germinação e melhor desenvolvimento das plântulas após 20 dias.

O trabalho destaca a importância da propagação *in vitro* como ferramenta para o melhoramento de espécies florestais, permitindo a obtenção de mudas mais vigorosas e de melhor qualidade sanitária. Além disso, reforça o potencial do paricá, uma espécie de rápido crescimento e grande valor econômico, utilizada em sistemas florestais e agroflorestais.

### **Embrapa Acre**

Na Embrapa Acre, dois estudos com teca (*Tectona grandis*) focaram na micropropagação e no cultivo *in vitro* a partir de genótipos da Amazônia Sul-Occidental. Os trabalhos desenvolveram protocolos utilizando explantes de plantas adultas e plântulas germinadas *in vitro*, com etapas de assepsia eficientes usando hipoclorito de sódio. Reguladores de crescimento como AIB, ANA e BAP foram fundamentais para o enraizamento e multiplicação de brotos.

Os resultados indicaram boa germinação, principalmente na presença de luz, e sucesso na multiplicação, destacando também que a idade dos explantes influencia no desenvolvimento. Assim, o cultivo *in vitro* se mostrou uma estratégia eficaz para a produção de mudas de qualidade e para o avanço do melhoramento genético da teca.

### **Embrapa Roraima**

Na Embrapa Roraima foram desenvolvidos quatro projetos de melhoramento genético, com destaque para a castanheira-do-brasil e o tachi-branco. No estudo com tachi-branco, foram avaliados parâmetros genéticos de crescimento em viveiro, utilizando 12 progênies em delineamento de blocos ao acaso. As mudas foram analisadas quanto à altura, número de folhas e diâmetro do colo. Os resultados indicaram que apenas a altura apresentou efeitos genéticos significativos, com herdabilidade moderada, baixo coeficiente de variação residual e potencial para ganhos genéticos, tornando a seleção eficiente tanto em nível de indivíduos quanto de progênies.

Os estudos com castanheira-do-brasil abordaram diferentes etapas do desenvolvimento. No trabalho de enxertia, realizado com oito matrizes de diferentes populações, foi observada taxa de pegamento superior a 70% e bom desenvolvimento de brotações, evidenciando a viabilidade da técnica

para aumentar a produtividade e reduzir o tempo de produção. No estudo de emergência de plântulas, verificou-se alto poder germinativo dos genótipos, com emergência entre 16 e 25 dias, além de baixa ocorrência de sementes inviáveis, indicando bom potencial para formação de mudas.

Já na análise de parâmetros genéticos, foi observada maior variabilidade genética dentro das progênies do que entre elas, além de elevados valores de herdabilidade para características como altura, número de folhas e diâmetro do colo. Esses resultados indicam que a seleção individual é mais eficiente para maximizar ganhos genéticos, embora seja importante avaliar os genótipos em fases mais avançadas.

De forma geral, os projetos demonstram grande potencial para o melhoramento genético dessas espécies, contribuindo para o desenvolvimento de mudas de qualidade, aumento da produtividade e fortalecimento dos sistemas florestais na região amazônica.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Com este levantamento pode-se observar que há carência de estudos científicos voltados para o melhoramento com espécies florestais no estado do Amazonas, visto que apenas um trabalho da Embrapa em parceria com o Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia foi encontrado no estado.

Entre os projetos que foram levantados, as técnicas de melhoramento mais utilizadas foram: cultura *in vitro*, estaquia e enxertia.

É necessário despertar o interesse da comunidade científica, no que concerne ao uso de técnicas de melhoramento para espécies florestais, pois muitas espécies estão ameaçadas de extinção, devido ao excesso da exploração madeireira. A região Norte possui uma extensa área com espécies que podem ser melhoradas, tanto para o controle de doenças, produção de energia, biomassa, madeira de melhor qualidade e preservação da floresta, porem há pouco investimento devido alto custo e o longo ciclo das espécies florestais.

## 6 REFERÊNCIAS

BETRAN, Javier; MORENO, Jesús González; IGNÁCIO, Romagosa. Teoria e aplicação de melhoramento de plantas para características quantitativas. **Participação dos agricultores**, p. 27, 2009.

BORÉM, Aluizio. A história da biotecnologia. **Biotecnologia Ciência e Desenvolvimento**, v. 34, p. 10-12, 2005.

BRUNE, Arno. Departamento de Engenharia Florestal, Cuiabá, mai., 2007. Disponível em: <<http://www.engenheirosflorestais.blogspot.com.br>> Acesso em: 17 mar. 2018.

CLEMENT, Charles; HIGUCHI, Niro. **A floresta amazônica e o futuro do Brasil**. Ciência e Cultura. v. 58, n. 3, São Paulo, 2006.

CUNHA, Gilberto Rocca. O legado de Gregor Mendel. 2005. Disponível em: <<http://www.agrolink.com.br>> Acesso em: 16 mai. 2018.

FERNANDES, Aline Cristina Miranda. Programa Cooperativo em Melhoria Florestal. In: Workshop em Melhoramento Florestal, 2014. São Paulo. **Anais**. São Paulo: IPEF, 2014, p. 12.

GOLLE, Diego Pascoal. *et al.* Melhoramento florestal: ênfase na aplicação da biotecnologia. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n. 5, 2009.

MACHADO, Altair Toledo. Construção histórica do melhoramento genético de plantas: do convencional ao participativo. **Revista brasileira de agroecologia**, v. 9, n. 1, 2014.

SARTORETTO, Maria Laudete.; SALDANHA, Cleber Witt; CORDER, Maisa Pimentel Martins. **Transformação genética: estratégias e aplicações para o melhoramento genético de espécies florestais**. Ciência Rural, v.38, n.3, p.861-871, 2008.

TUOTO, Mam. Entrevista. 2 de abril de 2003. Disponível em: <<http://www.celuloseonline.com.br>> Acesso em: 17 abr. 2018.

## CAPÍTULO 5

# LEVANTAMENTO ETNOBOTÂNICO E ETNOFARMACÊUTICO DE PLANTAS MEDICINAIS EM COMUNIDADES AMAZÔNICAS: UMA REVISÃO DE LITERATURA

Adriana Paula Farias  
Stéfani Ferreira de Oliveira  
Kathlem Souza Nelson  
Manoele Sofia Farias Coutinho  
Maria Paula Biase Fernandes  
Doi: 10.48209/978-65-5417-702-5

**Resumo:** O presente estudo consiste em uma revisão integrativa da literatura (período 2015–2025) sobre o levantamento etnobotânico e etnofarmacêutico em comunidades tradicionais da Amazônia. O objetivo central foi identificar as espécies vegetais mais utilizadas por essas populações e correlacionar seu uso empírico com evidências científicas de potencial terapêutico. A Amazônia, embora detentora de uma biodiversidade ímpar, possui 13,4% de sua flora ameaçada de extinção, o que torna urgente o registro do conhecimento tradicional. Os resultados, baseados na análise de 12 artigos científicos, apontam que espécies como Andiroba (*Carapa guianensis*), Copaíba (*Copaifera spp.*) e Unha-de-gato (*Uncaria tomentosa*) são pilares da farmacopeia local, utilizadas predominantemente para processos inflamatórios, infecciosos e cicatrização. A discussão destaca a convergência entre o saber popular e a farmacologia moderna (bioprospecção), mas alerta para a necessidade de estudos sobre segurança toxicológica, visando garantir o uso correto e seguro dessas plantas.

**Palavras-Chave:** Amazônia; Etnobotânica; Etnofarmacologia; Plantas Medicinais; Conhecimento Tradicional.

## 1 INTRODUÇÃO

O bioma da Amazônia se estende por mais de nove países, sendo que 60% dessa área está localizada no norte do Brasil, ocupando mais de 4 milhões de km<sup>2</sup> e, possivelmente, conservando a mais rica diversidade biológica do planeta. Suas extensas florestas têm um impacto profundo nos climas locais e no clima global, além de sequestrar aproximadamente 70 bilhões de toneladas de carbono (MARENGO; ESPINOZA, 2016).

A Amazônia representa o maior bioma do Brasil, abrangendo uma área de 4.212.472 km<sup>2</sup> (IBGE, 2019), onde estão presentes 73% das espécies de mamíferos e 80% das aves do país. O Brasil possui mais de 120 mil espécies de animais (CTFB, 2021), e entre as que foram analisadas em relação ao estado de conservação, 5.070 espécies foram avaliadas pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade ICMBio (2018).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2021), das, 180, ou 3,55% do total de espécies, que estão catalogadas dentro de categorias de risco de extinção, incluindo Extintas na Natureza (EW, Criticamente em Perigo (CR), Em Perigo (EN) e Vulnerável (VU). No que diz respeito à vegetação, segundo a Flora do Brasil (2021), das 49.987 espécies reconhecidas na flora brasileira (nativas, cultivadas e naturalizadas), 13.056 são encontradas no bioma Amazônia. Dentre essas, 1.610 têm seu estado de conservação conhecido, e 13,4% estão ameaçadas de extinção.

Diante do cenário exposto, observa-se que a magnitude da biodiversidade amazônica contrasta com a fragilidade de seu ecossistema, evidenciada pelo preocupante índice de 13,4% de espécies vegetais ameaçadas. Nesse contexto, o levantamento etnobotânico e etnofarmacêutico junto às comunidades locais apresenta-se como uma urgência científica e socioambiental.

Mais do que registrar o uso de recursos naturais, este estudo busca salvaguardar o patrimônio imaterial dessas populações, impedindo que o conhecimento tradicional sobre o potencial terapêutico da flora se perca antes mesmo de ser compreendido pela ciência formal. Portanto, a presente pesquisa

justifica-se pela necessidade de converter a riqueza biológica em estratégias de conservação e soberania em saúde, fundamenta-se na premissa de que preservar a floresta é, indissociavelmente, preservar os saberes de quem nela habita.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Perspectiva Etnobotânica e Conhecimento Tradicional**

A pesquisa etnobotânica contemporânea evoluiu de uma simples classificação de usos para uma análise profunda das interpretações culturais e gestão da flora (ALBUQUERQUE; ANDRADE, 2019). No Brasil, embora os estudos tenham focado historicamente em populações indígenas, investigações recentes estenderam-se para comunidades ribeirinhas, que possuem um saber híbrido e rico sobre a biodiversidade local (ABREU, 2020). Segundo Jorge e Morais (2023), essa interação material e simbólica é essencial para a conservação ambiental, pois as comunidades tradicionais atuam como guardiãs do patrimônio genético.

Atualmente, há um grande interesse dos etnobotânicos no estudo e publicação dos saberes tradicionais, entre eles o uso das plantas medicinais (OLIVEIRA et al., 2009). Desse modo, cria-se a expectativa de um diálogo entre os saberes tradicionais e os saberes científicos, onde dúvidas da ciência são respondidas pelo conhecimento popular e vice-versa.

O Brasil é marca por uma grande variedade, tanto em termos de biodiversidade quanto no culturas africana, europeia e indígena. Como resultado, observa-se uma mistura de interações entre os componentes e biológico nativo e estrangeiro, criando um ambiente propício para a Etnofarmacologia (ELISABETSKY, 2003). Segundo ALBUQUERQ et al. (2014) fazem uma reflexão sobre a abordagem etnofarmacológica na descoberta e no desenvolvimento de novas drogas a partir das plantas medicinais.

## **2.2 Plantas Medicinais e Bioprospecção na Amazônia**

Estima-se que cerca de 40% das espécies de plantas superiores na Amazônia possuam propriedades terapêuticas potenciais (ELISABETSKY; COSTAAMPOS, 2016). Estudos etnofarmacológicos realizados na região de Itacoatiara demonstraram uma alta diversidade botânica, com destaque para famílias que tratam enfermidades infecciosas e inflamatórias (FERREIRA, 2016). A bioprospecção assertiva depende diretamente da sistematização desse uso popular, reduzindo tempo e custos na identificação de moléculas com potencial farmacológico real (RODRIGUES; CARVALHO, 2025).

Documentar os usos terapêuticos que as populações locais atribuem às plantas é fundamental para preservar os conhecimentos locais, sobre cuidados fundamentais para a saúde (VANDEBROEK et al., 2011), bem como apontar possíveis espécies relevantes para estudos farmacológicos e toxicológicos, tanto para a criação de novos medicamentos quanto para garantir a segurança no uso dessas espécies. (ALBUQUERQUE; HANAZAKI, 2006; RIBEIRO et al., 2014).

A variedade de ecossistemas do planeta, combinada com os progressos dos estudos químicos e farmacológicos, têm incentivado a investigação com espécies vegetais, auxiliando na criação de novos produtos com atividade farmacológica. Isso evidencia que o registro de estudos etnobotânicos e etnofarmacológicos é essencial para o uso sustentável dos recursos biológicos e desempenha um papel crucial na escolha de plantas para estudo, quando realizados com uma metodologia adequada (VIEIRA et al., 2014).

Segundo SILVA (2013), atualmente há um esforço para combinar o conhecimento tradicional com a pesquisa científica, de modo que o progresso nas investigações de novos fármacos e produtos variados de origem vegetal não afete o progresso do conhecimento tradicional em curso, relegando-o à marginalidade ou, ainda mais grave, estabelecendo formas de negar-lhe o direito de ser elaborado.

Muitos pensam que a estratégia mais eficaz para auxiliar a identificação de espécies que possam ter compostos bioativos envolve a etnobiologia.

Essa perspectiva, particularmente a etnobotânica, tem sido fundamental para a identificação de espécies úteis na criação de novos medicamentos (PRADO; MURRIETA, 2015).

### **2.3 Espécies de plantas medicinais mais citadas na literatura**

A região Amazônica reúne uma rica diversidade de espécies vegetais utilizadas tradicionalmente por comunidades locais como fontes terapêuticas. Levantamentos etnobotânicos realizados na Amazônia Legal demonstram que múltiplas espécies são citadas por sua eficácia que são notadas no tratamento de condições de saúde comuns, como inflamações, infecções e dores (PÁSCOA JÚNIOR; SOUZA, 2021).

Neste sentido, pesquisas etnobotânicas em comunidades ribeirinhas apontam espécies frequentemente mencionadas, como *Carapa guianensis* (andiroba), utilizada para alívio de dores e inflamação; *Copaifera* spp. (copaíba), empregada como anti-inflamatório e cicatrizante; e *Uncaria tomentosa* (unha-de-gato), conhecida por suas propriedades imunomoduladoras (SARQUIS et al., 2019). Esses levantamentos também destacam o uso de outras plantas medicinais, como *Vismia* spp., *Aspidosperma* spp. e *Piper* spp., frequentemente citadas em estudos etnobotânicos na região (PÁSCOA JÚNIOR; SOUZA, 2021).

Além disso, revisões sistemáticas sobre plantas medicinais na Amazônia apontam que as espécies mais citadas na literatura não apenas refletem a diversidade florística local, mas também a transmissão cultural de saberes terapêuticos que se perpetuam ao longo de gerações (PEREIRA; LIMA; SOUZA, 2021). Esse conhecimento tradicional tem sido documentado em diversas localidades, consolidando um repertório de plantas com longa história de uso e reconhecimento popular, o que justifica sua presença recorrente em estudos etnobotânicos e etnofarmacológicos (SARQUIS et al., 2019; PEREIRA; LIMA; SOUZA, 2021).

## 2.4 Potencial Terapêutico e Evidências Farmacológicas

A literatura científica indica que diversas espécies medicinais amazônicas possuem compostos bioativos com potencial terapêutico comprovado em estudos fitoquímicos e farmacológicos. Esses metabolitos secundários, como flavonoides, alcaloides, triterpenos e sesquiterpenos, estão associados a atividades antioxidantes, anti-inflamatórias, antimicrobianas e imunomoduladoras (PÁSCOA JÚNIOR; SOUZA, 2021).

Estudos experimentais com extratos de *Carapa guianensis* demonstraram atividade anti-inflamatória significativa, atribuída à presença de ácidos oleico e linoleico e de compostos triterpênicos, corroborando seu uso tradicional na redução de dor e inflamação (FONSECA, 2024; OLIVEIRA; MENDONÇA, 2025).

FONSECA et al., (2024) relatam que a *Carapa guianensis* é amplamente utilizado por populações tradicionais em particular na Amazônia brasileira, por causa de suas propriedades anti-inflamatórias, antirreumáticas, antissépticas, curativas e antipiréticas. Pesquisas demonstraram que estudos experimentais de *Carapa guianensis* têm atividade anti-inflamatória significativa, atribuída à presença de ácidos oleico e linoleico e de compostos triterpênicos, corroborando seu uso tradicional na redução de dor e inflamação.

De forma semelhante, pesquisas com óleo de *Copaifera* spp. evidenciaram atividade antimicrobiana e cicatrizante, reforçando seu potencial farmacológico para aplicações tópicas e sistêmicas (DIEFENBACH et al., 2018).

Ensaio farmacológicos também relatam que extratos de *Uncaria tomentosa* apresentam atividade imunomoduladora e antioxidante, com efeitos comprovados em modelos pré-clínicos, o que sustenta sua utilização popular para reforço imunológico e suporte em condições inflamatórias (RIBEIRO et al., 2022). Esses e outros estudos contribuem para a construção de uma base científica que não apenas valida parte do uso tradicional, mas também abre perspectivas para o desenvolvimento de fitoterápicos com eficácia e segurança comprovadas.

No entanto, apesar dos avanços, a literatura enfatiza a necessidade de ensaios clínicos e estudos de toxicidade que permitam estabelecer protocolos de uso seguro dessas plantas em contextos clínicos mais amplos, o que ainda é lacunar em muitos casos (PÁSCOA JÚNIOR; SOUZA, 2021; PEREIRA; LIMA; SOUZA, 2021).

### **3 METODOLOGIA**

O presente estudo caracteriza-se como uma revisão integrativa da literatura, método que permite a síntese de distintos estudos publicados, possibilitando conclusões abrangentes sobre um fenômeno específico (MENDES; SILVEIRA; GALVÃO, 2008). Para a condução desta revisão, o processo foi estruturado em etapas: elaboração da pergunta norteadora, busca na literatura, coleta de dados, análise crítica dos estudos incluídos, discussão dos resultados e apresentação da síntese do conhecimento.

Com o propósito de direcionar a busca e a análise, estabeleceu-se a seguinte questão norteadora: “Quais espécies medicinais são utilizadas por comunidades amazônicas e quais seus principais usos terapêuticos descritos na literatura?”

A busca foi realizada mediante consulta às bases de dados: Scientific Electronic Library Online (SciELO), Literatura Latino-Americana e do Caribe em Ciências da Saúde (LILACS) e PubMed/MEDLINE. Adicionalmente, utilizou-se o Google Acadêmico para o rastreamento de literatura e ampliação da busca em áreas onde a produção acadêmica formal poderia ser escassa.

Utilizou-se descritores e palavras chaves, cruzados com os operadores booleanos *AND* e *OR*, nos idiomas português, inglês e espanhol. As principais combinações incluíram: “plantas medicinais” *AND* “Amazônia”; “espécies medicinais” *AND* “comunidades tradicionais”; “medicinal plants” *AND* “Amazon region”; “ethnobotany” *AND* “Amazon communities”.

Para aprimoramento da amostra, foram definidos critérios rigorosos de inclusão e exclusão, detalhados no quadro abaixo:

**Quadro 1 – Critérios de inclusão e exclusão adotados na revisão integrativa sobre espécies medicinais utilizadas por comunidades amazônicas, 2015–2025**

CRITÉRIOS DE INCLUSÃO	CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO
Artigos científicos publicados entre 2015 e 2025.	Estudos duplicados entre as bases de dados.
Estudos originais, revisões e pesquisas etnobotânicas.	Trabalhos sem identificação taxonômica das espécies.
Foco em comunidades Amazônicas (ribeirinhas, indígenas, quilombolas ou tradicionais).	Artigos sobre outras regiões sem relação direta com a Amazônia.
Publicações disponíveis na íntegra para leitura.	Resumos simples, editoriais e trabalhos sem rigor metodológico.

Fonte: Elaborado pelas autoras (2026).

A seleção dos estudos ocorreu de forma sistemática em três etapas: (1) leitura dos títulos, (2) análise dos resumos e (3) leitura integral dos textos pré-selecionados. O fluxo de seleção seguiu as recomendações do modelo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), conforme ilustrado abaixo:

Os dados dos estudos selecionados foram extraídos e organizados em um instrumento de coleta contendo as seguintes variáveis: Identificação (autor e ano); Local da pesquisa e tipo de comunidade estudada; Dados botânicos (espécie medicinal, nome popular, nome científico e família); Uso etnofarmacológico (parte utilizada e forma de preparo); e Indicações terapêuticas relatadas.

A análise dos dados foi conduzida de forma descritiva e temática. As espécies foram categorizadas conforme suas famílias botânicas e indicações terapêuticas (ex.: uso gastrointestinal, respiratório, dermatológico, entre outros). Procedeu-se também a análise da recorrência das espécies, visando identificar aquelas de maior relevância cultural e potencial terapêutico para as comunidades amazônicas, consolidando o conhecimento atual sobre a biodiversidade medicinal da região.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A pesquisa nas bases de dados resultou na seleção de 12 artigos que cumpriram rigorosamente os critérios de inclusão. A análise mostrou que a maioria dos estudos foi conduzida com comunidades indígenas e ribeirinhas nos estados do Pará e Amazonas. A Tabela 1, apresenta um resumo das espécies mais citadas e seus respectivos perfis de uso, de acordo com a sistematização encontrada na literatura revisada.

Tabela 1 – Principais espécies vegetais citadas em levantamentos etnobotânicos na Amazônia, indicações terapêuticas e partes utilizadas (2015–2025)

Nome popular	Nome científico	Família	Indicações terapêuticas	Parte utilizada
Andiroba	<i>Carapa guianensis</i> Aubl.	Meliaceae	Inflamações, contusões, cicatrizante	Sementes (óleo)
Copaíba	<i>Copaifera</i> spp.	Fabaceae	Anti-inflamatório, infecção urinária	Tronco (óleo-resina)
Unha-de-gato	<i>Uncaria tomentosa</i> (Willd.) DC.	Rubiaceae	Imunomodulador, reumatismo	Casca e raízes
Saracura-mirá	<i>Ampelozizyphus amazonicus</i> Ducke	Rhamnaceae	Malária, tônico, fortificante	Cascas e raízes
Mastruz	<i>Dysphania ambrosioides</i> (L.) Mosyakin	Amaranthaceae	Vermífugo, gripe, fraturas	Folhas
Quina-quina	<i>Cinchona</i> spp.	Rubiaceae	Febre, malária, distúrbios digestivos	Cascas

Fonte: Elaboração pelas autoras (2026).

Os resultados confirmam a declaração de PÁSCOA JÚNIOR; SOUZA, (2021) a respeito da importância de determinadas “espécies-chave” no sistema de saúde tradicional da Amazônia. A Andiroba (*Carapa guianensis*) e a Copaíba (*Copaifera* spp.) estiveram presentes em todos os estudos examinados, evidenciando uma robusta transmissão de conhecimento intergeracional acerca dessas espécies.

A utilização predominante de óleos e resinas para tratar processos inflamatórios e infecciosos demonstra como as comunidades se adaptam aos problemas locais, como picadas de insetos, ferimentos causados pelo manejo extrativista e doenças osteomusculares resultantes do trabalho manual. Como indicado na fundamentação, a presença de terpenos e ácidos graxos nessas espécies comprova cientificamente a eficácia percebida empiricamente pelos ribeirinhos (FONSECA, 2024).

Um ponto relevante na discussão é a utilização da Unha-de-gato (*Uncaria tomentosa*). Embora seja uma planta de mata de terra firme, sua citação recorrente em comunidades ribeirinhas indica um fluxo de conhecimento que transcende a barreira geográfica, integrando-se ao “repertório de cura” da região. Abaixo, a Tabela 2, sistematiza a correlação entre o uso popular identificado e as evidências farmacológicas encontradas na literatura:

Tabela 2 – Correlação entre uso popular e potencial farmacológico das espécies amazônicas revisadas

<b>Espécie</b>	<b>Uso popular (Etnobotânica)</b>	<b>Evidência farmacológica (Etnofarmacologia)</b>
Copaíba	Cicatrizante e antisséptico genital.	Atividade antimicrobiana contra <i>Staphylococcus aureus</i> e fungos.
Andiroba	Repelente e anti-inflamatório.	Ação antiedematogênica e inibição de mediadores pró-inflamatórios.
Mastruz	Tratamento de verminoses.	Presença de ascaridol, com comprovada ação anti-helmíntica.
Saracura-mirá	Prevenção da malária.	Estudos indicam atividade adaptógena e potencial citotóxico moderado.

Fonte: Elaborado pelas autoras (2026).

Cita-se, que a concordância de autores como Fonseca (2024) e Ribeiro et al. (2022) enfatiza que o saber tradicional não é fixo, sendo, ao contrário, corroborado por pesquisas farmacológicas atuais. A presença constante de espécies como *Carapa guianensis* e *Copaifera spp.* em diversos estudos (2018–2024) indica que essas plantas formam o alicerce da farmacopeia popular amazônica, tornando-se alvos prioritários para estratégias de conservação e bioprospecção.

No entanto, a discussão revela uma lacuna importante: a segurança toxicológica. Apesar de seu uso ser milenar, estudos recentes (PEREIRA; LIMA; SOUZA, 2021) alertam que a preparação inadequada ou a dosagem empírica de plantas como o Mastruz (*Dysphania ambrosioides*) pode levar a toxicidade hepática e renal. Isso destaca a importância de que os estudos etnofarmacêuticos não só registrem informações, mas também forneçam orientações sobre o uso seguro, fomentando uma educação em saúde que considere a cultura local e não negligencie os riscos biológicos.

Sendo assim, a preservação desses conhecimentos está diretamente relacionada à conservação do bioma. Com 13,4% das espécies da Amazônia ameaçadas, a perda de um ecossistema resulta no desaparecimento de uma farmácia natural e, como consequência, na perda do patrimônio imaterial das comunidades que possuem essas fórmulas de cura.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A revisão dos estudos publicados nos últimos dez anos, evidencia que o uso de plantas medicinais em comunidades Amazônicas é sustentado por uma sólida base de conhecimento tradicional, validada por propriedades farmacológicas comprovadas. Espécies como andiroba, copaíba e unha-de-gato destacam-se pela versatilidade terapêutica, reforçando o potencial da região para a bioprospecção de novos fármacos. Entretanto, a transição do uso empírico para o uso clínico seguro ainda demanda estudos mais rigorosos sobre toxicidade, dosagem e padronização.

Para além da farmacologia, o registro etnobotânico apresenta-se como uma estratégia vital de resistência cultural e conservação ambiental frente ao desmatamento. Conclui-se que a valorização do saber tradicional é indissociável da proteção do bioma. Portanto, o avanço da área depende de pesquisas que promovam a articulação entre o rigor acadêmico e as necessidades das populações tradicionais, garantindo um desenvolvimento científico que seja, acima de tudo, ético e sustentável.

## 6 REFERÊNCIAS

ABREU, J. R. *Estratégias de uso de recursos vegetais em comunidades tradicionais*. Recife: Edufpe, 2020.

ALBUQUERQUE, U. P.; ANDRADE, L. H. C. *Etnobotânica aplicada à conservação da biodiversidade*. 2. ed. Recife: NUPEEA, 2019.

ALBUQUERQUE, U. P.; HANAZAKI, N. As pesquisas etnodirigidas na descoberta de novos fármacos de interesse médico e farmacêutico: fragilidades e perspectivas. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, v. 16, p. 678-689, dez. 2006.

ALBUQUERQUE, U. P. et al. Are ethnopharmacological surveys useful for the discovery and development of drugs from medicinal plants? *Revista Brasileira de Farmacognosia*, v. 24, p. 110-115, 2014.

BFG (BRAZIL FLORA GROUP). *Flora do Brasil 2020*. Rio de Janeiro: Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2021. p. 1-28. DOI: <https://doi.org/10.47871/jbrj2021001>.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. *Amazônia*. Brasília, DF: MMA, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/biomas-e-ecossistemas/biomas/amazonia>. Acesso em: 10 abr. 2026.

CTFB. *Catálogo Taxonômico da Fauna do Brasil*. Disponível em: <http://fauna.jbrj.gov.br/fauna/faunadobrasil/2>. Acesso em: 8 abr. 2026.

DIEFENBACH, A. L. et al. Antimicrobial activity of copaiba oil (*Copaifera* spp.) on oral pathogens: systematic review. *Phytotherapy Research*, v. 32, n. 4, p. 586–596, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/ptr.5992>.

ELISABETSKY, E.; COSTA-CAMPOS, L. *Etnofarmacologia e a busca de novos fármacos*. Porto Alegre: UFRGS, 2016.

FERREIRA, A. P. *Levantamento etnobotânico na região do Arari*. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas, Itacoatiara, 2016.

FERREIRA, D. L. R. *Plantas medicinais utilizadas em comunidades rurais de Itacoatiara e aspectos anatômicos e histoquímicos de espécies*. 2016. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

FONSECA, A. S. A. D. et al. Effects of andiroba oil (*Carapa guianensis* Aublet) on the immune system in inflammation and wound healing: a scoping review. *Journal of Ethnopharmacology*, v. 327, p. 118004, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2024.118004>.

ICMBIO. *Livro vermelho da fauna brasileira ameaçada de extinção*. 1. ed. Brasília, DF: ICMBio/MMA, 2018. v. 1.

JORGE, S. S.; MORAIS, L. C. *Interações humano-planta: uma abordagem etnobotânica*. São Paulo: Edusp, 2023.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, v. 36, p. 1033–1050, 2016.

MENDES, K. D. S.; SILVEIRA, R. C. C. C.; GALVÃO, C. M. Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem. *Texto & Contexto – Enfermagem*, v. 17, n. 4, p. 758-764, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-07072008000400018>.

OLIVEIRA, F. C. et al. Avanços nas pesquisas etnobotânicas no Brasil. *Acta Botanica Brasilica*, v. 23, n. 2, p. 590-605, 2009.

PÁSCOA JÚNIOR, J. G.; SOUZA, I. L. L. Medicinal plants used in the Amazon region: a systematic review. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 14, e163101419965, 2021.

PEREIRA, K.; LIMA, M. A.; SOUZA, G. O. Plantas nativas da região amazônica: uma revisão integrativa acerca da sua aplicação na fitoterapia. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 14, p. 1-7, 2021.

PRADO, H. M.; MURRIETA, R. S. S. A etnoecologia em perspectiva: origens, interfaces e correntes atuais. *Ambiente & Sociedade*, v. 18, n. 4, p. 139-160, 2015.

RIBEIRO, D. A. et al. Potencial terapêutico e uso de plantas medicinais em área de Caatinga. *Revista Brasileira de Plantas Medicinais*, v. 16, n. 4, p. 912-930, 2014.

RIBEIRO, N. R.; RIBEIRO, J. S.; SANTOS, J. S. Potencial funcional da unha-de-gato (*Uncaria tomentosa*): revisão dos efeitos terapêuticos. *Scire Salutis*, v. 12, n. 1, p. 328-336, 2022. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2236-9600.2022.001.0036>.

RODRIGUES, E. S.; CARVALHO, T. P. Bioprospecção e conservação na Amazônia Central. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 40, n. 2, 2025.

SARQUIS, R. S. F. R. et al. The use of medicinal plants in the riverside community of the Mazagão River, Brazilian Amazon. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2019, Article ID 6087509.

SILVA, P. S. O. *Plantas medicinais e produtos florestais não madeireiros (PFNMs)*. 2013. Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2013.

VANDEBROEK, I. et al. Local knowledge: who cares? *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, v. 7, n. 1, p. 35, 2011.

VIEIRA, D. R. P. et al. Plantas e constituintes químicos empregados em odontologia. *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, v. 16, n. 1, p. 135-167, 2014.

## CAPÍTULO 6

# POTENCIAL DE EXTRATOS E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS MADEIREIROS DE *Zygia racemosa* PARA A BIOECONOMIA AMAZÔNICA

Larissa Castro Rodrigues  
Priscila Carvalho Dahmer  
Deolinda Lucianne Ferreira Garcia  
Doi: 10.48209/978-65-5417-702-6

**Resumo:** A bioeconomia amazônica depende do uso sustentável da biodiversidade e da valorização de recursos florestais capazes de gerar produtos e processos de maior valor agregado. Nesse contexto, a prospecção de extrativos vegetais e o aproveitamento de resíduos madeireiros constituem estratégias promissoras para ampliar o uso integral da biomassa e fortalecer cadeias produtivas baseadas em espécies nativas. O presente trabalho teve como objetivo analisar, por meio de levantamento bibliográfico, o potencial de *Zygia racemosa* para obtenção de extrativos e valorização de resíduos madeireiros, considerando os registros disponíveis para a espécie e sua inserção no gênero *Zygia* e na família Fabaceae. Os estudos localizados indicam a ocorrência de metabólitos secundários, especialmente esteroides e triterpenos, em extratos da madeira e de resíduos madeireiros, além de atividade antifúngica associada ao extrato metanólico. Também foram identificados indícios de potencial químico em outras matrizes vegetais do gênero, como casca, ramos e sementes, o que amplia a perspectiva de aproveitamento integral da biomassa. Em conjunto, esses achados sugerem que *Z. racemosa* apresenta potencial para investigações voltadas à prospecção fitoquímica, à valorização de subprodutos florestais e ao desenvolvimento de aplicações alinhadas à bioeconomia amazônica, embora ainda sejam necessários estudos que aprofundem a caracterização química e funcional da espécie.

**Palavras-Chave:** Valorização de subprodutos; biomassa florestal; compostos bioativos; espécie arbórea amazônica.

## 1 INTRODUÇÃO

A bioeconomia amazônica tem se consolidado como uma abordagem estratégica para promover o uso sustentável da biodiversidade, associando conservação ambiental, geração de renda e agregação de valor a recursos florestais regionais (Krainovic *et al.*, 2025). Nesse cenário, o aproveitamento de biomassa vegetal e de resíduos oriundos do uso madeireiro desponta como uma alternativa promissora para o desenvolvimento de produtos e processos de interesse biotecnológico, sobretudo quando voltado a espécies arbóreas nativas ainda pouco exploradas pela literatura científica (Costa *et al.*, 2022).

Entre as possibilidades de inserção da biodiversidade amazônica em cadeias bioeconômicas, destaca-se a obtenção de extrativos vegetais. Esses compostos, presentes em diferentes órgãos da planta, como madeira, casca, ramos, sementes e folhas, desempenham funções ecológicas relacionadas à defesa química e à adaptação ao ambiente, além de apresentarem potencial farmacológico, antifúngico, antioxidante e tecnológico (Almada-Vilhena *et al.*, 2024). Dessa forma, a prospecção de extrativos de espécies arbóreas amazônicas pode contribuir não apenas para a ampliação do conhecimento fitoquímico, mas também para o aproveitamento integral da biomassa e a valorização de produtos, subprodutos e resíduos florestais (Saldarriaga *et al.*, 2025).

Essa perspectiva é especialmente importante para espécies ainda pouco exploradas pela literatura científica. Embora a Amazônia concentre grande diversidade de espécies vegetais com potencial econômico e biotecnológico, muitas delas permanecem subinvestigadas quanto à composição química, à obtenção de extrativos e às possibilidades de uso de diferentes matrizes vegetais. Tal lacuna limita o avanço de estratégias voltadas à bioeconomia regional, particularmente aquelas baseadas na valorização de resíduos e no aproveitamento integrado da biomassa vegetal (Costa *et al.*, 2022).

Nesse cenário, *Zygia racemosa* (Ducke) Barneby & J.W. Grimes, da família Fabaceae apresenta interesse potencial. A literatura disponível sobre a espécie ainda é escassa, mas já aponta evidências de metabólitos secundários em diferentes matrizes vegetais, especialmente na casca do tronco e em resíduos

madeireiros, sugerindo relevância para estudos fitoquímicos e para abordagens voltadas ao aproveitamento de subprodutos florestais. Além disso, a inserção da espécie no gênero *Zygia* amplia sua pertinência científica, uma vez que esse grupo botânico reúne espécies reconhecidas pela diversidade de compostos fenólicos, flavonoides, terpenoides e saponinas, frequentemente associados a atividades biológicas e a aplicações tecnológicas (Souza *et al.*, 2022; Gutiérrez-Durán *et al.*, 2026).

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo analisar o potencial de *Z. racemosa* quanto à obtenção de extrativos e à valorização de resíduos madeireiros, com ênfase nas evidências já descritas para a espécie e em suas possíveis contribuições para a bioeconomia amazônica. Ao reunir e discutir essas informações, busca-se evidenciar oportunidades de agregação de valor à biomassa florestal e destacar a necessidade de ampliar o conhecimento aplicado sobre espécies arbóreas ainda subexploradas.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Extrativos vegetais e sua relevância em diferentes órgãos da planta**

Os extrativos vegetais correspondem à fração não estrutural dos tecidos vegetais, passível de remoção por solventes, e compreendem metabólitos secundários associados a múltiplas funções ecológicas e fisiológicas nas plantas (Torres-Rodriguez *et al.*, 2024). Em espécies arbóreas, esses compostos podem estar distribuídos em diferentes órgãos, como madeira, casca, folhas, sementes, ramos, flores e raízes, exercendo papéis relacionados à defesa contra patógenos e herbívoros, à proteção frente a estresses abióticos e à mediação de interações ecológicas (Pang *et al.*, 2021). Entre as classes mais recorrentes de extrativos destacam-se compostos fenólicos, flavonoides, taninos, terpenoides, saponinas, alcaloides e glicolipídios, muitos dos quais apresentam interesse farmacológico, antioxidante, antifúngico e tecnológico (Gutiérrez-Durán *et al.*, 2026; Brilhante *et al.*, 2025).

No caso da madeira, os extrativos têm sido amplamente associados à cor, ao odor, à resistência natural à deterioração e à durabilidade do lenho.

Valette *et al.* (2017) destacam que, embora representem uma fração minoritária da madeira, esses compostos constituem fonte importante de moléculas bioativas, e sua ação antifúngica tem sido atribuída a mecanismos como sequestro de radicais e metais, interação direta com enzimas, desorganização de membranas e perturbação da homeostase iônica. Nesse sentido, os extrativos não apenas influenciam características físico-químicas da madeira, mas também podem exercer papel funcional na proteção do material lenhoso (Valette *et al.*, 2017).

Entretanto, a obtenção de extrativos de interesse não se restringe à madeira. Em Fabaceae, a diversidade fitoquímica da família indica que diferentes órgãos vegetais podem constituir matrizes complementares para prospecção química. Gutiérrez-Durán *et al.* (2026), em revisão sistemática, observaram predominância de compostos fenólicos e flavonoides entre os metabólitos mais frequentemente registrados em espécies da família, além de taninos, terpenoides e saponinas. Já Silva *et al.* (2025), ao revisarem flavonoides em Fabaceae, ressaltam que esses compostos estão distribuídos em sementes, folhas, caules, flores e raízes, desempenhando funções relacionadas à defesa, à adaptação metabólica e à proteção contra radiação ultravioleta. Esses dados reforçam que o potencial de extrativos em Fabaceae deve ser compreendido de forma ampla, considerando diferentes partes da planta e não apenas o lenho.

De forma complementar, estudo com extrativos de casca de oito Fabaceae amazônicas demonstrou atividade fungistática contra fungos apodrecedores da madeira e identificou taninos, flavonoides, terpenos, alcaloides e antraquinonas como constituintes relevantes, destacando o potencial desses extrativos como alternativas naturais a preservantes sintéticos (Nascimento *et al.*, 2025).

## **2.2 Extrativos no gênero *Zygia* e na espécie *Zygia racemosa***

No gênero *Zygia*, os estudos ainda são relativamente escassos, o que limita uma discussão mais ampla sobre seus constituintes químicos e potenciais biológicos. Nesse contexto, *Zygia racemosa*, conhecida popularmente como angelim-rajado, também permanece pouco explorada na literatura, razão pela

qual sua interpretação teórica precisa ser sustentada não apenas por evidências específicas da espécie, mas também por informações do gênero *Zygia* e da família Fabaceae. O estudo mais diretamente relacionado à espécie demonstra o registro de triterpenos saponínicos na casca do tronco, indicando que o potencial de obtenção de extrativos em *Z. racemosa* não se restringe à madeira. Esse panorama inicial sugere que o interesse fitoquímico da espécie se estende a outros órgãos vegetais e reforça a necessidade de investigações que considerem diferentes estruturas da planta.

A ampliação para o gênero *Zygia* reforça essa perspectiva. Souza *et al.* (2022) registram que, em outras espécies do gênero, já foram descritos compostos extraíveis em órgãos distintos da madeira, como ramos e sementes. Em *Z. cauliflora* (Willd.) Killip, por exemplo, foram reportados esterolglicosídeo e esterolglicolipídios em ramos, enquanto, em *Z. dulcis* (Roxb.) A.Lyons, foram descritas saponinas triterpênicas em sementes. Esses dados demonstram que o potencial químico do gênero não está concentrado em um único tecido, mas distribuído em diferentes partes da planta, o que amplia a plausibilidade de abordagens voltadas ao aproveitamento integral da biomassa.

Além da diversidade de matrizes, o gênero *Zygia* também apresenta indícios de aplicação tecnológica de extratos. Domingues *et al.* (2020) avaliaram o extrato de sementes de *Z. cauliflora* como coagulante natural para tratamento de água, observando resultados promissores de remoção de cor, turbidez, absorvância em UV254 e matéria orgânica dissolvida. Embora esses achados não possam ser extrapolados diretamente para *Z. racemosa*, eles reforçam que espécies do gênero podem fornecer frações extraíveis com aplicação funcional, o que amplia sua relevância no contexto da valorização de recursos vegetais.

Em escala mais ampla, a inserção de *Z. racemosa* em Fabaceae torna essa discussão ainda mais consistente. Revisões recentes mostram que a família reúne grande diversidade de metabólitos secundários, com destaque para fenólicos, flavonoides, taninos, terpenoides e saponinas, e que esses compostos estão distribuídos em diferentes órgãos vegetais. Brilhante *et al.* (2025) destacam que flavonoides em Fabaceae ocorrem em sementes, folhas, caules, flores e raízes, sendo que muitos dos compostos incomuns revisados foram encontrados prin-

principalmente em raízes e folhas. Já Gutiérrez-Durán *et al.* (2026) ressaltam que a diversidade fitoquímica da família sustenta seu amplo potencial biológico e farmacológico.

Considerando a diversidade fitoquímica registrada em Fabaceae e os dados disponíveis para o gênero *Zygia*, a Tabela 1 sintetiza os principais órgãos vegetais de interesse, as classes de extrativos mais recorrentes e suas possibilidades de aproveitamento, evidenciando o potencial químico do grupo.

Tabela 1 – Órgãos vegetais, classes de extrativos e potencial de aproveitamento no gênero *Zygia* e na família Fabaceae

Órgão vegetal	Classes de extrativos mais recorrentes	Exemplos no gênero/família	Potencial de aproveitamento
Madeira	Esteroides, triterpenos, compostos fenólicos	Resíduos madeireiros de <i>Zygia racemosa</i> com esteroides e triterpenos; extrativos lenhosos em Fabaceae associados à proteção biológica	Prospecção química, bioatividade, valorização de resíduos madeireiros
Casca	Taninos, flavonoides, terpenos, alcaloides, antraquinonas	Casca do tronco de <i>Z. racemosa</i> com triterpenos saponínicos; cascas de Fabaceae amazônicas com atividade fungistática	Preservantes naturais, fungistáticos, aproveitamento de subprodutos florestais
Ramos	Esterolglicosídeos e glicolipídios esteroidais	Registros em <i>Z. cauliflora</i>	Ampliação das matrizes de extração e aproveitamento integral da biomassa
Sementes	Saponinas triterpênicas, flavonoides e outros metabólitos secundários	Sementes de <i>Z. dulcis</i> com saponinas triterpênicas; sementes de <i>Z. cauliflora</i> com uso em tratamento de água	Coagulantes naturais, extratos funcionais, aplicação tecnológica
Folhas	Flavonoides, fenólicos, taninos, terpenoides	Distribuição ampla desses compostos em Fabaceae	Potencial antioxidante, antimicrobiano e farmacológico
Raízes e outros órgãos	Flavonoides, saponinas, terpenoides e metabólitos diversos	Registros gerais em Fabaceae	Ampliação da prospecção fitoquímica e uso integral da biomassa

**Fonte:** elaborado pelas autoras com base em Souza et al. (2022), Gutiérrez-Durán et al. (2026), Nascimento et al. (2025) e Domingues et al. (2020).

### 3 METODOLOGIA

Trata-se de uma pesquisa bibliográfica, de caráter descritivo e abordagem qualitativa, desenvolvida com o objetivo de reunir e analisar informações científicas sobre *Z. racemosa*, com ênfase no potencial de obtenção de extrativos, na ocorrência de metabólitos secundários em diferentes matrizes vegetais e nas possibilidades de valorização de resíduos madeireiros no contexto da bioeconomia amazônica.

O levantamento bibliográfico foi realizado em bases de dados científicas e ferramentas de busca acadêmica, incluindo Google Acadêmico, SciELO, PubMed e Portal de Periódicos CAPES, além de literatura complementar disponível em bases botânicas e repositórios institucionais. A estratégia de busca foi construída a partir do nome científico da espécie, associado a descritores em português e inglês, como “extrativos”, “metabólitos secundários”, “resíduos madeireiros”, “madeira”, “folha”, “atividade antifúngica”, “Fabaceae” e “bioeconomia”, utilizando os operadores booleanos AND e OR. Foram priorizadas publicações no período de 2010 a 2026, admitindo-se a inclusão de estudos anteriores e de literatura complementar quando relevantes para a contextualização química, biológica e taxonômica da espécie, do gênero e da família analisados.

Foram incluídos estudos que apresentassem informações diretamente relacionadas a *Z. racemosa*, contemplando aspectos como composição química, ocorrência de extrativos, parte vegetal analisada, propriedades da madeira, atividade biológica e potencial de aproveitamento de resíduos. Considerando a escassez de publicações específicas sobre a espécie, também foram utilizados estudos referentes ao gênero *Zygia* e à família Fabaceae, desde que contribuíssem para a contextualização fitoquímica e funcional dos extrativos em diferentes órgãos vegetais. Foram excluídos trabalhos duplicados, publicações sem acesso ao texto completo e documentos que apenas mencionavam a espécie sem relação direta com o foco analítico da pesquisa.

Após a seleção, as informações foram organizadas em categorias temáticas, incluindo: órgão vegetal ou matriz analisada, tipo de extrato, classes de

metabólitos relatadas, atividade biológica descrita e potencial de aplicação no contexto da bioeconomia amazônica. A análise dos dados foi conduzida de forma qualitativa e interpretativa, buscando identificar convergências, lacunas de conhecimento e perspectivas de aproveitamento sustentável da espécie, com destaque para a valorização de resíduos florestais e o uso integral da biomassa vegetal.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

O levantamento bibliográfico evidenciou que a produção científica sobre *Z. racemosa* ainda é reduzida, especialmente no que se refere à caracterização de extrativos e ao aproveitamento de resíduos vegetais. Apesar disso, os estudos localizados indicam que a espécie apresenta potencial relevante para investigações voltadas à valorização de resíduos madeireiros e à prospecção de compostos de interesse químico e biotecnológico.

A principal evidência sobre o potencial de extrativos em *Z. racemosa* deriva do estudo de Souza *et al.* (2022), realizado com resíduos de madeira da espécie. Nesse trabalho, o fracionamento cromatográfico do extrato hexânico permitiu o isolamento dos esteroides spinastenona e spinasterol, enquanto o extrato metanólico forneceu novamente spinastenona, além de nonanoato-colest-7,22-dien-3 $\beta$ -ol e dos triterpenos ácido oleanólico e 3 $\beta$ ,21 $\beta$ -diidroxiolean-12-en-28-oico. Esses achados demonstram que os resíduos madeireiros da espécie constituem uma matriz química relevante, uma vez que concentram metabólitos secundários com potencial funcional e aplicação futura em estudos fitoquímicos e biotecnológicos. Os autores ainda sugerem que esses esteroides e triterpenos possam estar associados a mecanismos de defesa da planta, o que amplia a relevância ecológica dos extrativos identificados (Souza *et al.*, 2022).

Além da composição química, os resíduos da madeira de *Z. racemosa* também apresentam interesse do ponto de vista tecnológico. Souza *et al.* (2022) registraram densidade básica de 0,81 g/cm<sup>3</sup> e fator anisotrópico de 1,90, parâmetros interpretados pelos autores como indicativos de boa qualidade tecnológica da madeira. Esse conjunto de resultados é particularmente

importante porque sugere uma dupla possibilidade de valorização da espécie: de um lado, pelo aproveitamento químico dos extrativos presentes nos resíduos; de outro, pelo potencial tecnológico do material lenhoso. Assim, a espécie se destaca não apenas como fonte de metabólitos secundários, mas também como recurso florestal com possibilidade de inserção em cadeias de uso mais diversificadas e de maior valor agregado.

As principais evidências específicas sobre o potencial de extrativos em *Z. racemosa* estão sintetizadas na Tabela 2, que reúne as matrizes vegetais já investigadas, os tipos de extrato descritos, os compostos ou classes químicas relatados e a interpretação desses achados no contexto do aproveitamento bioeconômico da espécie.

Tabela 2 – Principais evidências sobre o potencial de extrativos em *Zygia racemosa*

<b>Matriz/parte vegetal</b>	<b>Tipo de extrato ou registro</b>	<b>Compostos/classes relatados</b>	<b>Interpretação para o potencial de extrativos</b>
Casca do tronco	Registro anterior citado por Souza et al. (2022)	Triterpeno saponínicos	Indica que a espécie já apresentava histórico de metabólitos de interesse antes do estudo com resíduos da madeira
Resíduos de madeira	Extrato hexânico	Spinastenona e spinasterol	Mostra presença de esteroides em resíduos lenhosos com potencial de aproveitamento
Resíduos de madeira	Extrato metanólico	Spinastenona, nonanoato-olest-7,22-dien-3 $\beta$ -ol, ácido oleanólico e 3 $\beta$ ,21 $\beta$ -diidroxiolean-12-en-28-oico	Evidencia que resíduos madeireiros concentram esteroides e triterpenos com interesse químico e bioativo
Madeira	Extrato metanólico	Atividade antifúngica contra dermatófitos, leveduras e fungos lignívoros	Reforça a funcionalidade biológica dos extrativos e o potencial para novos estudos com bioativos

**Fonte:** elaborado pelas autoras com base em Souza et al. (2022) e Basset, Eparvier e Espindola (2015).

A relevância desses extrativos também pode ser observada sob o ponto de vista biológico. Em triagem antifúngica com extratos de árvores amazônicas, Basset, Eparvier e Espindola (2015) verificaram que o extrato meta-

nólico da madeira de *Z. racemosa* apresentou atividade contra dermatófitos, leveduras e fungos lignívoros. Para *Microsporium gypseum* (E. Bodin) Guiart & Grigoraki, *Microsporium canis* E. Bodin ex Guég. e *Trichophyton mentagrophytes* (C.P. Robin) Sabour., os valores de concentração inibitória mínima (CIM) foram 64, >256 e 64 µg/mL, respectivamente. Para *Candida parapsilosis* (Ashford) Langeron & Talice, *Candida glabrata* (H.W. Anderson) S.A. Mey. & Yarrow, *Candida krusei* (Castell.) Berkhout e *Cryptococcus neoformans* (San Felice) Vuill., os valores foram >256, 64, 64 e 64 µg/mL. Já para os fungos apodrecedores *Pycnoporus sanguineus* (L.) Murrill e *Trametes versicolor* (L.) Lloyd, os resultados foram 64 e 32 µg/mL. Embora esses dados não permitam associar diretamente a atividade observada a um composto isolado específico, eles indicam que a fração metanólica da madeira apresenta ação antifúngica mensurável, o que justifica estudos futuros de fracionamento, rendimento e bioatividade direcionada (Basset; Eparvier; Espindola, 2015).

Sob a perspectiva da bioeconomia amazônica, esses resultados são especialmente relevantes, pois reforçam que a bioeconomia regional pode ir além da simples comercialização de produtos florestais e avançar para a valorização da biodiversidade, do uso sustentável da biomassa e da obtenção de compostos de maior valor agregado a partir de recursos madeireiros e não madeireiros (Bergamo *et al.*, 2022). Nessa lógica, resíduos madeireiros podem deixar de ser apenas subprodutos de baixo valor para assumir papel estratégico em rotas de aproveitamento químico, biotecnológico e circular, uma vez que abordagens em cascata priorizam a extração de componentes de maior valor antes de usos energéticos finais (Agnihotri *et al.*, 2025).

No caso de *Z. racemosa*, a identificação de esteroides e triterpenos no extrato metanólico dos resíduos de madeira, associada ao registro de atividade antifúngica para o extrato metanólico de madeira da espécie, sugere potencial para o aproveitamento químico e biotecnológico desses resíduos, ampliando a perspectiva de uso integral da biomassa e de agregação de valor a um recurso florestal ainda pouco explorado (Basset *et al.*, 2015).

Assim, o potencial de extrativos em *Z. racemosa* pode ser compreendido em duas escalas complementares. Em escala específica, a espécie já apresenta evidências concretas de que resíduos madeireiros concentram esteroides e triterpenos e de que seus extratos metanólicos exibem atividade antifúngica. Em escala taxonômica mais ampla, sua inserção em Fabaceae reforça a plausibilidade desses achados, uma vez que a família reúne espécies ricas em fenólicos, flavonoides, taninos, saponinas e terpenoides, frequentemente associados a proteção química e potencial farmacológico. Nesse sentido, *Z. racemosa* desponta como espécie promissora para pesquisas futuras sobre rendimento de extração, sazonalidade dos extrativos, isolamento de compostos, testes biológicos e valorização de resíduos florestais no contexto da bioeconomia amazônica.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A análise da literatura permitiu verificar que *Z. racemosa* apresenta potencial relevante para estudos voltados à obtenção de extrativos e ao aproveitamento de resíduos madeireiros no contexto da bioeconomia amazônica. Embora a produção científica sobre a espécie ainda seja limitada, os trabalhos disponíveis evidenciam a ocorrência de metabólitos secundários, especialmente esteroides e triterpenos, em extratos da madeira, além de atividade antifúngica associada ao extrato metanólico.

Os dados disponíveis também sugerem a ocorrência de compostos de interesse em diferentes partes da planta, como casca, ramos, sementes e outros órgãos vegetais, o que amplia a compreensão do potencial químico da espécie para além da madeira. Essa perspectiva reforça a relevância de abordagens que considerem o aproveitamento integral da biomassa e a valorização de produtos, subprodutos e resíduos florestais.

Nesse contexto, os resíduos madeireiros de *Z. racemosa* podem ser compreendidos como uma matriz com potencial químico e biotecnológico, capaz de contribuir para a agregação de valor à biomassa florestal. Contudo, a escassez de estudos específicos ainda limita generalizações mais amplas sobre o comportamento químico e biológico da espécie. Assim, *Z. racemosa* desponta

como promissora para investigações futuras sobre rendimento de extração, caracterização química, bioatividade e possibilidades de aplicação de extrativos obtidos de diferentes matrizes vegetais, ampliando sua relevância para iniciativas alinhadas à bioeconomia amazônica.

## **6 REFERÊNCIAS**

ALMADA-VILHENA, A.; SANTOS, O.; MACHADO, M.; NAGAMACHI, C.; PIECZARKA, J. Prospecção de biocompostos farmacologicamente ativos da floresta amazônica: abordagens *in vitro*, mecanismos de ação baseados na estrutura química e perspectivas de uso terapêutico em humanos. **Pharmaceuticals**, v. 17, 2024. DOI: 10.3390/ph17111449.

AGNIHOTRI, S; HEGGSET, E. B.; LIMA, J. A.; HORVÁTH, I. S.; TANASE-OPEDAL, M. Cascade processing of agricultural, forest, and marine waste biomass for sustainable production of food, feed, biopolymers, and bioenergy. **Energies**, v. 18, n. 15, art. 4093, 2025. DOI: 10.3390/en18154093.

BASSET, C.; EPARVIER, V.; ESPINDOLA, L. S. The search for antifungals from Amazonian trees: a bio-inspired screening. **Natural Product Communications**, v. 10, n. 4, p. 605-608, 2015. DOI: 10.1177/1934578X1501000417.

BERGAMO, D.; ZERBINI, O.; PINHO, Patricia; MOUTINHO, P. *The Amazon bioeconomy: beyond the use of forest products*. **Ecological Economics**, v. 199, art. 107448, 2022. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2022.107448.

BRILHANTE, A. R. R. d. A. S.; SOUSA, G. R. de; AQUINO-VITAL, A. K. S. de; LIMA, N. T. R. de; SOUZA, R. B. d. L.; SOUZA, T. A. de; SCOTTI, M. T.; BARBOSA FILHO, J. M.; TAVARES, J. F.; SILVA, M. S. Fabaceae flavonoids beyond the commonplace: a review of chemical diversity, pharmacological activities, mass spectrometric profiling and in silico insights into their subclasses. **Plants**, v. 14, n. 23, art. 3549, 2025. DOI: 10.3390/plants14233549. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants14233549>

COSTA, F. A.; NOBRE, C.; GENIN, C.; FRASSON, C. M. R.; FERNANDES, D. A.; SILVA, H.; VICENTE, I.; SANTOS, I. T.; FELTRAN-BARBIERI, R.; VENTURA NETO, R.; FOLHES, R. **Uma bioeconomia inovadora para a Amazônia: conceitos, limites e tendências para uma definição apropriada ao bioma floresta tropical**. São Paulo: WRI Brasil, 2022.

DOMINGUES, J. A.; CONSOLIN FILHO, N.; SOUZA, L. A. G. de; MEDEIROS, F. V. da S. Coagulation activity of the seed extract from *Zygia cauliflora* (Willd.) Killip applied in water treatment. **Revista Ambiente & Água**, v. 15, n. 6, e2611, 2020. DOI: 10.4136/ambi-agua.2611.

GUTIÉRREZ-DURÁN, P. R.; HORTA-VEGA, J. V.; OLAZARÁN-SANTIBÁÑEZ, F. E.; FLORES-GRACIA, J.; BARRIOS-GARCÍA, H. B. Phytochemical diversity and antimicrobial potential of Fabaceae species occurring in Tamaulipas, Mexico: a systematic review. **Plants**, v. 15, n. 2, p. 278, 2026. DOI: 10.3390/plants15020278.

KRAINOVIC, P.; ROMANELLI, J.; RESENDE, A. de; SIMÕES, L.; BOENI, A.; SOUZA, L.; TOLEDO, C.; SOUZA, V.; GUILLEMOT, J.; BROUWER, R.; BONGERS, F.; MOLIN, P.; CHAVES, R.; MASSI, K.; RODRIGUES, R.; DE-MIGUEL, S.; BRANCALION, P. Oportunidades bioeconômicas em florestas tropicais restauradas. **Ambio**, v. 55, p. 344-359, 2025. DOI: 10.1007/s13280-025-02234-5.

NASCIMENTO, C. S. do; JESUS, M. A. de; BARBOSA, A.; SANTOS, J. dos. Evaluation of the antifungal potential of Fabaceae bark extracts against wood decay fungi. **Kurú**, v. 22, n. 51, p. 11-21, 2025. DOI: 10.18845/rfmk.v22i51.8058.

PANG, Z.; CHEN, J.; WANG, T.; GAO, C.; LI, Z.; GUO, L.; XU, J.; CHENG, Y. Linking plant secondary metabolites and plant microbiomes: a review. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, art. 621276, 2021. DOI: 10.3389/fpls.2021.621276.

SALDARRIAGA, S.; RODRIGUEZ-SALAZAR, C.; RECALDE-REYES, D.; BELTRÁN, G.; ÁLVAREZ, L.; ORTÍZ, Y. Composição fenólica, atividades antioxidantes e antiproliferativas contra células cancerosas colorretais humanas de frutas amazônicas copoazú (*Theobroma grandiflorum*) e buriti (*Mauritia flexuosa*). **Molecules**, v. 30, 2025. DOI: 10.3390/molecules30061250.

SOUZA, P. B. A. de; NASCIMENTO, C. C. do; FREITAS, J. A. de; LIMA, M. da P. Wood residues from *Zygia racemosa* (Ducke) Barneby & J. W. Grimes: secondary metabolites, physical properties and anatomical aspects of the wood. **International Journal for Innovation Education and Research**, v. 10, n. 4, p. 257-267, 2022. DOI: 10.31686/IJIER.VOL10.ISS4.3721.

TORRES-RODRIGUEZ, A.; DARVISHZADEH, R.; SKIDMORE, A. K.; FRÄNZEL-LUITEN, E.; KNAKEN, B.; SCHUUR, B. High-throughput Soxhlet extraction method applied for analysis of leaf lignocellulose and non-structural substances. **MethodsX**, v. 12, art. 102644, 2024. DOI: 10.1016/j.mex.2024.102644.

VALETTE, Nicolas; PERROT, Thomas; SORMANI, Rodnay; GELHAYE, Eric; MOREL-ROUHIER, Mélanie. *Antifungal activities of wood extractives*. **Fungal Biology Reviews**, v. 31, n. 3, p. 113-123, jun. 2017. DOI: 10.1016/j.fbr.2017.01.002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2017.01.002>.

## CAPÍTULO 7

# SISTEMA INTELIGENTE EMBARCADO PARA MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM REGIÕES REMOTAS DA AMAZÔNIA

Alfredo Paulo Oliveira Barros  
Felipe de Vasconcelos Assunção  
Reyner Carlos Silva Alegria  
Alex Martins Ramos  
Carlos Alberto Oliveira de Freitas  
Doi: 10.48209/978-65-5417-702-7

**Resumo:** O monitoramento da qualidade da água em regiões remotas da Amazônia ainda enfrenta limitações de acesso, conectividade e custo operacional. Nesse contexto, este trabalho apresenta um sistema inteligente embarcado para apoio ao monitoramento offline da qualidade da água no Lago do Serpa, em Itacoatiara, Amazonas. A proposta utiliza medições georreferenciadas de campo e um modelo de inteligência artificial otimizado para execução local, com previsão dos parâmetros pH, oxigênio dissolvido e turbidez. O sistema foi validado em diferentes plataformas de borda, incluindo ESP32, Raspberry Pi e dispositivos Android, sem dependência de nuvem. Os resultados indicaram erro absoluto médio de 0,107 para pH, 0,222 para oxigênio dissolvido e 0,971 para turbidez no melhor modelo multimodal, além de inferência com baixa latência em Raspberry Pi e smartphones e operação viável em microcontrolador. Conclui-se que a solução apresenta potencial para aplicação em comunidades ribeirinhas e em ações de vigilância ambiental, contribuindo para a saúde pública e para a preservação de ecossistemas amazônicos.

**Palavras-Chaves:** qualidade da água; Amazônia; inteligência artificial embarcada; monitoramento ambiental; inteligência artificial de borda.

## 1 INTRODUÇÃO

Na Amazônia, a relação entre populações locais e os ambientes aquáticos é direta e essencial. Lagos, rios e igarapés sustentam deslocamentos, abastecimento, pesca e diversas atividades produtivas, especialmente em territórios ribeirinhos. Nesse contexto, alterações na qualidade da água podem

gerar impactos ambientais e sociais significativos, afetando tanto o equilíbrio ecológico quanto as condições de vida das comunidades que dependem desses recursos. Apesar dessa relevância, o monitoramento sistemático da qualidade da água ainda enfrenta desafios práticos. Em muitas regiões amazônicas, as campanhas de coleta são espaçadas, o acesso aos pontos de medição exige longos deslocamentos e a conectividade digital é limitada ou inexistente. Nesse cenário, soluções baseadas exclusivamente na transmissão contínua de dados para serviços remotos tornam-se pouco viáveis do ponto de vista operacional e financeiro. Embora a literatura aponte o potencial de sistemas baseados em Internet das Coisas e inteligência artificial para ampliar a capacidade de monitoramento, sua eficácia depende da adaptação às condições reais de uso em campo (ZULKIFLI et al., 2022; RAHU et al., 2023; LOWE; QIN; MAO, 2022). Nesse sentido, abordagens capazes de processar dados localmente ganham destaque. A inteligência artificial de borda surge como alternativa promissora ao permitir inferência diretamente no dispositivo, reduzindo a dependência de internet e aumentando a autonomia dos sistemas (ARAL, 2024).

Neste trabalho, apresenta-se uma proposta aplicada ao Lago do Serpa, em Itacoatiara, Amazonas, com foco no monitoramento offline de pH, oxigênio dissolvido e turbidez. A abordagem prioriza a demonstração de um sistema embarcado funcional, capaz de operar em plataformas acessíveis e em um cenário territorial concreto, em vez de enfatizar exclusivamente o desempenho interno dos modelos computacionais.

A relevância da proposta está em aproximar soluções tecnológicas das necessidades reais do contexto amazônico. Ao tratar a qualidade da água como um problema de vigilância ambiental e apoio à tomada de decisão, o estudo contribui para a prevenção de riscos e para o fortalecimento de ações em regiões remotas. Este trabalho deriva de uma investigação anterior voltada à modelagem e avaliação técnica de inteligência artificial embarcada, sendo aqui reorientado para enfatizar sua aplicação prática e relevância socioambiental.

Como contribuição, este estudo apresenta o desenvolvimento e a validação de um sistema inteligente embarcado para monitoramento da qua-

lidade da água, demonstrando sua aplicabilidade em um cenário real da Amazônia e seu potencial como solução de baixo custo para regiões com baixa conectividade.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

O monitoramento da qualidade da água normalmente considera variáveis como pH, oxigênio dissolvido e turbidez, pois esses indicadores permitem identificar alterações ambientais relevantes e condições que podem afetar tanto a vida aquática quanto o uso humano da água. No contexto brasileiro, esses parâmetros também são amplamente empregados como referência em processos de avaliação e gestão de recursos hídricos (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2005).

Nos últimos anos, a aplicação de inteligência artificial ao monitoramento ambiental tem crescido de forma significativa. Modelos computacionais têm sido utilizados para predição de variáveis de qualidade da água, especialmente em cenários onde há relações não lineares entre atributos ambientais (AHMED et al., 2019; AL-ADHAILEH; ALSAADE, 2021; YAN et al., 2024). Redes neurais artificiais demonstraram esse potencial em diferentes contextos (PALANI; LIONG; TKALICH, 2008), enquanto modelos recorrentes baseados em LSTM ampliaram a capacidade de capturar padrões temporais mais complexos (LIU et al., 2019). Apesar desses avanços, grande parte desses estudos permanece centrada em desempenho preditivo, com menor ênfase em aspectos operacionais e de implantação em cenários reais.

Em paralelo, soluções baseadas em Internet das Coisas e sistemas de monitoramento em tempo real têm sido exploradas como forma de ampliar a coleta e análise de dados ambientais (ZULKIFLI et al., 2022; ROSERO-MONTALVO et al., 2020). Esses sistemas permitem maior capacidade de observação e suporte à tomada de decisão, mas frequentemente dependem de infraestrutura de comunicação estável e de servidores remotos, o que limita sua aplicação em regiões com restrições logísticas e de conectividade. Nesse contexto, a inteligência artificial de borda surge como alternativa promissora, ao permitir o pro-

cessamento diretamente no dispositivo e reduzir a dependência de transmissão de dados (ARAL, 2024). Ainda assim, observa-se que poucos trabalhos exploram de forma integrada a execução offline, a adaptação a hardware de baixo custo e a validação em cenários territoriais específicos.

Outro aspecto relevante é que, em aplicações ambientais reais, a utilidade de um sistema não depende apenas de sua acurácia, mas de sua capacidade de operar de forma confiável em condições de uso. Em regiões remotas, como grande parte da Amazônia, o monitoramento da qualidade da água exige soluções que considerem simplicidade de implantação, baixo custo, autonomia operacional e compatibilidade com limitações de infraestrutura. Nesse cenário, abordagens embarcadas ganham relevância por possibilitarem inferência local e uso direto em campo, sem dependência de conectividade contínua. No caso específico da Amazônia, essa discussão torna-se ainda mais crítica. O Lago do Serpa, por exemplo, insere-se em um contexto territorial no qual a relação entre comunidade, ambiente e uso do espaço possui forte relevância socioambiental (NOGUEIRA; RIBEIRO; RIBEIRO, 2022). Nesse tipo de cenário, o valor de uma solução tecnológica não está necessariamente em superar modelos tradicionais em desempenho absoluto, mas em viabilizar o uso prático da inteligência computacional em condições reais, marcadas por grandes distâncias, baixa conectividade e alta dependência dos recursos hídricos.

Diante desse contexto, identifica-se uma lacuna na literatura relacionada à integração entre desempenho preditivo, execução embarcada e aplicação territorial em regiões amazônicas.

Essas lacunas motivam o desenvolvimento da proposta apresentada neste trabalho, que busca articular inteligência artificial, processamento offline e viabilidade operacional em um cenário real de monitoramento ambiental.

Tabela 1 -Lacunas da literatura e posicionamento do presente trabalho.

Tabela 1: Lacunas da literatura e posicionamento do presente trabalho.

Estudo	Foco principal	Lacuna em relação a este trabalho
Palani et al. (2008)	Previsão de variáveis de qualidade da água com redes neurais artificiais (ANN) em ambiente costeiro	Foco em modelagem preditiva, sem aplicação embarcada em contexto amazônico
Liu et al. (2019)	Predição com redes LSTM em ambiente IoT	Foco em séries temporais com infraestrutura conectada, sem execução offline em dispositivos acessíveis
Rosero-Montalvo et al. (2020)	Rede de sensores sem fio (WSN) com apoio de servidor e infraestrutura externa	Dependência de processamento externo, diferindo da proposta de processamento local
Zulkifli et al. (2022)	Revisão geral sobre monitoramento hídrico com IoT	Discussão ampla do tema, sem validação territorial aplicada na Amazônia
Aral (2024)	Inteligência artificial de borda para monitoramento rural	Fundamentação conceitual, sem validação experimental aplicada

Fonte: elaboração própria com base na literatura.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Área de estudo e dados

O estudo foi desenvolvido a partir de medições realizadas no Lago do Serpa, localizado em Itacoatiara, no estado do Amazonas. O material utilizado foi organizado a partir de pontos georreferenciados de coleta, reunindo informações físico-químicas da água e atributos associados ao ambiente amostrado, disponibilizados no conjunto de dados georreferenciado publicado em Mendeley Data (AO et al., 2026). Neste artigo, o foco recai sobre três indicadores de interesse para o acompanhamento ambiental: pH, oxigênio dissolvido e turbidez.

Os dados passaram por etapas de organização, conferência e padronização para permitir uso consistente no sistema. Em seguida, foram divididos em conjuntos de treino (70%), validação (10%) e teste (20%), mantendo a consistência das distribuições amostrais ao longo das etapas de modelagem e

avaliação. Embora se trate de uma base local, seu valor está no fato de representar um ambiente amazônico real e de permitir a verificação da proposta em condições próximas do uso em campo.

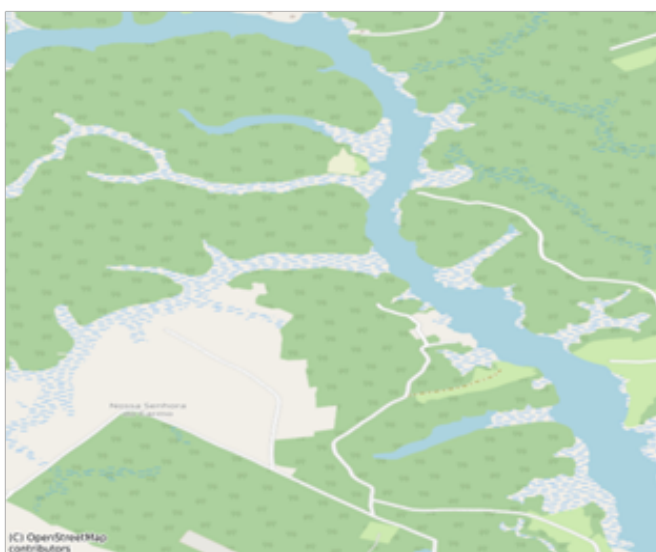
### **3.2 Sistema embarcado proposto**

Figura 1 -Caracterização visual e territorial da área de estudo no Lago do Serpa.

(a) Registro visual da área estudada



(b) Contexto territorial em base cartográfica



Fonte: acervo do estudo de campo e elaboração própria com base em OpenStreetMap.

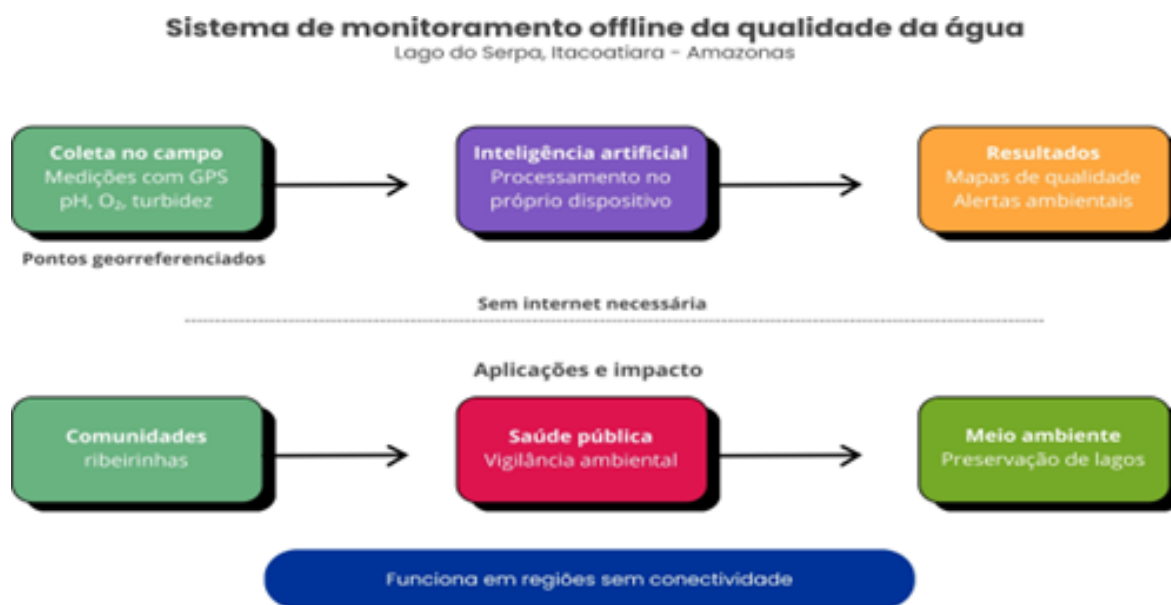
O sistema proposto foi concebido para funcionar sem dependência de conexão permanente com a internet. Sua lógica de operação pode ser resumida em três etapas: recebimento dos dados de entrada, processamento local por um modelo de inteligência artificial e apresentação dos resultados ao usuário. Essa organização permite que o processamento ocorra no próprio dispositivo, o que é especialmente relevante para comunidades ribeirinhas e regiões remotas com baixa conectividade.

Para verificar a viabilidade da proposta, o sistema foi preparado para execução em diferentes plataformas de borda. Foram considerados dispositivos com perfis distintos de uso: smartphones Android, voltados à interação em campo; Raspberry Pi, adequada a estações locais de monitoramento; e ESP32, representando um cenário de hardware compacto e de baixo custo. Essa variedade de plataformas permite observar a solução em condições práticas distintas.

Em um cenário, a prioridade pode ser a visualização local e a facilidade de uso; em outro, pode ser a implantação em dispositivos pequenos e simples. Assim, a metodologia foi estruturada para avaliar a capacidade de adaptação do sistema a diferentes rotinas de monitoramento ambiental, sem concentrar a discussão em detalhes internos do modelo.

Para evitar que o processamento embarcado seja percebido como uma “caixa preta”, é importante explicitar a estrutura adotada. O modelo principal é uma rede neural espiculada multimodal, com codificação temporal por *rate coding*, camada oculta com neurônios do tipo *Leaky Integrate-and-Fire* e saída linear para predição conjunta de pH, oxigênio dissolvido e turbidez. Os hiperparâmetros foram ajustados por busca em grade, considerando número de neurônios, passos temporais, taxa de aprendizado, limiar de disparo, fator de decaimento e intensidade de aumento sintético dos dados. A escolha dessa arquitetura não decorre apenas do erro preditivo, mas sobretudo de sua compatibilidade com inferência local, processamento temporal esparsa e exportação para execução offline em Android, Raspberry Pi e ESP32.

Figura 2 -Arquitetura proposta para o sistema embarcado de monitoramento da qualidade da água.



Fonte: elaboração própria.

A Figura 2 apresenta a arquitetura completa do sistema, destacando o fluxo de dados desde a aquisição e pré-processamento até a inferência local e a geração de informações úteis para uso em campo.

### 3.3 Procedimentos de avaliação

A avaliação foi conduzida em duas frentes complementares. A primeira considerou a capacidade do sistema de estimar os parâmetros de interesse a partir dos dados disponíveis. A segunda observou sua execução em plataformas embarcadas, levando em conta medidas de latência e vazão de inferência. O objetivo não foi apenas verificar se o sistema produz bons resultados numéricos, mas se esses resultados podem ser efetivamente aproveitados em uma rotina de monitoramento ambiental.

Para tornar a interpretação do desempenho mais robusta, a avaliação numérica não foi limitada a um único valor de erro. O estudo de base realizou comparação com modelos de referência amplamente utilizados em aprendizado de máquina, incluindo Random Forest, MLP e LSTM, todos submetidos ao mesmo protocolo de divisão dos dados. Além disso, foi executado um benchmark multissemente com dez sementes independentes, permitindo calcular médias e desvios-padrão das métricas.

Cabe destacar que a validação permanece restrita ao Lago do Serpa. O conjunto de dados empregado é local, com sessenta amostras distribuídas entre treino, validação e teste, e não houve verificação externa em outro lago amazônico. Em termos metodológicos, isso significa que os resultados sustentam a viabilidade da aplicação no cenário estudado, mas ainda não permitem generalização ampla para outros corpos hídricos sem novas campanhas de coleta e revalidação.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos indicam que o sistema é capaz de apoiar o monitoramento ambiental do Lago do Serpa com respostas numéricas consistentes para os parâmetros analisados. No melhor arranjo avaliado, os erros absolutos médios foram de 0,107 para pH, 0,222 para oxigênio dissolvido e 0,971 para turbidez. Em termos práticos, esses valores mostram que a solução pode apoiar leituras de campo com boa estabilidade para pH e oxigênio dissolvido, enquanto a turbidez exige interpretação mais cautelosa, mas ainda é útil para triagem ambiental e definição de novas coletas.

Essa diferença de comportamento tem implicação direta para o uso da ferramenta. Em situações de monitoramento ambiental, resultados mais estáveis para pH e oxigênio dissolvido oferecem suporte importante para acompanhamento das condições da água e para a comunicação com equipes locais. No caso da turbidez, embora a incerteza seja maior, a resposta do sistema permanece útil como indicador de alerta e como apoio à tomada de decisão em regiões remotas.

Tabela 2 -Indicadores de desempenho do sistema para os parâmetros monitorados.

Parâmetro	Erro absoluto médio
pH	0,107
Oxigênio dissolvido	0,222
Turbidez	0,971

Fonte: elaboração própria com base nos experimentos do estudo de base.

Tomado isoladamente, esse resultado pontual não responde se o erro obtido é efetivamente competitivo. Por essa razão, o estudo de base também comparou o modelo proposto com três baselines consolidados: Random Forest, LSTM e MLP. A Tabela 3 mostra que, em erro macro médio, Random Forest e LSTM apresentaram desempenho preditivo superior no mesmo conjunto de dados, enquanto o MLP exibiu pior comportamento e forte instabilidade. Assim, a leitura correta não é a de superioridade universal da rede espiculada, mas a de uma solução que preserva desempenho competitivo ao mesmo tempo em que viabiliza processamento local em hardware restrito.

Tabela 3 -Comparativo multissemente entre o modelo proposto e baselines clássicos.

Modelo	MAE macro	RMSE macro	$R^2$ macro
Random Forest	0,409 ± 0,062	0,557 ± 0,086	0,335 ± 0,131
LSTM	0,428 ± 0,059	0,548 ± 0,073	0,313 ± 0,139
SNN multimodal	0,447 ± 0,064	0,566 ± 0,072	0,291 ± 0,146
MLP	0,781 ± 0,193	0,983 ± 0,178	-5,460 ± 5,220

Fonte: elaboração própria com base no benchmark multissemente do estudo de base.

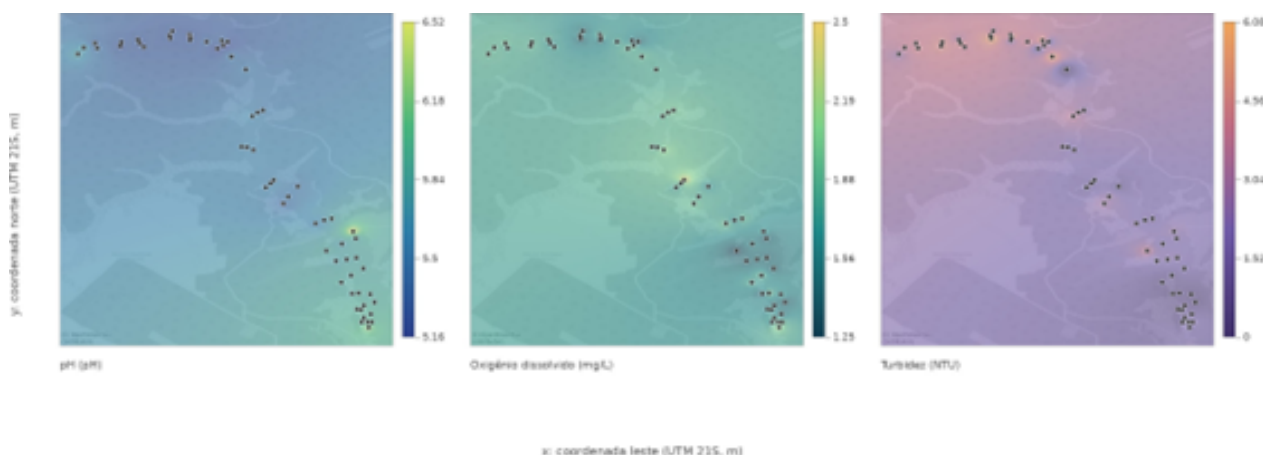
Essa comparação é decisiva para interpretar a escolha do modelo. Do ponto de vista estritamente preditivo, a arquitetura espiculada não superou os melhores baselines nesta base local. Sua justificativa técnica está na combinação entre erro aceitável, inferência offline, compatibilidade com exportação para TFLite e potencial de execução em dispositivos de borda como Android, Raspberry Pi e ESP32. Em cenários remotos, esse compromisso entre desempenho e implantabilidade pode ser mais relevante do que a melhor métrica isolada.

Outro aspecto que merece destaque é a robustez. O benchmark com dez sementes independentes mostrou que o SNN apresentou MAE macro de  $0,447 \pm 0,064$ , RMSE macro de  $0,566 \pm 0,072$  e  $R^2$  macro de  $0,291 \pm 0,146$ . Esses desvios-padrão não eliminam a variabilidade esperada de uma base pequena, mas mostram que o comportamento do modelo não depende de uma única divisão fortuita dos dados. Em contraste, o MLP apresentou dispersão muito maior, o que reforça a importância de discutir estabilidade experimental e não apenas o melhor MAE encontrado.

Do ponto de vista estatístico, também cabe cautela. No teste de sinal pareado entre SNN e Random Forest, não houve evidência de superioridade global do SNN nas métricas macro ao nível de 5% de significância. Esse resultado reforça que a proposta deve ser defendida principalmente por sua viabilidade operacional e territorial, e não por uma suposta liderança absoluta em acurácia dentro desta base.

A interpretação prática dos resultados se torna mais clara quando as estimativas são observadas espacialmente. Em vez de focar apenas na comparação entre valores previstos e observados, esta versão do artigo enfatiza a leitura territorial das condições do lago. Isso torna a discussão mais compatível com aplicações de monitoramento ambiental.

Figura 3 -Painel espacial reconfigurado dos parâmetros monitorados no Lago do Serpa. Nos mapas,  $x$  representa a coordenada leste e  $y$  a coordenada norte no sistema UTM 21S, em metros.



Fonte: elaboração própria com base nas superfícies interpoladas do estudo.

A Figura 3 evidencia que a proposta não se resume à geração de valores numéricos. Ao produzir uma leitura espacialmente organizada, o sistema contribui para o planejamento de novas coletas, para a comunicação dos resultados e para a priorização de trechos com maior interesse ambiental. Esse tipo de leitura pode ser particularmente relevante para comunidades ribeirinhas e equipes de campo com acesso limitado a laboratórios e internet. No que se refere à implantação em hardware, a proposta também se mostrou viável. Na Raspberry Pi 4B, a latência média foi de 0,214 ms por amostra, com vazão de 4670,50 amostras por segundo. Em dispositivos Android, os valores foram mais elevados, com destaque para o Device B, que alcançou 30905,08 amostras por segundo. No ESP32, a taxa de 5,0 amostras por segundo indica uma operação mais simples, mas ainda compatível com monitoramento periódico e autônomo em cenários de baixa conectividade.

Tabela 4 -Viabilidade operacional do sistema em diferentes plataformas de borda.

Plataforma	Vazão (amostras/s)
ESP32	5,0
Raspberry Pi 4B	4670,50
Android A	12337,40
Android B	30905,08
Android C	16121,71

Fonte: elaboração própria a partir dos ensaios de execução do sistema.

Os resultados de execução ajudam, portanto, a distinguir cenários de uso. O ESP32 pode atender a rotinas mais simples e esparsas de monitoramento, o que favorece aplicações periódicas e autônomas. Já Android e Raspberry Pi oferecem condições mais favoráveis quando há necessidade de maior frequência de processamento, visualização local, interação com usuários e apoio mais imediato à tomada de decisão.

Sob a perspectiva de utilidade social, a leitura espacial dos parâmetros já oferece valor concreto. Em vez de limitar a interpretação a tabelas técnicas, o sistema permite uma visão mais imediata de onde a atenção deve ser concentrada. Com isso, o diálogo com gestores, equipes de campo, serviços de vigilância ambiental e comunidades locais tende a se tornar mais direto, ampliando o potencial de uso da proposta para além do ambiente estritamente acadêmico. Outro aspecto relevante é a possibilidade de uso progressivo da solução. Em um primeiro momento, o sistema pode funcionar como instrumento complementar de triagem, auxiliando equipes em coletas exploratórias e em campanhas pontuais. Em uma etapa posterior, com ampliação do conjunto de dados e adaptação a outros ambientes aquáticos, a mesma estrutura pode apoiar rotinas mais frequentes de monitoramento territorial.

Esse potencial de expansão é importante porque mostra que a proposta não está restrita a um experimento isolado. Ao contrário, trata-se de uma base tecnológica que pode ser incrementada em novas campanhas, integrada a outras variáveis ambientais e ajustada a diferentes realidades amazônicas. Mesmo mantendo caráter aplicado e de baixo custo, o sistema apresenta perspectiva de continuidade e replicabilidade. Do ponto de vista aplicado, os achados mostram que o sistema pode ser inserido em rotinas de monitoramento em regiões remotas, nas quais a continuidade do acompanhamento depende de soluções autônomas, simples e de menor custo. O funcionamento offline amplia o potencial de uso em comunidades ribeirinhas, campanhas de vigilância ambiental e ações de apoio à saúde pública. Ao mesmo tempo, essa interpretação ainda não equivale a validação externa: como toda a análise foi conduzida com dados do Lago do Serpa, permanece em aberto o desempenho da solução em outros lagos ou contextos amazônicos. Além disso, o estudo reforça um ponto central: o

diferencial do artigo não está em disputar originalidade apenas pelo desenho técnico do modelo, mas em demonstrar uma aplicação concreta e territorialmente situada. Em contextos marcados por baixa conectividade, longas distâncias e forte dependência dos recursos hídricos, uma solução embarcada e funcional pode gerar impacto prático superior ao de abordagens voltadas exclusivamente à comparação técnica. Em síntese, os resultados sustentam uma interpretação em duas frentes complementares.

A primeira é ambiental, ao mostrar que o sistema consegue estimar variáveis relevantes da qualidade da água. A segunda é operacional, ao indicar que essa capacidade pode ser levada para dispositivos de campo e convertida em apoio concreto ao monitoramento ambiental, à saúde pública e à tomada de decisão na Amazônia.

### **4.1 Implicações para uso em campo**

Quando se considera o uso do sistema fora do ambiente acadêmico, alguns pontos ganham destaque. O primeiro deles é a possibilidade de reduzir a dependência de processamento remoto em cenários onde a internet é limitada. Em muitos territórios amazônicos, a dificuldade não está apenas em coletar a informação, mas em conseguir transformá-la rapidamente em uma leitura útil para a equipe que está no local. Ao operar no próprio dispositivo, a solução encurta esse caminho. O segundo ponto está relacionado ao caráter progressivo do monitoramento. Em vez de substituir procedimentos tradicionais, o sistema pode atuar como ferramenta complementar, ajudando a indicar onde novas coletas devem ser priorizadas e quais trechos do lago merecem atenção mais imediata. Esse tipo de apoio é especialmente relevante quando os recursos humanos e logísticos são limitados.

Também é importante observar que a aplicação em campo envolve diferentes perfis de usuário. Pesquisadores, gestores locais, técnicos ambientais e equipes de apoio podem se beneficiar de uma saída mais objetiva, baseada em mapas, indicadores e previsões acessíveis. Isso amplia a utilidade da proposta, pois a transforma em um recurso de comunicação e triagem, não se tratando, portanto, apenas de uma experiência computacional. Por fim, a experiência com

o Lago do Serpa sugere que abordagens desse tipo podem fortalecer estratégias de monitoramento territorial na Amazônia. Mesmo com limitações de base de dados, a solução demonstrou que é possível integrar medições locais, processamento embarcado e leitura espacial em uma estrutura tecnológica coerente com as condições de regiões remotas, embora a generalização para outros corpos hídricos ainda dependa de validação adicional.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este trabalho apresentou um sistema inteligente embarcado para monitoramento da qualidade da água no contexto amazônico, com aplicação no Lago do Serpa, em Itacoatiara, Amazonas. A proposta mostrou ser capaz de operar de forma offline, prever pH, oxigênio dissolvido e turbidez e executar processamento em diferentes plataformas de borda, incluindo ESP32, Raspberry Pi e smartphones Android. Os resultados permitem concluir que a solução é operacionalmente viável e socialmente relevante para regiões com baixa infraestrutura de comunicação. Seu uso potencial em comunidades ribeirinhas e em ações de acompanhamento ambiental pode contribuir para monitoramento contínuo, apoio à tomada de decisão e fortalecimento de estratégias de preservação e saúde pública.

Também se destaca que a proposta valoriza um caminho de inovação adequado à realidade regional. Em vez de depender de estruturas complexas e de alto custo, o sistema busca entregar inteligência computacional em um formato compatível com o trabalho de campo. Essa escolha torna a solução mais próxima de cenários reais de uso e mais alinhada com demandas de territórios remotos da Amazônia e de regiões marcadas por baixa conectividade.

A contribuição principal deste artigo está justamente nesse deslocamento de foco: do detalhamento da modelagem para a demonstração de aplicabilidade. Ao enfatizar o uso prático, a operação offline e a relevância territorial da proposta, o trabalho se apresenta como uma contribuição voltada à adoção de tecnologia de baixo custo em monitoramento ambiental amazônico. Os resultados comparativos também mostram que a defesa da arquitetura espiculada deve ser feita com precisão: ela não foi a melhor baseline em erro médio nesta

base, mas se mostrou competitiva e, ao mesmo tempo, compatível com execução local em diferentes plataformas de borda. Como limitação, o estudo ainda depende de uma base de dados local e relativamente reduzida, o que indica a necessidade de ampliar campanhas de coleta em diferentes períodos e ambientes. Como continuidade, recomenda-se expandir a validação em outros corpos hídricos amazônicos, incorporar novas variáveis ambientais e aprofundar o uso da solução em cenários reais de monitoramento territorial.

Por fim, entende-se que o principal valor do trabalho está em demonstrar uma ponte entre pesquisa aplicada, tecnologia embarcada e relevância socioambiental. Ao mostrar que o monitoramento da qualidade da água pode ser realizado de forma offline, local e com potencial de uso em regiões isoladas, o estudo oferece uma contribuição concreta para a discussão sobre tecnologias sustentáveis voltadas à Amazônia.

## **6 REFERÊNCIAS**

AHMED, A. N. et al. Machine learning methods for better water quality prediction. *Journal of Hydrology*, Amsterdã, v. 578, p. 124084, nov. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124084>>.

AL-ADHAILEH, M. H.; ALSAADE, F. W. Modelling and prediction of water quality by using artificial intelligence. *Sustainability*, Basileia, v. 13, n. 8, p. 4259, abr. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su13084259>>.

AO, F. V. A. et al. *Georeferenced Multimodal Water Quality Dataset from Lago do Serpa (Amazon, Brazil)*. Mendeley Data, 2026. Disponível em: <<https://doi.org/10.17632/twf4xmky5.1>>.

ARAL, A. The promise of neuromorphic edge ai for rural environmental monitoring. *Environmental Data Science*, v. 3, p. e34, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/eds.2024.36>>.

Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução CONAMA nº 357/2005: Classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o enquadramento, bem como condições e padrões de lançamento de efluentes*. Brasília, DF, 2005.

LIU, P. et al. Analysis and prediction of water quality using lstm deep neural networks in iot environment. *Sustainability*, Basileia, v. 11, n. 7, p. 2058, abr. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su11072058>>.

LOWE, M.; QIN, R.; MAO, X. A review on machine learning, artificial intelligence, and smart technology in water treatment and monitoring. *Water*, Basileia, v. 14, n. 9, p. 1384, abr. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w14091384>>.

NOGUEIRA, E. C. L.; RIBEIRO, J. C.; RIBEIRO, J. W. S. A educação quilombola e a luta em prol do meio ambiente na comunidade sagrado coração de Jesus lago de serpa itacoatiara-amazonas. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 8, n. 9, p. 63939–63953, set. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.34117/bjdv8n9-235>>.

PALANI, S.; LIONG, S.-Y.; TKALICH, P. An ann application for water quality forecasting. *Marine Pollution Bulletin*, Oxford, v. 56, n. 9, p. 1586–1597, set. 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.05.021>>.

RAHU, M. A. et al. Toward design of internet of things and machine learning-enabled frameworks for analysis and prediction of water quality. *IEEE Access*, Nova York, v. 11, p. 1–15, set. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3315649>>.

ROSETO-MONTALVO, P. D. et al. Intelligent wsn system for water quality analysis using machine learning algorithms: A case study (tahuando river from ecuador). *Remote Sensing*, v. 12, n. 12, p. 1988, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/12/12/1988>>.

YAN, X. et al. A comprehensive review of machine learning for water quality prediction over the past five years. *Journal of Marine Science and Engineering*, Basileia, v. 12, n. 1, p. 159, jan. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/jmse12010159>>.

ZULKIFLI, C. Z. et al. Iot-based water monitoring systems: A systematic review. *Water*, Basileia, v. 14, n. 21, p. 3621, nov. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w14213621>>.

## CAPÍTULO 8

# USO DE ELETRODOS COMBINADOS NA DEGRADAÇÃO DO IMIDACLOPRID POR FOTOCATÁLISE

Fabiana Maria Monteiro Paschoal  
Jamilly Pereira Marques  
Juliana Silva Asevedo Maia  
Evelyn Perlayne Serrão da Silva  
Rodrigo Biscaro Nogueira  
Wanderson Gonçalves Trindade  
Doi: 10.48209/978-65-5417-702-8

**Resumo:** Uma das preocupações atuais é o aumento da presença de contaminantes em águas superficiais e subterrâneas. Nesse contexto, a atividade agrícola tem participado ativamente através do uso de inseticidas para combater pragas causando a contaminação de reservas de água e lençóis freáticos que se localizam abaixo do solo. Por sua vez o imidacloprid, um ingrediente ativo pertencente ao grupo dos neonicotinoides, é um dos principais inseticidas utilizados no meio agrícola. Nesse sentido, é crucial implementar tratamentos de efluentes mais eficazes para remover contaminantes, garantindo a preservação da qualidade de vida e dos recursos hídricos, alguns avanços tecnológicos têm mostrado viabilidade, sendo os Processos Oxidativos Avançados (POAs) uma das alternativas mais destacadas. Desse modo, a metodologia adotada neste trabalho é a Fotocatálise Heterogênea que baseia-se na ativação de um semicondutor meio de uma fonte de luz. Neste contexto, o trabalho teve como objetivo investigar o tratamento fotocatalítico de água contaminada com o inseticida imidacloprid através da aplicação dos POAs. Sendo assim, os ensaios de fotocatálise heterogênea utilizando os eletrodos de Ti/TiO<sub>2</sub> nanoporoso; Ti/TiO<sub>2</sub> nanotubular, Ti/TiO<sub>2</sub>-CuO e Ti/Cu<sub>2</sub>O foram utilizados para o tratamento da água contaminada com pesticida imidacloprid. Observou-se que, o tratamento fotocatalítico da água contaminada com imidacloprid, com o uso de eletrodo de Ti/Cu<sub>2</sub>O e Ti/TiO<sub>2</sub> nanotubular, demonstraram respectivamente uma remoção de 90% e 96% do inseticida Imidacloprid, e cinética de degradação correspondente a 0,0301 min<sup>-1</sup> e 0,015 min<sup>-1</sup>. Dessa forma, foi possível avaliar a eficiência na ação de ambos os eletrodos para descontaminação de água destinada ao consumo humano.

**Palavras-Chaves:** Ti/TiO<sub>2</sub> nanoporoso e nanotubular, Ti/TiO<sub>2</sub>-Cu<sub>2</sub>O, Ti/TiO<sub>2</sub>-CuO, Ti/Cu<sub>2</sub>O; fotocatálise, tratamento de água.

## **1 INTRODUÇÃO**

O modelo predominante de agricultura no Brasil fundamenta-se na utilização intensiva de agrotóxicos para o manejo de pragas e doenças em plantações. Neste momento, o país ocupa a posição de maior consumidor global de pesticidas (Nunes et al, 2016). Embora os pesticidas desempenhem um papel crucial no crescimento agrícola, problemas significativos de contaminação ambiental podem surgir, devido a condições inadequadas de armazenamento e transporte desses compostos, uso indiscriminado e a ausência de orientação adequada aos manipuladores (Regitano et al., 2000; Graymore et al., 2001; Dores e Freire, 2001).

Com os avanços tecnológicos, houve a introdução dos agrotóxicos à base de compostos orgânicos, produtos que apresentam maior solubilidade em água, menor capacidade de adesão e maior volatilidade (Veiga,2006). Essas inovações, baseadas na manipulação de compostos químicos, resultaram na criação de agrotóxicos cada vez mais potentes, e eficazes no combate às pragas, contudo, essas mudanças também intensificaram e prolongaram o potencial prejudicial desses produtos.

O inseticida imidacloprid, da classe dos neonicotinóides, é um pesticida relativamente novo baseado em compostos orgânicos, produzido sinteticamente a partir da molécula de nicotina (Amaral,2017). É extensamente utilizado no Brasil para o controle de pragas em várias culturas, e demonstra elevada mobilidade no solo, aspecto desfavorável no quesito ambiental para regiões de topografia plana, solos arenosos e lençol freático raso, além de ser altamente resistente à degradação, podendo persistir no ambiente por períodos prolongados (Urzedo,2008).

Dessa forma, é evidente a necessidade de metodologias eficientes para o tratamento hídrico de efluentes e esgoto, com a capacidade de degradar esses compostos da água. O método mais comumente utilizado para o tratamento desses resíduos, em virtude de sua eficácia e baixo custo, é a cloração, que consiste na adição de cloro livre (Cl<sub>2</sub>) à água ou de compostos que o liberem (Condie,1990). Essas tecnologias substituem o uso do cloro por

agentes oxidantes e desinfetantes que não deixam resíduos na água (Araújo et al, 2016), tais como os processos oxidativos avançados que são métodos de desinfecção, nos quais não se adicionam produtos químicos, uma vez que sua capacidade desinfetante é resultante da geração de radicais livres hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ), altamente oxidantes e reativos (Soares, 2013), gerados por meio de reações fotocatalíticas, esses radicais possuem a habilidade de decompor contaminantes orgânicos, transformando-os em substâncias não prejudiciais, como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) (Andreozzi, 1999).

Os processos fotocatalíticos empregam a faixa de luz no espectro ultravioleta, como a luz solar, sobre uma superfície de semicondutores (Soares, 2013). Quando  $\text{TiO}_2$  é irradiado com luz de comprimento de onda menor do que 380 nm, os pares elétron/lacuna ( $e^-/h^+$ ) são gerados pela excitação dos elétrons, a partir do seu repouso, da banda de valência para a banda de condução, de acordo com a equação 1 (FUJISHIMA & HONDA, 1972 e SENE et al., 2003):



A fotoeletrocatalise tem sido aplicada com sucesso para a oxidação e degradação de compostos orgânicos. Pesquisas têm sido realizadas utilizando-se a irradiação do semiconductor de  $\text{Ti}/\text{TiO}_2$  sob potencial positivo o que o leva a funcionar como um fotoânodo. Os semicondutores de interesse utilizados em fotoeletrocatalise são sólidos (geralmente óxidos de calcogêneos) com energia do bandgap menor do que 3 eV, tais como  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CdS}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que podem agir como semicondutores capazes de mediar processos de oxidação e redução, quando excitados pela luz (CANDAL et al., 1998, BISCHOFF & ANDERSON, 1995; HEPEL & LUO, 200 e TRISTÃO et al., 2006).

Dentre os semicondutores do tipo-n, o  $\text{TiO}_2$  é o mais amplamente utilizado em estudos para a aplicação na purificação de águas, devido a suas boas características, tais como: estabilidade fotoquímica, relativa insolubilidade, absorção de radiação UV em comprimentos de onda de até 350 nm; potencial redox da banda de valência adequado para catalisar diversas reações; resistência à corrosão em ampla faixa de pH e baixo custo (ZANONI et al., 2003; RODRIGUES et al., 2008 e HU & YUAN, 2005).

## 2 METODOLOGIA

Os eletrodos de Ti/TiO<sub>2</sub> nanotubular e os eletrodos de filmes finos de Ti/TiO<sub>2</sub> nanoporos foram preparados seguindo metodologia descrita por Paschoal, 2008.

O filme de TiO<sub>2</sub>-CuO foi preparado seguindo a seguinte metodologia: Inicialmente foi formado o filme de TiO<sub>2</sub> nanotubular na superfície de uma placa de titânio. Após o preparo dos nanotubos de titânio foi feito o depósito catódicamente do Cu<sub>2</sub>O em um banho de solução de sulfato cúprico 0,4 mol L<sup>-1</sup> e 3,0 mol L<sup>-1</sup> de lactato de sódio utilizando o eletrodo nanotubular de TiO<sub>2</sub> como substrato. O pH da solução foi ajustado para 9,0 utilizando NaOH 4,0 mol.L<sup>-1</sup>. O crescimento do filme ocorreu a -0,4 V (vs Ag/AgCl, KCl saturado) ao longo de 30 minutos. O processo de deposição foi conduzido em uma célula de um compartimento, utilizando um sistema de três eletrodos. Esse sistema consistiu em uma rede de platina como contra- eletrodo, um eletrodo de Ag/AgCl, KCl saturado como eletrodo de referência, e o eletrodo nanotubular de TiO<sub>2</sub> como eletrodo de trabalho, onde o filme foi depositado. A temperatura do banho foi mantida constante a 60°C durante todo o procedimento.

Os eletrodos de CuO foram preparados a partir da síntese de nanopartículas de CuO pelo método hidrotermal de micro-ondas foi realizada em um reator de hidrotermalização por micro-ondas. Inicialmente, foi preparada uma solução com sulfato de cobre II (CuSO<sub>4</sub>) em 100 mL de água Milli-Q, 100 mg de polietileno glicol (PEG 400) e 5 mL de hidróxido de amônio (NH<sub>4</sub>OH), adicionados nessa ordem e com agitação contínua. Para iniciar a reação de formação de CuO, a síntese foi realizada com micro-ondas na frequência de 2,450 MHz e potência de 700 W. A temperatura foi controlada por uma plataforma com microcontrolador Arduino conectado a um termopar colocado diretamente no meio reacional. O preparo do eletrodo Ti/TiO<sub>2</sub>-CuO foi realizado utilizando a placa de titânio na qual as nanopartículas de CuO foram adicionadas ao sol-gel e depositadas por dip-coating. Após a imersão as placas foram calcinadas sob temperatura de 450 °C por um período de 3h, com rampa de aquecimento de 2 °C/min.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

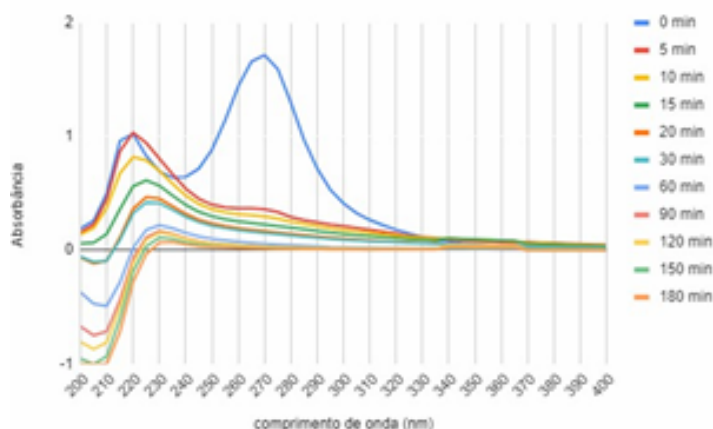
A fotólise e a oxidação fotocatalítica da solução de Imidacloprid na concentração de  $1,25 \text{ mol.L}^{-1}$  foi investigada, em ambos os casos, alíquotas da solução foram removidas do reator e avaliadas por espectroscopia no ultravioleta visível em intervalos de tempo controlado.

A Figura 1 exibe os espectros de absorbância, na região de 200 a 800 nm, correspondente a solução fotolisada no Imidacloprid. A fotólise consiste na aplicação da luz no reator e sem a presença do eletrodo, ou seja, do semicondutor (catalisador).

A aplicação experimental iniciou com o teste de fotólise, conduzido com luz UV sem o eletrodo, estabelecendo uma referência comparativa para a fotocatalise. Na sequência, foi realizado o experimento fotocatalítico utilizando o eletrodo  $\text{Ti/Cu}_2\text{O}$  e por fim, procedeu-se com a fotocatalise utilizando o eletrodo de  $\text{Ti/TiO}_2$  nanotubular.

Na figura 1, pode-se observar o gráfico de varredura da fotólise, no qual vê-se a redução da absorbância no comprimento de onda de 270 nm correspondente ao imidacloprid, iniciando no tempo de 0 minutos, ou seja, antes do início do experimento, com valor de absorbância de 1,7169 e finalizando no tempo de 180 min, após 180 minutos de fotólise, em um valor de absorbância de 0,0159 obtendo uma taxa de degradação correspondente a 99%, de acordo com a Equação  $\% = (\text{Abs}_{\text{inicial}} - \text{Abs}_{\text{final}}) \div \text{Abs}_{\text{Inicial}}$  (Paschoal, 2008).

Figura 1 - Espectros de absorção na região UV-Vis da solução de Imidacloprid fotolisada por 180 minutos de tratamento.

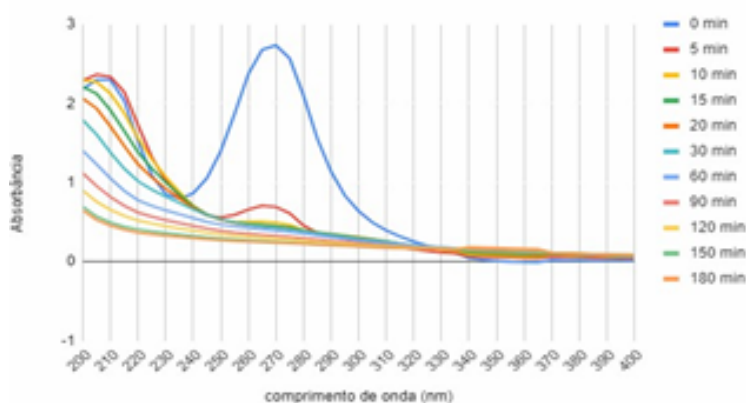


Fonte - Elaborado pelos autores, 2024.

Deve-se considerar no resultado fotolítico a baixa concentração de Imidacloprid presente na amostra, em comparação com as concentrações utilizadas nos tratamentos fotocatalíticos realizados.

Na Figura 2, observa-se o gráfico de varredura da fotocatalise utilizando o eletrodo de  $Ti/Cu_2O$ , no qual observa-se a redução da absorbância no comprimento de onda de 270 nm, Figura 2- Espectros de absorção na região UV-Vis da solução de corante azul de metileno fotocatalisada por 180 minutos com o eletrodo  $Ti/TiO_2-Cu_2O$  em reator de um compartimento iniciando no tempo de 0 minutos com valor de absorbância de 2,7335 e finalizando no tempo de 180 min em um valor de absorbância de 0,2404 obtendo uma taxa de degradação correspondente a 90% (Paschoal, 2008).

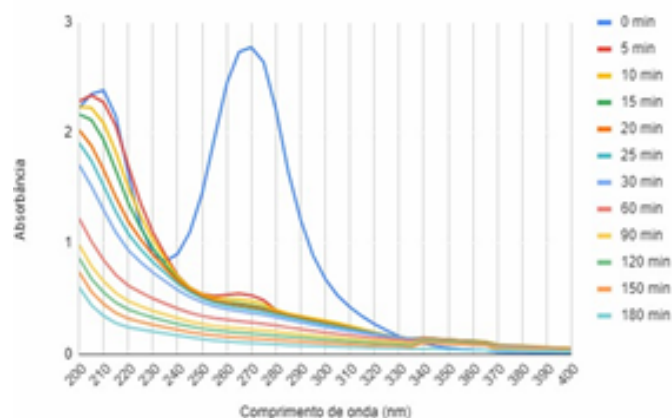
Figura 2- Espectros de absorção na região UV-Vis da solução de Imidacloprid fotocatalisada por 180 minutos utilizando o eletrodo de  $Ti/Cu_2O$ .



Fonte - Elaborado pelos autores, 2024.

Na figura 3, é possível observar o gráfico de UV-Vis da solução de Imidacloprid fotocatalisada utilizando o eletrodo de  $Ti/TiO_2$  nanotubular imobilizado, no qual vê-se a redução da absorbância no comprimento de onda de 270 nm, iniciando no tempo de 0 minutos com valor de absorbância de 2,7755 e finalizando no tempo de 180 min em um valor de absorbância de 0,0982 obtendo uma taxa de degradação correspondente a 96% (Paschoal, 2008).

Figura 3- Espectros de absorção na região UV-Vis da solução de Imidacloprid fotocatalisada por 180 minutos com o eletrodo de Ti/TiO<sub>2</sub> nanotubular.



Fonte - Elaborado pelos autores, 2024.

Diante dos dados apresentados, a maior taxa de degradação do inseticida Imidacloprid entre os eletrodos analisados pertence ao método que utiliza o eletrodo de Ti/TiO<sub>2</sub> nanotubular e isso se deve ao seu aspecto morfológico nanotubular, que facilita a captura de elétrons, promovendo uma separação mais eficaz dos portadores de carga.

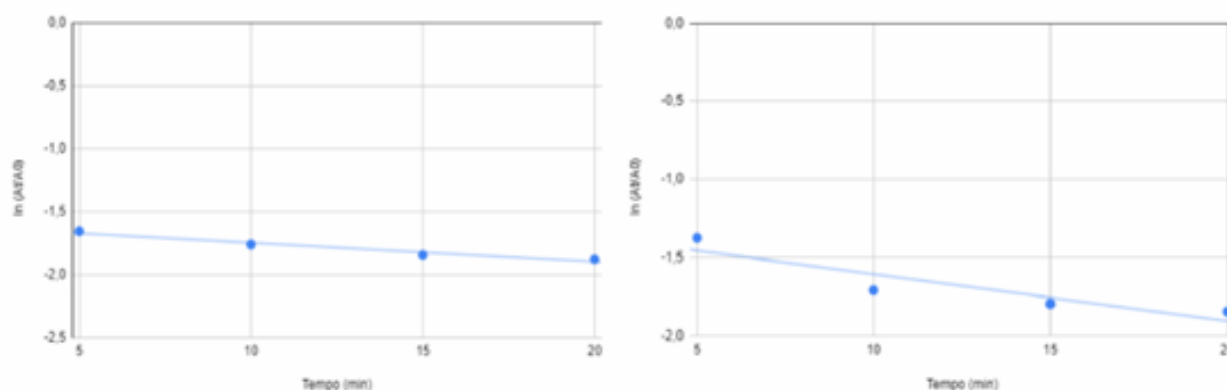
Para se obter a cinética de degradação do Imidacloprid, foi realizado um cálculo do  $\ln [At/A0]$  em função do tempo. Nesse cálculo, At refere-se à absorbância do inseticida em um determinado período da fotocatalise, no comprimento de onda de 270 nm, enquanto A0 corresponde à absorbância inicial.

A fotocatalise com eletrodo de Ti/TiO<sub>2</sub> nanotubular representado na Figura 4 (a), apresentou um valor da constante de velocidade de oxidação fotocatalítica de 0,015 min<sup>-1</sup> e um R2 igual a 0,957, enquanto o tratamento fotocatalítico com eletrodo de Ti/Cu<sub>2</sub>O de acordo com o gráfico de  $\ln (At/A0)$  versus tempo fotocatalítico representado na Figura 4 (b), demonstrou um valor de constante de velocidade de oxidação fotocatalítica do Imidacloprid de 0,0301 min<sup>-1</sup> e R2 = 0,832.

Comparativamente, pelos gráficos da reta, Figuras 4 (a) e (b), o tratamento fotocatalítico incluindo o eletrodo de dióxido de titânio nanotubular apresentou o melhor desempenho em relação à fotocatalise com o eletrodo de Ti/Cu<sub>2</sub>O. Urzedo et al (2023) realizou experimento nos parâmetros de 500 mL de uma solução aquosa do inseticida Imidacloprid com concentração de 35 mg/L, 0,5 g de TiO<sub>2</sub> suspensos em solução, obtendo como resultado

uma cinética de degradação de primeira ordem com constante de velocidade de 0,0234 e  $R^2$ : 0,9961. De maneira semelhante a conclusão de Urzedo et al (2023), é necessário também realizar mais estudos para determinar os produtos intermediários que foram formados nessas condições e sua influência na degradação do pesticida.

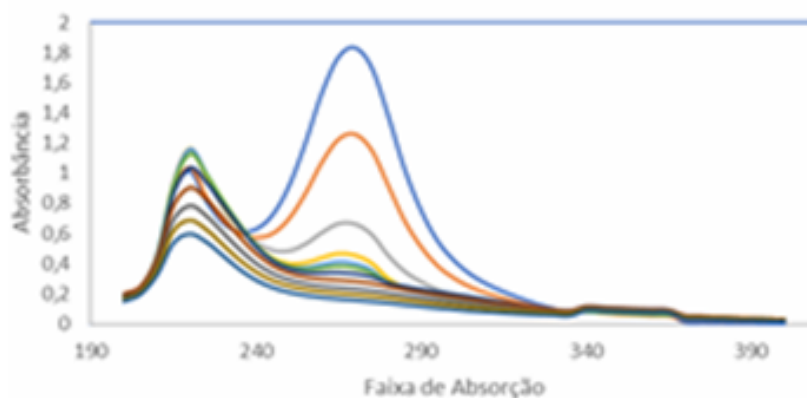
Figura 4- a) Gráfico de  $\ln (A_t/A_0)$  versus tempo de fotocatalise do Imidacloprid no tratamento fotocatalítico com eletrodo de  $Ti/TiO_2$  nanotubular. b) Gráfico de  $\ln (A_t/A_0)$  versus tempo de fotocatalise do Imidacloprid no tratamento fotocatalítico com eletrodo de  $Ti/Cu_2O$



Fonte - Elaborado pelos autores, 2024.

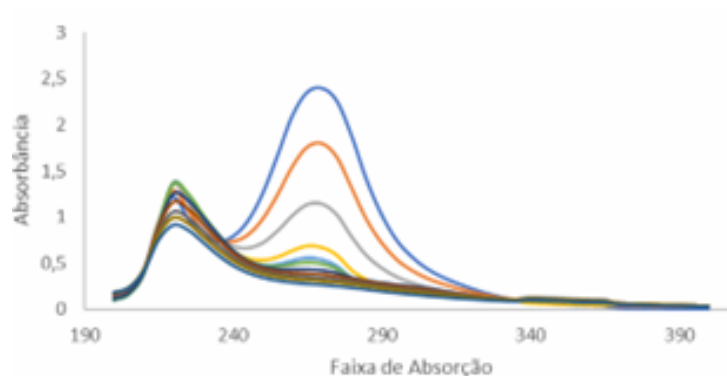
Para avaliar a eficiência do eletrodo de  $Ti/TiO_2$  nanoporoso foi realizado um ensaio de fotocatalise do inseticida sob irradiação UV, nas mesmas condições previamente descritas. A Figura 5 mostra o espectro de absorção da solução de Imidacloprid fotocatalisada por 180 minutos utilizando o eletrodo de  $Ti/TiO_2$  nanoporoso.

Figura 5- Espectros de absorção na região UV-Vis da solução de Imidacloprid fotocatalisada por 180 minutos com o eletrodo de  $Ti/TiO_2$  nanoporoso.



Fonte - Elaborado pelos autores, 2024.

Figura 6 -

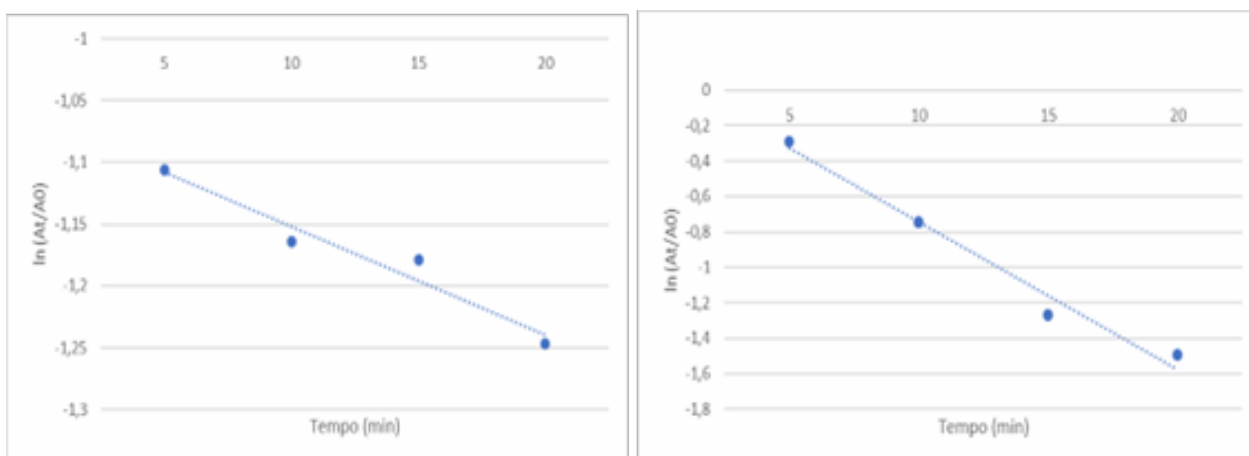


Fonte - Elaborado pelos autores, 2024.

É possível observar na Figura 6 comportamento semelhante ao eletrodo de TiO<sub>2</sub> nanoporoso no qual ocorre um decaimento gradual na banda em 270 nm, referente ao Imidacloprid), culminando em 93,2% de remoção após 180 minutos de tratamento fotocatalítico.

A cinética de degradação do imidacloprid é ilustrada na Figura 7, que mostra o gráfico de  $\ln [A_t/A_0]$  em função do tempo. Neste gráfico,  $A_t$  representa a absorbância do pesticida em um dado momento durante a fotocatalise no comprimento onde desejado (270nm), e  $A_0$  é a absorbância inicial.

Figura 7 – Gráfico de  $\ln (A_t/A_0)$  versus tempo de fotocatalise da solução de Imidacloprid, onde a) foto catalise com eletrodo de Ti/TiO<sub>2</sub> nanoporoso e b) fotocatalise em eletrodo de Ti/TiO<sub>2</sub>-CuO ambas fotocatalisadas por 180 minutos e avaliadas em 270 nm.



Fonte - Elaborado pelos autores, 2024.

Ambos os resultados indicam que a degradação do agrotóxico segue uma cinética de pseudo primeira ordem, conforme descrito por Sedaghat et al. (2016). No início do processo (etapa 1), a irradiação UV com o catalisador apresenta uma velocidade de reação superior à da etapa 2, onde se observa a presença de intermediários mais estáveis. A presença do catalisador pode, inicialmente, bloquear parte da radiação (por espalhamento), impedindo que ela atinja a molécula alvo, o agrotóxico.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A fotocatalise heterogênea é uma técnica eficiente para a degradação de agrotóxicos, como o imidacloprid. A utilização de radiação ultravioleta e catalisadores, especialmente óxidos metálicos, demonstrou um impacto significativo na eficiência do processo de fotodegradação.

O tratamento fotocatalítico da água contaminada com Imidacloprid, com o uso de eletrodo de  $\text{Ti}/\text{Cu}_2\text{O}$  e  $\text{Ti}/\text{TiO}_2$  nanotubular, demonstraram respectivamente uma remoção de 90% e 96% do inseticida Imidacloprid, além de uma cinética de degradação correspondente a  $0,0301 \text{ min}^{-1}$  e  $0,015 \text{ min}^{-1}$ . Dessa forma, foi possível avaliar a eficiência na ação de ambos os eletrodos para descontaminação de água destinada ao consumo humano.

No que diz respeito à fotocatalise, os eletrodos revestidos com filme de sol-gel de  $\text{TiO}_2$  nanoporoso, mostraram uma eficiência de 99% na oxidação do Imidacloprid. E para os eletrodos com filme de  $\text{Ti}/\text{TiO}_2\text{-CuO}$ , a eficiência foi de menor, em torno de 93,2%.

A análise cinética revelou um comportamento de pseudo-primeira ordem, com a eficiência do processo variando conforme a presença de intermediários e a atuação do catalisador.

A eficiência da fotólise foi de 86%. Esse desempenho na célula deve-se ao contato direto da lâmpada com a solução contaminada de Imidacloprid e ao efeito térmico gerado, que, mesmo após resfriamento, pode contribuir para a degradação das substâncias.

## Agradecimento para os dois artigos:

Os autores agradecem a FAPEAM pelo auxílio financeiro concedido no Processo 01.02.016301.02509/2022-44. Edital 007/2022 - Mulheres das Águas.

## 6 REFERÊNCIAS

AMARAL, P. et al. Caracterização química dos neonicotinóides em águas superficiais via cromatografia líquida de alta eficiência acoplada a espectrometria de massas em tandem (hplc -ms/ms). 2017

ANDREOZZI, R., CAPRIO, V., INSOLA, A., MARROTTA, R. Advanced oxidation process (AOP) for water purification and recovery. *Catalysis Today*, v. 53, p. 51-59, 1999

BAO, M. et al. Electrodeposition and electrocatalytic activity of Cu<sub>2</sub>O film on stainless steel substrate. *Applied Surface Science*, v. 258, p. 8008, 2012.

CASIDA, J. E. and DURKIN, K. A. 2013. Neuroactive Insecticides: Targets, Selectivity, Resistance, and Secondary Effects. *Annual Review of Entomology*, vol .58, p .99 – 117

DORES, E. F. G. C. & FREIRE, E. M. D. “Aquatic environment contamination by pesticides. Case study: water used for human consumption in Primavera do Leste, Mato Grosso - preliminary analyses”. *Quim. Nova*, 24: 27, 2001.

GRAYMORE, M., STAGNITTI, F. & ALLISON, G. “Impacts of atrazine in aquatic ecosystems”. *Environ. Int.*, 26: 483, 2001.

NUNES, Maria Edna Tenório; DAAM, Michiel Adriaan; ESPÍNDOLA, Evaldo Luiz Gaeta. Survival, morphology and reproduction of *Eisenia andrei* (Annelida, Oligochaeta) as affected by Vertimec® 18 EC (a.i. abamectin) in tests performed under tropical conditions. *Applied Soil Ecology*, [s.l.], v. 100, p.18-26, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.11.023>.

PASCHOAL, F. Aplicações da técnica de fotoeletrocatalise na oxidação de corantes ácidos, corantes dispersos, surfatantes e na redução de Cr(VI) e bromato em efluentes usando eletrodos nanoporosos de Ti/TiO<sub>2</sub>. 159 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), São Paulo, 2008b.

REGITANO, J. B.; ALEONI, L. R. F.; VIDA-TORRADO, P.; CASAGRANDE, J. C. & TORNISIELO, V. L. “Imazaquin sorption in highly weathered tropical soils”. *J. Environ. Qual.*, 29: 894, 2000.

SIRIPALA, W.IVANOVSKEYA, A; JARAMILLO, T. F; BAECK, S; MCFARLAND, E. A. A Cu<sub>2</sub>O/TiO<sub>2</sub> heterojunction thin film cathode for photoelectrocatalysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 77, n. 3, p. 229–237, maio 2003.

SOARES, G. B.; Estudos Sobre a Fotodegradação De Poluentes Catalisada Por Semicondutor: Contribuições De Métodos Eletroquímicos Na Compreensão do Papel De Dopantes Na Atividade De TiO<sub>2</sub>. 2013.

URZEDO, A. P. F. M. . Degradação de substâncias de relevância ambiental por processos oxidativos e redutivos com monitoramento por espectrometria de massas com ionização electrospray. 2008.

URZEDO, A. P. F. M. et al. Degradação do inseticida imidacloprid empregando TiO<sub>2</sub>/UV. In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, 30<sup>a</sup>, Águas de Lindóia, 2007. Disponível em: <http://sec.s bq.org.br/cdrom/30ra/resumos/T1872-2.pdf>.

VEIGA, M. M., Silva, D. M., Veiga, L. B. E., & Faria, M. V. de C. Análise da contaminação dos sistemas hídricos por agrotóxicos numa pequena comunidade rural do Sudeste do Brasil. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 22, n. 11, p.

## **SOBRE OS ORGANIZADORES**

### **Bruno Mori**

Doutor em Imunologia Básica e Aplicada, Professor Permanente do Programa de Pós-graduação em Ciências, Tecnologia e Saúde (PPGCTS) e do Programa de Pós-graduação em Ciências do Movimento Humano (PPGCIMH), ambos da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Editor-chefe da Revista do Hospital Getúlio Vargas (HUGV/EBSERH/UFAM), Brasil, Amazonas, Manaus.

E-mail: brunomori@ufam.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0903-2132>

### **Geraldo José Gonçalves**

Possui graduação em Engenharia Agrônoma pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Doutor em Ciências (área de concentração Entomologia) pela Universidade de São Paulo/Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (USP/ESALQ). Atualmente é professor/pesquisador de dedicação exclusiva no curso de bacharelado em Agronomia e nos Programas de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos (PPGCTRA) e Pós-Graduação em Ciências, Tecnologia e Saúde (PPGCTS) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM)/Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia (ICET). Coordenado do Laboratório de Acarologia e Entomologia Agrícola (LAEA). Tem experiência na área de Agronomia, com ênfase em Entomologia e Acarologia, atuando principalmente nos seguintes temas: Biologia de insetos e ácaros, controle biológico e biodiversidade.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2581-9931>

## **Victor Celso Capibaribe**

É farmacêutico e professor Adjunto na Universidade Federal do Amazonas - UFAM, lotado no Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia - ICET, campus Itacoatiara - AM. Professor do Programa de Pós-Graduação em Ciências, Tecnologia e Saúde - PPGCTS. Líder do Grupo de Pesquisa em Saúde, Ensino, Educação e Divulgação Científica (GP-SEED). Possui experiência no ensino gamificado da farmacologia e na farmacologia experimental, com ênfase em neuropsicofarmacologia, tendo trabalhado com experimentação animal, modelos de depressão induzida, produtos naturais e sintéticos. É autor, idealizador e editor do site [www.Farmacologia.com.br](http://www.Farmacologia.com.br) onde disponibiliza conteúdo referenciado sobre os mais diversos temas.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4057-1759>

## SOBRE AS AUTORAS E OS AUTORES

**Adriana Paula Farias:** Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Ciências, Tecnologia e Saúde (PPGCTS), pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Graduação em Farmácia e Ciências Biológicas (UFAM). Brasil, Amazo-nas-Itacoatiara. E-mail: [adrianapaulafarias1978@gmail.com](mailto:adrianapaulafarias1978@gmail.com) Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-1955-6977> Link do Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2935896023035867>

**Alfredo Paulo Oliveira Barros:** Mestrando em Ciências, Tecnologia e Saúde pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e graduado em Engenharia de Sof-tware. Atua nas áreas de inteligência artificial, sistemas embarcados, computação neuromórfica, visão computacional e robótica aplicada. Desenvolve pesquisas com Spiking Neural Networks, controle de manipuladores robóticos e monitora-mento ambiental inteligente. Possui experiência em desenvolvimento de software com Delphi, .NET, Django, Flutter e integração com Firebase, além de atuação em ciência de dados e visualização com Power BI. Também possui experiência pro-fissional como Software Engineer e atuação acadêmica como monitor de Progra-mação, Álgebra Linear e Cálculo.

**Alex Martins Ramos:** é doutor em Engenharia Química, com ênfase em Engenharia de Processos, área na qual desenvolveu soluções para o tratamento de água voltadas a comunidades ribeirinhas. Possui mestrado em Química, com concen-tração em Química Ambiental, tendo como foco o estudo da qualidade das águas amazônicas e seu monitoramento desde 2003. Atualmente, coordena o projeto “Lagos Sentinelas da Amazônia: subprojeto Serpa”, dedicado à investigação dos impactos das mudanças climáticas no Lago de Serpa. É professor associado da Universidade Federal do Amazonas, atuando no ensino de Química desde 2007.

**Carlos Alberto Oliveira de Freitas:** Doutor em Engenharia Elétrica pela Universi-dade Federal do Pará (UFPA), mestre em Engenharia Elétrica com ênfase em Processos Industriais pela UFPA, especialista em Automação Industrial pela Uni-versidade Federal do Amazonas (UFAM) e graduado em Engenharia Elétrica pela UFAM. Atua nas áreas de inteligência computacional, automação industrial, visão computacional, sistemas embarcados, robótica e desenvolvimento de JIG de tes-tes. Possui experiência nos setores eletroeletrônico, telecomunicações e informá-tica, com atuação em gerenciamento de produção, qualidade, materiais e enge-nharia. Atualmente é professor adjunto do ICET/UFAM.

**Deolinda Lucianne Ferreira Garcia:** Professora Associada da Universidade do Estado do Amazonas. Possui Pós-doutorado em Biologia Vegetal, Doutorado em Agronomia Tropical, Mestrado em Ciências Ambientais, Especialista na Produção de Medicamentos Inovadores da Biodiversidade e Graduação em Ciências Biológicas. Coordenadora da Incubadora de Empresas de Itacoatiara, Diretora Técnica da Anprotec - Associação Nacional que reúne Entidades Promotoras de empreendimentos Inovadores. Docente convidada na Especialização da FIO-CRUZ/Farmanguinhos - Produção de Medicamentos Inovadores da Biodiversidade. Colaboradora no Mestrado Profissional em Desenvolvimento Local UNISU-AM/Rio. Professora do PROFNIT/UEA. Tem experiência na área de Botânica, atuando principalmente nos seguintes temas: morfologia vegetal (anatomia e histo-química vegetal), uso de fibras vegetais, cadeias produtivas, empreendedorismo no campo, inovação, bioeconomia, etnobotânica, botânica geral e meio ambiente. Email: dlferreira@uea.edu.br

**Evelyn Perlayne Serrão da Silva:** farmacêutica pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM), atualmente mestranda em Biotecnologia no Programa de Pós-graduação em Biotecnologia da UFAM (PPGBIOTEC), atuando como membro do grupo de pesquisa Estudos com Materiais Biotecnológicos Aplicados no Desenvolvimento Sustentável e Inovador (EMBASI) e do Grupo de Pesquisa em Produtos Naturais da Amazônia (GPNAM).

**Fabiana Maria Monteiro Paschoal:** Atualmente é Professora Adjunto 1, do Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia de Itacoatiara da Universidade Federal do Amazonas, com atuação no Campus de Itacoatiara e é credenciada no Programa do Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos (PPGCTRA). Possui graduação em bacharel em Química Tecnológica pela Universidade Estadual de Londrina (2000), mestrado em Ciências, área de concentração em Química (Química Analítica) pela Universidade de São Paulo (2003), doutorado em Química, área de concentração em Química Analítica, pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2008) e pós-doutorado em Química Analítica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2010). Tem experiência na área de Química Analítica e Química Ambiental, com ênfase em Eletroanalítica, atuando principalmente nos seguintes temas: eletroanalítica aplicada à análise de pesticidas; corantes; hormônios, efluentes industriais e esgoto domésticos utilizando a técnica do fotoeletrocatalise e uso de técnicas voltamétricas de pulso e cíclica, microeletrodos e eletrodos quimicamente modificados

**Felipe Maklouf Coelho:** Mestrando em Ciências, Tecnologia e Saúde pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e graduado em Engenharia de Software pelo ICET/UFAM. Atua no projeto Mob4AI, em parceria com a Motorola, como Líder de Equipes de Desenvolvimento, com participação ativa no desenvolvimento de soluções tecnológicas e no treinamento de modelos de inteligência artificial. Possui interesse nas áreas de segurança da informação e desenvolvimento de software, com ênfase em frontend. Tem experiência profissional como Analista de Suporte de TI e Analista de Suporte Computacional. Possui conhecimentos em desenvolvimento Web, JavaScript, banco de dados SQL, Kotlin, Java e Python.

**Felipe de Vasconcelos Assunção:** Mestrando em Ciências, Tecnologia e Saúde pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM), com graduação em Engenharia de Software. Atua como Engenheiro de Software no Instituto de Pesquisas Eldorado e integra o laboratório NAVIR (ICET/UFAM). Possui experiência em desenvolvimento mobile Android com Kotlin, Jetpack Compose e arquitetura limpa. Trabalha com integração de APIs REST, comunicação IoT via MQTT e desenvolvimento de soluções para monitoramento de dispositivos, incluindo métricas de hardware e análise de logs. Atua também com desenvolvimento de sistemas escaláveis, serviços em background e automação de testes, com foco em aplicações robustas e de alto desempenho.

**João Victor Neves Machado da Silva:** Mestrando em Ciências, Tecnologia e Saúde pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM), especialista em Gestão de Projetos pela Faculdade Metropolitana e graduado em Engenharia de Software pela UFAM. Possui experiência em análise de requisitos e negócios de tecnologia da informação, desenvolvimento de automações para sistemas web e execução de projetos de pesquisa científica. Atua principalmente em iniciativas relacionadas à automação, sistemas embarcados e desenvolvimento tecnológico aplicado.

**Jamilly Marques:** é graduanda em Farmácia pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e integrante do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Ciências Ambientais e da Terra (LPCAT). Atua na área de Química aplicada ao tratamento de água por processos fotocatalíticos, com foco na degradação de contaminantes como microrganismos, corantes e inseticidas. Atualmente, desenvolve pesquisas com o emprego de eletrodos de pasta de carbono modificados com nanopartículas magnéticas para aplicações ambientais e analíticas. Possui experiência em atividades laboratoriais, desenvolvimento experimental e produção científica.

**Julina Silva Asevedo Maia:** Acadêmica em Farmácia pela Universidade Federal do Amazonas, possui trabalho de iniciação científica voltado para o tratamento de água contaminada com Salmonela por fotocatalise e atualmente, atuo em um trabalho de iniciação científica com linha de pesquisa em tratamento de água contaminada com inseticida por fotocatalise.

**Kalise Nunes Lamego:** Gestora Escolar com Bacharelado em Administração (UFAM) e Letras Língua Portuguesa (UEA), Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ciências, Tecnologia e Saúde (PPGCTS) do Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia (ICET) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Brasil, Amazonas - Manaus. Tem interesse em Educação, Saúde, Comportamento Humano nas Organizações e Governança Emocional. E-mail: kaliselamegovalen-te@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-2503-9418> ; <https://lattes.cnpq.br/9701810372215217>

**Katarina Cordovil de Nazaré:** Mestranda em Ciências, Tecnologia e Saúde (UFAM). Especialista em Educação Profissional e Tecnológica (IFAM, 2025). Graduada em Engenharia Ambiental e Sanitária (UFAM, 2024). Docente na Universidade Federal do Amazonas - ICET/UFAM. Áreas de atuação: saneamento ambiental, gestão de resíduos sólidos, educação ambiental e desenvolvimento regional. Experiência em projetos de extensão em saneamento rural e reciclagem. Currículo Lattes: <https://lattes.cnpq.br/2076341356534069>

**Kathlem Souza Nelson:** Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Ciências, Tecnologia e Saúde (PPGCTS), pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Graduação em Farmácia e Ciências Biológicas (UFAM). Brasil, Amazonas-Itacoatiara. E-mail: [kathlemsn@gmail.com](mailto:kathlemsn@gmail.com) Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-3453-9073> Link do Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4386840260122006>

**Larissa Castro:** Engenheira florestal pela Universidade do Estado do Amazonas (UEA) e técnica em Meio Ambiente pelo Instituto Federal do Amazonas (IFAM). Atua em pesquisas voltadas à anatomia vegetal, histoquímica, fitoquímica e bioprospecção de espécies amazônicas, com ênfase no potencial bioativo de recursos florestais. Desenvolve estudos relacionados à bioeconomia amazônica, valorização de resíduos madeiros e prospecção de metabólitos de interesse biotecnológico. Também possui experiência em atividades de pesquisa, extensão e produção científica na área de recursos florestais e biodiversidade amazônica.

**Maria Paula Biase Fernandes:** Graduanda em Medicina pela Universidade do Estado do Amazonas (UEA). Atualmente, integra o Serviço de Aconselhamento Genético da UEA, com participações em atividades acadêmicas/assistenciais na área de genética. Brasil, Amazonas-Manaus. E-mail: mpbf.med23@uea.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-6381-2907> Link do Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5564963009134894>

**Manoele Sofia Farias Coutinho:** Graduanda em Medicina Faculdade de Ciências Médicas (AFYA). Atualmente, integra a diretoria da Liga Acadêmica de Cirurgia, e as ligas Acadêmica de Anatomia Clínica e a Liga Acadêmica de Ginecologia e Obstetrícia. Participou do 4º Congresso Brasileiro de Trauma e Medicina de Emergência e de evento na área de urgência e emergência. Brasil, Amazonas-Manaus. E-mail: manoelesofiaf@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-7035-3038> Link do Lattes: <https://lattes.cnpq.br/9437897530536221>

**Priscila Carvalho Dahmer:** Possui graduação em Engenharia Florestal pela Universidade do Estado do Amazonas (2014), mestrado em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos pela Universidade Federal do Amazonas (2021), graduação em Letras pela Faculdade Estácio do Amazonas (2023) e graduação em Pedagogia com especialização em Educação Infantil - Anos Iniciais e Psicopedagogia (2024). Tem 16 anos de experiência no ensino, atuando nas áreas de Educação, com ênfase em práticas pedagógicas e psicopedagógicas. Na área de Engenharia Florestal, possui experiência em recursos florestais, com foco em zoologia, meio ambiente e responsabilidade socioambiental, desenvolvendo estudos e projetos voltados para a sustentabilidade e preservação ambiental. Sua trajetória integra conhecimentos multidisciplinares para promover soluções que conciliem educação, sustentabilidade e desenvolvimento social.

**Reyner Carlos Silva Alegria:** Graduando em Engenharia de Software pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Possui interesse nas áreas de sistemas embarcados, inteligência artificial, aprendizado de máquina e desenvolvimento de software aplicado a problemas reais. Atua no desenvolvimento de soluções tecno-lógicas envolvendo integração entre software, eletrônica e análise de dados. Tem experiência com prototipagem utilizando microcontroladores como ESP32 e desenvolvimento de sistemas experimentais para monitoramento ambiental e plataformas robóticas. Participa de pesquisas envolvendo usabilidade e aplicação de técnicas de aprendizado de máquina em engenharia de software.

**Rute Holanda Lopes:** Pesquisadora e Professora Adjunto da Universidade Federal do Amazonas - UFAM/ ICET (Economia Rural, Introdução à Economia e Gestão Ambiental). Coordenadora do Núcleo de Economia, Tecnologia, Gestão e Inovação; Doutora em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade da Amazônia pela UFAM (2015). Mestra em Desenvolvimento Regional pela UFAM (2008). Graduada em Ciências Econômicas pelo CIESA (2001), MBA em Empresas e Negócios pelo CIESA (2003). Pesquisas na área de: Economia Rural, Economia Regional, Engenharia de Produção, Produção Agrícola, Cadeias Produtivas Locais e Agricultura Familiar, Gestão Ambiental, Sustentabilidade. Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3678444694216259>.

**Stéfani Ferreira de Oliveira:** Possui graduação em Farmácia pela Universidade Federal do Amazonas/Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia, mestrado em Ciências Farmacêuticas pela Universidade Federal do Amazonas e doutorado em Ciências Farmacêuticas pela Universidade Federal de Pernambuco (2022). Docente da Universidade Federal do Amazonas/Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia. E-mail: [adrianapaulafarias1978@gmail.com](mailto:adrianapaulafarias1978@gmail.com) Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4406-5119> Link do Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6636298981639710>

**Thayanny Nunes de Oliveira Leite:** Mestranda em ciência, tecnologia e saúde pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM), vinculada ao Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia (ICET), no município de Itacoatiara - AM. Atualmente é bolsista da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), desenvolvendo pesquisas sobre a Influência do Manejo Florestal na Conservação de Espécies Medicinais da Amazonia Central. Possui graduação em Engenharia Florestal pela Universidade do Estado do Amazonas (UEA), e pós graduanda em Auditoria, Perícia e Gestão Ambiental pela faculdade Santa Tereza. Email: [thaynuns94@gmail.com](mailto:thaynuns94@gmail.com)

**Vandermi João da Silva:** Doutor em Informática pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM), mestre em Informática pela UFAM, especialista em Sistemas Móveis e Convergentes pela Universidade do Estado do Amazonas e graduado em Informática pelo Centro Universitário Luterano de Manaus. Atua na área de Engenharia da Computação, com ênfase em desenvolvimento de sistemas para dispositivos móveis, embarcados e de automação, Internet das Coisas, Indústria 4.0, sistemas web, bancos de dados e aprendizado de máquina aplicado. Possui experiência industrial em empresas como Siemens e Benq. Atualmente é professor da UFAM, campus Itacoatiara-AM.

**Yana Gomes Inhuma:** Engenheira Sanitarista e Mestranda do Programa de Pós- Graduação em Ciências, Tecnologia e Saúde (PPGCTS) do Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia (ICET) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Bra-sil, Amazonas - Manaus. Tem interesse nas áreas de meio ambiente; sustentabili-dade; qualidade de água, saúde e saneamento básico. E-mail: yanago-mes67@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4591-7483> Link do Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5171447347263156>

**Wanderson Gonçalves Trindade:** Possui graduação em Química Bacharelado pela Universidade Federal de Goiás (1996) , em Química (Físico-Química) pela Universidade de São Paulo (2000) e em Química (Físico-Química) pela Universi-dade de São Paulo (2005) . Atualmente é Professor Adjunto 1 da Universidade Federal do Amazonas. Tem experiência na área de Química , com ênfase em Química Orgânica. Atuando principalmente nos seguintes temas: resina fenólica, Curauá, Fibras vegetais, Modificação superficial de fibras vegetais e compósitos.



# TECNOLOGIA, SAÚDE E MEIO AMBIENTE NO CONTEXTO AMAZÔNICO

*ABORDAGENS APLICADAS E INOVAÇÃO*

**Bruno Mori**  
**Victor Celso C. Capibaribe**  
**Geraldo José N. de Vasconcelos**  
*Organizadores*

**ARCO**  
EDITORES

**FAPEAM**  
Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas