



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

JULIA ISABELLA DE MATOS RODRIGUES

**ESTOQUE DE CARBONO E BIOECONOMIA EM FLORESTAS RIPÁRIAS:  
PRODUÇÃO CIENTÍFICA GLOBAL E AVALIAÇÕES LOCAIS NA AMAZÔNIA**

Belém,  
2026

JULIA ISABELLA DE MATOS RODRIGUES

**ESTOQUE DE CARBONO E BIOECONOMIA EM FLORESTAS RIPÁRIAS:  
PRODUÇÃO CIENTÍFICA GLOBAL E AVALIAÇÕES LOCAIS NA AMAZÔNIA**

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural da Amazônia como parte das exigências para obtenção do título de doutora em Ciências Florestais.

Orientador: Dr. Francisco de Assis Oliveira

Coorientador: Dr. Walmer Bruno Rocha Martins

Coorientadora: Dra. Gracialda Costa Ferreira

Belém

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia  
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- R696e     Rodrigues, Julia Isabella de Matos  
              Esteque de carbono e bioeconomia em florestas ripárias : produção científica global e avaliações locais na Amazônia / Julia Isabella de Matos Rodrigues. - 2026.  
              119 f. : il. color.
- Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2026.  
              Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Oliveira  
              Coorientador: Prof. Dr. Walmer Bruno Rocha Martins & Gracialda Costa Ferreira.
1. Floresta de várzea. 2. Planície fluvial. 3. Uso do solo. 4. Bibliometria. 5. Diversidade. I. Oliveira, Francisco de Assis, *orient.* II. Título
- 

CDD 333.7516

JULIA ISABELLA DE MATOS RODRIGUES

**ESTOQUE DE CARBONO E BIOECONOMIA EM FLORESTAS RIPÁRIAS:  
PRODUÇÃO CIENTÍFICA GLOBAL E AVALIAÇÕES LOCAIS NA AMAZÔNIA**

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal Rural da Amazônia, como requisito para obtenção do título de Doutora em Ciências Florestais.

Data da aprovação: 02/03/2026

**Banca Examinadora**



Documento assinado digitalmente

**FRANCISCO DE ASSIS OLIVEIRA**

Data: 24/03/2026 11:14:12-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

**Presidente da banca**

**Francisco de Assis Oliveira - Orientador**  
**Universidade Federal Rural da Amazônia**



Documento assinado digitalmente

**TAMARA THAIZ SANTANA LIMA**

Data: 21/03/2026 10:47:45-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

**Membro 1**

**Tâmara Thaiz Santana Lima**  
**Universidade Federal Rural da Amazônia**



Documento assinado digitalmente

**PEDRO MANUEL VILLA**

Data: 21/03/2026 17:33:23-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

**Membro 2**

**Pedro Manuel Villa**  
**Universidade Federal de Juiz de Fora**



Documento assinado digitalmente

**LUIZ FERNANDES SILVA DIONISIO**

Data: 23/03/2026 15:30:44-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

**Membro 3**

**Luiz Fernandes Silva Dionísio**  
**Universidade do Estado do Pará**



Documento assinado digitalmente

**GUSTAVO SCHWARTZ**

Data: 23/03/2026 21:04:56-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

**Membro 4**

**Gustavo Schwartz**  
**Embrapa Amazônia Oriental**

Dedico esta tese aos meus pais, que, com amor,  
sonharam ao meu lado antes mesmo que eu soubesse sonhar.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pelo Dom da vida e por me manter de pé nos bons e maus momentos.

De modo geral, aos meus pais, que sempre me incentivaram a estudar, pelo amor incondicional e apoio em todos os dias de minha vida. Sem vocês eu não teria a capacidade de chegar até aqui.

Individualmente, ao meu pai, Jairo Luiz Leal Rodrigues, por ter me dado um lápis de carpinteiro quando eu era um bebê e ter me apresentado o mundo dos estudos, mesmo tendo pouca escolaridade. Você é e sempre foi o meu maior incentivador.

À minha mãe, Silvia Janete de Matos Sousa, por me inspirar a ser professora, pela preocupação e por suas marmitas saborosas feitas às 4h da manhã para que eu pudesse almoçar em Belém durante a graduação. Eu nunca desisti porque você sempre esteve ao meu lado.

À minha irmã, Maria Eduarda de Matos Rodrigues, pela companhia na vida e pelo suporte emocional prestado mesmo sem perceber. Suas gracinhas aliviam os dias pesados.

À minha tia Diana Silva Nascimento, por sempre cuidar de mim como se eu fosse sua filha e por sempre dar um jeito de me socorrer quando preciso. Esse momento também é graças a você.

Ao meu companheiro Walmer Bruno Rocha Martins, por dividir as alegrias e dores da vida pessoal e profissional, e por sempre me fazer acreditar que posso ir além do que acredito ser possível. Você me encoraja e me inspira todos os dias.

Ao meu orientador Francisco de Assis Oliveira, por todas as oportunidades concedidas desde 2019, quando nossa trajetória de orientador-orientada iniciou. Guardarei sempre comigo sua amizade, os aprendizados e as experiências adquiridas ao longo desse tempo.

À minha coorientadora Gracialda Costa Ferreira, por tantas experiências proveitosas, ensinamentos e parceria, principalmente durante o doutorado. Sua trajetória de vida é uma inspiração e agradeço imensamente pela confiança depositada em mim.

Ao Laboratório de Manejo de Ecossistemas e Bacias Hidrográficas (LABECOS) da UFRA, que foi minha segunda casa, onde tive vivências memoráveis, as quais me fizeram crescer pessoalmente e profissionalmente.

Aos antigos estagiários e, agora, (excelentes) profissionais Marcos Nascimento Filho, José Silva, Juliana Favacho, Cintia Guedes, Angela Guimarães, Lucas Silva, Paula Moraes e Joathan Castro, Hanna Souza (caçula), além da Marcelle Pereira, por dividir tantos momentos ao longo da formação deles e da minha. Vocês me ensinaram muito e estarão eternizados em minha trajetória.

À Luana Rodrigues Vieira, minha dupla desde a graduação, pela amizade, pelo carinho e por tornar essa jornada mais leve.

Ao Hiago Felipe Cardoso Pacheco, que, mesmo morando em outro estado, permanece presente em todos os momentos, dividindo risadas e choros, pela amizade, apoio e companheirismo.

Aos meus colegas do doutorado, pelos momentos de descontração, disciplinas e figurinhas compartilhadas, em especial aos meus queridos amigos Rafael Ferreira, Rivaldo Cardoso Junior, Stone Costa, Dalton Angelo, Juliana Vinholte e Diogenis Fontenele. Desejo que todos alcancem seus objetivos profissionais e pessoais.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF) pelas experiências proporcionadas e apoio durante todas as fases do doutorado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa (140573/2024-0), cujo apoio foi fundamental para minha permanência em Belém e para a realização deste doutorado.

À Hydro Alunorte, através da Fundação de Amparo e Desenvolvimento da Pesquisa (FADESP), pelo apoio financeiro e logístico para a execução da pesquisa de campo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo pagamento da taxa APC que financiou a publicação em acesso aberto dos artigos da tese.

A todos que contribuíram indiretamente, meu muito obrigada!

*“Estude, minha filha! Estudar dá futuro.  
Se tua vó fosse viva, eu teria um filho doutor...  
não sei em que área, mas teria.”*  
André da Silva e Souza (meu avô – *in memoriam*)

## RESUMO

Esta tese investigou, em escala global e local, a relevância ecológica, científica e socioeconômica das florestas ripárias amazônicas, com ênfase no estoque de carbono, na diversidade florística, no potencial bioeconômico e na influência de fatores ambientais e antrópicos em paisagens submetidas à pressão antrópica. No primeiro capítulo, por meio de uma revisão bibliométrica global de 921 artigos, observou-se que a produção científica sobre carbono em florestas ripárias é concentrada em poucos países, sendo influenciada pelo Produto Interno Bruto, e, principalmente, pelo risco de desastres naturais extremos. Em escala local, no polo industrial de Barcarena, Amazônia Oriental, a avaliação da diversidade florística no segundo capítulo evidenciou elevada riqueza e composição relativamente semelhante entre sistemas hídricos caracterizados por diferentes graus de antropização, apesar de variações estruturais. No terceiro capítulo, a análise do potencial de uso não madeireiro de espécies florestais identificadas na mesma área demonstrou elevada diversidade de usos para uma mesma espécie, com predominância de usos medicinais e alimentícios e destaque para as palmeiras *Euterpe oleracea* e *Mauritia flexuosa*. Entretanto, a influência negativa do uso do solo sobre a distribuição potencial de algumas espécies torna urgente a adoção de estratégias integradas de conservação e manejo sustentável voltadas à sociobioeconomia amazônica. No quarto e último capítulo, a investigação da distribuição espacial do carbono acima do solo revelou alta variabilidade e ausência de autocorrelação espacial significativa, indicando padrão próximo da aleatoriedade. A elevação foi o principal fator ambiental associado aos estoques de carbono, enquanto variáveis amplas de uso do solo apresentaram baixo poder explicativo e preditivo. Em conjunto, os resultados desta tese contribuíram para atender diretamente a três objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU, sendo eles: 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e 15 (Vida Terrestre). Além disso, indicaram que a conservação e o manejo sustentável de florestas ripárias amazônicas exigem abordagens integradas que considerem simultaneamente as características ecológica, o potencial bioeconômico e o contexto de pressões antrópicas.

**Palavras-chave:** floresta de várzea; planície fluvial; uso do solo; bibliometria; diversidade; bioeconomia; geoestatística; modelagem espacial.

## ABSTRACT

In this thesis, the ecological, scientific, and socioeconomic relevance of Amazonian riparian forests was investigated both at global and local scales, focusing on carbon stocks, floristic diversity, bioeconomic potential, including the influence of environmental and anthropogenic factors within landscapes under intense human pressure. In the first chapter, through a global bibliometric review of 921 articles, the scientific production on carbon in riparian forests is concentrated in a few countries, influenced by Gross Domestic Product and, primarily, by the risk of extreme natural disasters. At the local scale, in the industrial hub of Barcarena, Eastern Amazon, the assessment of floristic diversity (second chapter) revealed high richness and similar composition across water systems characterized by different degrees of anthropization, despite structural variations. In the third chapter it was analyzed the potential non-timber use of tree species identified in the same area, demonstrating high diversity of uses per species, predominantly medicinal and food-related, with emphasis on the palms *Euterpe oleracea* and *Mauritia flexuosa*. However, the negative influence of land use on the potential distribution of certain species underscores the urgent need for integrated conservation and sustainable management strategies focused on the Amazonian socio-bioeconomy. In the fourth and final chapter, the investigation of the spatial distribution of aboveground carbon revealed high variability and absence of significant spatial autocorrelation, indicating a pattern approaching randomness. Elevation was the primary environmental factor associated with carbon stocks, while broad land-use variables showed low explanatory and predictive power. Taken together, the results of this thesis contribute directly to three UN Sustainable Development Goals: 11 (Sustainable Cities and Communities), 13 (Climate Action), and 15 (Life on Land). Furthermore, they indicate that the conservation and sustainable management of Amazonian riparian forests require integrated approaches that simultaneously consider ecological characteristics, bioeconomic potential, and the context of anthropogenic pressures.

**Keyword:** floodplain forest; river floodplain; land use; bibliometrics; diversity; bioeconomy; geostatistics; spatial modeling.

## LISTA DE FIGURAS

---

### Capítulo I

- Figura 1.** Procedimentos para seleção e coleta de informações da produção científica sobre o estoque de carbono em florestas ripárias, bem como os indicadores socioeconômicos dos países em que o artigo foi publicado ..... 25
- Figura 2.** Crescimento exponencial do número de artigos publicados globalmente sobre estoque de carbono em florestas ripárias ..... 29
- Figura 3.** Nuvem de palavras-chave contendo as 70 mais frequentes (A) e 15 palavra-chave mais utilizadas (B) com as respectivas tendências temporais (C) nos artigos científicos publicados globalmente sobre o estoque de carbono em florestas ripárias ao longo dos anos. Em A, o tamanho e a cor dos círculos significam a frequência de produção por palavra-chave ..... 30
- Figura 4.** Distribuição do número de artigos científicos publicados globalmente sobre estoque de carbono em florestas ripárias (a), ranking dos dez países que mais publicaram sobre o estoque de carbono em florestas ripárias (b) e ranking dos países com maiores (c) e menores (d) PIBs médios per capita da série histórica 1960-2023 ..... 32
- Figura 5.** Colaboração entre países de acordo com a instituição de origem dos autores que publicaram sobre o estoque de carbono em florestas ripárias para países com mais de cinco colaborações. O tamanho dos pontos indica o número de colaborações, e a largura da linha representa a intensidade de colaboração. .... 33

---

### Capítulo II

- Figura 1.** Pontos amostrais de florestas ripárias localizadas nas áreas de influência de diferentes sistemas fluviais no município de Barcarena, Amazônia Oriental, Brasil..... 51
- Figura 2.** Média  $\pm$  desvio padrão da densidade de indivíduos e espécies em florestas ripárias localizadas nas áreas de influência de diferentes sistemas fluviais no município de Barcarena, Amazônia Oriental, Brasil ..... 55
- Figura 3.** Curvas de rarefação baseadas no número de indivíduos em florestas ripárias localizadas nas áreas de influência de diferentes sistemas fluviais no município de

Barcarena, Amazônia Oriental, Brasil. As linhas contínuas representam a riqueza média de espécies observada, enquanto as linhas tracejadas são a riqueza de espécies estimada. Áreas sombreadas representam intervalos de confiança de 95% ..... 56

**Figura 4.** A) Escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS), e B) dendrograma de cluster, ambos com base no índice de dissimilaridade de Bray-Curtis em florestas ripárias localizadas nas áreas de influência de diferentes sistemas fluviais no município de Barcarena, Amazônia Oriental, Brasil ..... 57

**Figura 5.** Heatmap (A) e dendrograma de cluster (B) para a composição florística em florestas ripárias localizadas nas áreas de influência de diferentes sistemas fluviais no município de Barcarena, Amazônia Oriental, Brasil ..... 59

---

### Capítulo III

**Figura 1.** Pontos amostrais em áreas do polo industrial localizado no município de Barcarena, Brasil, Amazônia Oriental ..... 72

**Figura 2.** As dez espécies com os maiores índices de valor de importância (IVI) em florestas ripárias localizadas nas áreas de influência de diferentes sistemas fluviais no município de Barcarena, Amazônia Oriental, Brasil ..... 77

**Figura 3.** Rede bipartida não direcionada do potencial de uso das dez espécies com maior IVI e com algum status de conservação em florestas ripárias localizadas às margens dos principais rios do município de Barcarena, Amazônia oriental ..... 78

**Figura 4.** Relação entre o índice de valor de importância (IVI) e o número de categorias de uso das espécies arbóreas nas áreas avaliadas sob influência do rio Barcarena (a), rio Mucurupi (b) e baía do rio Marajó (c) no município de Barcarena, Amazônia Oriental 83

---

### Capítulo IV

**Figura 1.** Localização do município de Barcarena, Pará, Amazônia Oriental, e distribuição espacial dos pontos amostrais ..... 98

**Figura 2.** Distribuição espacial da elevação (A), declividade (B), aspecto (C) e uso e cobertura do solo (D) do município de Barcarena, Amazônia Oriental ..... 101

**Figura 3.** Estoque de carbono acima do solo estimado para diferentes usos do solo (A), e valores estimados versus preditos para as variáveis topográficas de elevação (B), declividade (C) e aspecto (D) para espécies arbóreas e palmeiras com potencial bioeconômico no município de Barcarena, Amazônia Oriental..... 103

**Figura 4.** Distribuição espacial do estoque de carbono da biomassa aérea estimado por meio do modelo Random Forest com variáveis topográficas (elevação e declividade) para espécies arbóreas e palmeiras com potencial bioeconômico no município de Barcarena, Amazônia Oriental..... 105

**Figura 5.** Distribuição espacial do carbono acima do solo em espécies com potencial bioeconômico no município de Barcarena, Pará, Amazônia Oriental..... 106

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                      |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Contextualização.....</b>                                                                                                         | <b>15</b> |
| <b>Objetivos.....</b>                                                                                                                | <b>17</b> |
| <i>Objetivo geral .....</i>                                                                                                          | <i>17</i> |
| <i>Objetivos específicos .....</i>                                                                                                   | <i>17</i> |
| <b>Referências .....</b>                                                                                                             | <b>19</b> |
| <b>Capítulo I.....</b>                                                                                                               | <b>21</b> |
| <b>O RISCO DE DESASTRES NATURAIS SUPERA FATORES SOCIOECONÔMICOS NA PRODUÇÃO CIENTÍFICA SOBRE CARBONO EM FLORESTAS RIPÁRIAS .....</b> | <b>21</b> |
| <b>Resumo gráfico .....</b>                                                                                                          | <b>21</b> |
| <b>Resumo .....</b>                                                                                                                  | <b>21</b> |
| <b>Introdução .....</b>                                                                                                              | <b>22</b> |
| <b>Métodos .....</b>                                                                                                                 | <b>24</b> |
| <i>Estratégia de busca e seleção dos estudos .....</i>                                                                               | <i>24</i> |
| <i>Extração e padronização dos dados.....</i>                                                                                        | <i>26</i> |
| <i>Análise de dados .....</i>                                                                                                        | <i>27</i> |
| <b>Resultados .....</b>                                                                                                              | <b>28</b> |
| <b>Discussão .....</b>                                                                                                               | <b>36</b> |
| <b>Conclusão .....</b>                                                                                                               | <b>40</b> |
| <b>Referências .....</b>                                                                                                             | <b>40</b> |
| <b>Capítulo II .....</b>                                                                                                             | <b>47</b> |
| <b>DIVERSIDADE E ESTRUTURA FLORÍSTICA DE FLORESTAS RIPÁRIAS EM POLO INDUSTRIAL E URBANO DA AMAZÔNIA .....</b>                        | <b>47</b> |
| <b>Resumo gráfico .....</b>                                                                                                          | <b>47</b> |
| <b>Resumo .....</b>                                                                                                                  | <b>47</b> |

|                                                                                                                                        |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Introdução .....</b>                                                                                                                | <b>48</b> |
| <b>Material e métodos .....</b>                                                                                                        | <b>50</b> |
| <i>Área de estudo .....</i>                                                                                                            | <i>50</i> |
| <i>Delimitação e classificação das áreas de estudo .....</i>                                                                           | <i>51</i> |
| <i>Coleta de dados .....</i>                                                                                                           | <i>52</i> |
| <i>Análise de dados .....</i>                                                                                                          | <i>53</i> |
| <b>Resultados .....</b>                                                                                                                | <b>54</b> |
| <b>Discussão .....</b>                                                                                                                 | <b>60</b> |
| <b>Conclusão .....</b>                                                                                                                 | <b>64</b> |
| <b>Referências .....</b>                                                                                                               | <b>64</b> |
| <b>Capítulo III.....</b>                                                                                                               | <b>69</b> |
| <b>FLORESTAS RIPÁRIAS ANTROPIZADAS APRESENTAM POTENCIAL DE<br/>USO NÃO-MADEIREIRO EM POLO INDUSTRIAL NA AMAZÔNIA<br/>ORIENTAL.....</b> | <b>69</b> |
| <b>Resumo gráfico .....</b>                                                                                                            | <b>69</b> |
| <b>Resumo .....</b>                                                                                                                    | <b>69</b> |
| <b>Introdução .....</b>                                                                                                                | <b>70</b> |
| <b>Material e Métodos.....</b>                                                                                                         | <b>72</b> |
| <i>Área de estudo .....</i>                                                                                                            | <i>72</i> |
| <i>Coleta de dados florísticos .....</i>                                                                                               | <i>73</i> |
| <i>Avaliação do potencial bioeconômico .....</i>                                                                                       | <i>74</i> |
| <i>Modelagem e distribuição das espécies .....</i>                                                                                     | <i>74</i> |
| <b>Resultados .....</b>                                                                                                                | <b>75</b> |
| <b>Discussão .....</b>                                                                                                                 | <b>84</b> |
| <b>Conclusão .....</b>                                                                                                                 | <b>88</b> |

|                                                                                                                                                        |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Referências .....</b>                                                                                                                               | <b>88</b>  |
| <b>Capítulo IV .....</b>                                                                                                                               | <b>94</b>  |
| <b>DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO CARBONO AÉREO DE ESPÉCIES COM<br/>POTENCIAL DE USO NÃO MADEIREIRO EM UM POLO INDUSTRIAL DA<br/>AMAZÔNIA ORIENTAL .....</b> | <b>94</b>  |
| <b>Resumo gráfico .....</b>                                                                                                                            | <b>94</b>  |
| <b>Resumo .....</b>                                                                                                                                    | <b>94</b>  |
| <b>Palavras-chave: geoestatística; Random Forest; bioeconomia. ....</b>                                                                                | <b>95</b>  |
| <b>Introdução .....</b>                                                                                                                                | <b>95</b>  |
| <b>Material e métodos .....</b>                                                                                                                        | <b>97</b>  |
| <i>Área de estudo .....</i>                                                                                                                            | <i>97</i>  |
| <i>Seleção de espécies.....</i>                                                                                                                        | <i>98</i>  |
| <i>Coleta de dados em campo e estimativa de carbono acima do solo .....</i>                                                                            | <i>99</i>  |
| <i>Coleta de dados espaciais .....</i>                                                                                                                 | <i>100</i> |
| <i>Modelagem e análise espacial do carbono .....</i>                                                                                                   | <i>101</i> |
| <b>Resultados .....</b>                                                                                                                                | <b>102</b> |
| <b>Discussão .....</b>                                                                                                                                 | <b>106</b> |
| <b>Conclusão .....</b>                                                                                                                                 | <b>109</b> |
| <b>Referências .....</b>                                                                                                                               | <b>110</b> |
| <b>Considerações Finais da Tese .....</b>                                                                                                              | <b>116</b> |

## Contextualização

As referências e citações deste tópico estão formatadas de acordo com a NBR 10520/2023

As florestas ripárias caracterizam-se como um dos ecossistemas mais estratégicos para a sustentabilidade ambiental em paisagens tropicais, em função de seu papel na provisão de serviços ecossistêmicos essenciais, como regulação hidrológica, manutenção da biodiversidade e sequestro de carbono (Dinca et al., 2025). Em regiões amazônicas, esses ecossistemas assumem relevância ainda maior, pois estão frequentemente inseridos em contextos de intensas transformações antrópicas, nas quais a pressão do uso do solo coexiste com a necessidade de conservação ambiental e desenvolvimento socioeconômico (Nowacki et al., 2019). Nesse cenário, compreender a dinâmica estrutural, funcional e espacial das florestas ripárias pode subsidiar o manejo sustentável de recursos e políticas públicas voltadas à mitigação das mudanças climáticas, como estratégias de fortalecimento da manutenção de florestas por meio da bioeconomia.

A bioeconomia é um conceito multidisciplinar que integra conhecimentos científicos, tecnológicos e econômicos para promover o uso sustentável de recursos biológicos renováveis (D'Adamo et al., 2021). Setores como agricultura, silvicultura, biotecnologia, indústria química, energia e mineração são englobados neste contexto, valorizando práticas sustentáveis que promovem a conservação da biodiversidade e o equilíbrio ambiental (Stephenson; Damerell, 2022). Por esse motivo, busca-se não apenas a geração de produtos, mas também o desenvolvimento econômico alinhado à preservação ambiental, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e o fortalecimento da sustentabilidade. Nesse contexto, o carbono estocado nas florestas assume papel central como um dos principais ativos da bioeconomia contemporânea, uma vez que seu sequestro e armazenamento estão diretamente associados tanto à regulação climática quanto à valorização econômica de ecossistemas naturais por meio de mecanismos como serviços ecossistêmicos, mercados de carbono e estratégias de conservação produtiva.

Somado a isso, ecossistemas ripários, definidos como formações vegetais localizadas às margens de cursos d'água sujeitos à influência direta do regime hidrológico (Zheng et al., 2023), exibem grande potencial bioeconômico devido à ampla diversidade de produtos florestais não-madeireiros (PFNM) e provisão de serviços ecossistêmicos, principalmente na Amazônia. Dentre os PFNM, destaca-se o açaí (*Euterpe oleraceae* Mart.), reconhecido como um superalimento, que apresenta elevado valor

socioeconômico, sendo fundamental para a segurança alimentar, geração de renda e sustento de comunidades ribeirinhas amazônicas, além de possuir crescente demanda nos mercados nacional e internacional devido ao seu alto valor nutricional e propriedades antioxidantes (Rosenfeld et al., 2024), além de andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.) e miriti (*Mauritia flexuosa* Lf.), que apresentam alto valor agregado devido aos benefícios etnobotânicos (Coelho-Ferreira, 2009).

No entanto, a dualidade entre expansão econômica e conservação da diversidade florística exemplifica um dilema presente em regiões ricas em recursos naturais, como a Amazônia. Isso porque a expansão de polos industriais impulsiona o crescimento econômico por meio da geração de empregos e desenvolvimento de infraestrutura (Matlaba et al., 2019), frequentemente causando impactos ambientais severos (Dushin et al., 2020). Como exemplo, tem-se o município de Barcarena, localizado na região nordeste do estado do Pará, que se destaca como um importante polo industrial da Amazônia, concentrando diversas atividades que incluem urbanização, agricultura, recreação, atividades portuárias e industriais (Wegner and Fernandes, 2023; Silva and Hazeu, 2019). Essa dualidade entre desenvolvimento industrial e degradação ambiental torna Barcarena um caso emblemático para o estudo dos impactos do uso do solo nas florestas ripárias amazônicas.

Portanto, tem-se o desafio de conciliar o desenvolvimento econômico com práticas que assegurem a sustentabilidade e a conservação da diversidade biológica, promovendo estratégias que equilibram o uso responsável dos recursos naturais com a conservação da diversidade florística e estoques de carbono em florestas ripárias. Diante disso, por meio de uma abordagem interdisciplinar, nesta tese foi investigado em escala global e local os fatores relacionados à bioeconomia, seja pelo estoque de carbono ou pelo potencial não-madeireiro existente em florestas ripárias, combinando métodos bibliométricos, empíricos e geoespaciais. Portanto, a tese foi dividida em quatro capítulos (artigos científicos), em que o primeiro capítulo se constitui de uma bibliometria global sobre a produção científica sobre estoques de carbono em florestas ripárias, destacando a relação entre a produção científica sobre o tema e as variáveis socioeconômicas.

No segundo, avaliou-se a estrutura, a diversidade e a composição florística em florestas ripárias localizadas ao longo dos principais rios do polo industrial mencionado, visando identificar as principais espécies que compõem a região e, com isso, direcionar os demais capítulos. Sendo assim, no terceiro capítulo foi abordada a dimensão bioeconômica do trabalho de pesquisa ao avaliar o potencial de uso não madeireiro das

espécies arbóreas e arbustivas registradas no capítulo II. Para isso, espécies com maior valor de importância ecológica e com status de conservação conhecido foram classificadas quanto às categorias de uso (alimentício, medicinal, cosmético e artesanal), e sua distribuição espacial potencial foi modelada a partir de variáveis ambientais, hidrológicas, topográficas e de uso do solo.

De maneira complementar, o quarto capítulo integrou os resultados estruturais, bioeconômicos e ambientais ao analisar a distribuição espacial do estoque de carbono acima do solo em florestas ripárias de Barcarena. Por meio da combinação de modelos estatísticos e de aprendizado de máquina, neste capítulo avaliou-se a relação entre os estoques de carbono, variáveis topográficas e a presença de espécies com potencial bioeconômico, além de avaliar padrões espaciais e sua associação com o uso e cobertura do solo.

## Objetivos

---

### ***Objetivo geral***

- Avaliar os fatores que influenciam a variabilidade dos estoques de carbono e o potencial bioeconômico em florestas ripárias.

### ***Objetivos específicos***

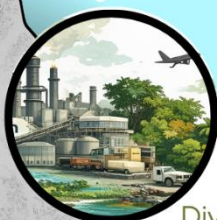
- Sintetizar a literatura científica de artigos sobre florestas ripárias e investigar se a produção científica está associada a variáveis socioeconômicas e ambientais em diferentes países
- Avaliar a estrutura, a diversidade e a composição florística das florestas ripárias associadas ao rio Murucupi, à baía do rio Marajó e ao rio Barcarena, na Amazônia oriental
- Avaliar o potencial de uso de espécies arbóreas nativas presentes em florestas ripárias associadas aos principais rios do polo industrial de Barcarena, e os fatores ambientais que influenciam a distribuição destas em florestas ripárias
- Avaliar a distribuição espacial do estoque de carbono acima do solo associado a espécies com potencial bioeconômico em florestas ripárias no município de Barcarena

ESTOQUES DE CARBONO EM FLORESTAS RIPÁRIAS: SÍNTESE DA  
PRODUÇÃO CIENTÍFICA GLOBAL E AVALIAÇÕES LOCAIS NA AMAZÔNIA



## CAPÍTULO I

Avaliação global da produção científica  
sobre carbono em florestas ripárias



## CAPÍTULO II

Diversidade e estrutura de florestas  
riparias em polo industrial



## CAPÍTULO III

Potencial bioeconômico em florestas  
riparias antropizadas



## CAPÍTULO IV

Distribuição geoespacial do carbono em  
florestas ripárias de Barcarena

## Referências

- CHAVE, J.; RÉJOU-MÉCHAIN, M.; BÚRQUEZ, A.; CHIDUMAYO, E.; COLGAN, M.S.; DELITTI, W.B.C.; DUQUE, A.; EID, T.; FEARNSIDE, P.M.; GOODMAN, R.C.; HENRY, M.; MARTÍNEZ-YRÍZAR, A.; MUGASHA, W.A.; MULLER-LANDAU, H.C.; MENCUCCINI, M.; NELSON, B.W.; NGOMANDA, A.; NOGUEIRA, E.M.; ORTIZ-MALAVASSI, E.; PÉLISSIER, R.; PLOTON, P.; RYAN, C.M.; SALDARRIAGA, J.G.; VIEILLEDENT, G. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Glob. Chang. Biol.**, v. 20, p. 3177–3190, 2014. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- COELHO-FERREIRA, M. Medicinal knowledge and plant utilization in an Amazonian coastal community of Marudá, Pará State (Brazil). **J. Ethnopharmacol**, v. 126, p. 159–175, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2009.07.016>
- D’ADAMO, I.; MORONE, P.; HUISINGH, D. Bioenergy: A Sustainable Shift. **Energies**, v. 14, p. 5661, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14185661>
- DINCA, L., MURARIU, G., LUPOAE, M. Understanding the Ecosystem Services of Riparian Forests: Patterns, Gaps, and Global Trends. **Forests**, v. 16, p. 947, 2025. <https://doi.org/10.3390/f16060947>
- DUSHIN, A. V.; IVANOV, A.N.; IGNATYEVA, M.N.; YURAK, V. V. Economic evaluation of environmental impact of mining: ecosystem approach. **Eurasian Min**, p. 30–36, 2020. <https://doi.org/10.17580/em.2020.01.06>
- MATLABA, V.J.; MANESCHY, M.C.; SANTOS, J.F.; MOTA, J.A. Socioeconomic dynamics of a mining town in Amazon: a case study from Canaã dos Carajás, Brazil. **Miner. Econ.** v. 32, p. 75–90, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13563-018-0159-6>
- ROSENFELD, T.; POKORNY, B.; MARCOVITCH, J.; POSCHEN, P. Bioeconomy based on non-timber forest products for development and forest conservation - untapped potential or false hope? A systematic review for the Brazilian amazon. **For. Policy Econ.** v. 163, p. 103228, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2024.103228>
- SANDE, M.T. VAN DER, ARETS, E.J.M.M.; PEÑA-CLAROS, M.; HOOSBEEK, M.R.; CÁCERES-SIANI, Y.; VAN DER HOUT, P.; POORTER, L. Soil fertility and species traits, but not diversity, drive productivity and biomass stocks in a Guyanese

130 tropical rainforest. **Funct. Ecol.** v. 32, p. 461–474, 2018. <https://doi.org/10.1111/1365->  
131 2435.12968

132 SILVA, S.F., HAZEU, M.T. O complexo industrial-portuário em Barcarena e a saúde de  
133 comunidades tradicionais na Amazônia brasileira. **O Soc. em questão**, v. 21, p. 171–194,  
134 2019.

135 STEPHENSON, P.J.; DAMERELL, A. Bioeconomy and Circular Economy Approaches  
136 Need to Enhance the Focus on Biodiversity to Achieve Sustainability. **Sustainability**, v.  
137 14, p. 10643, 2022. <https://doi.org/10.3390/su141710643>

138 NOWACKI, D.J., OGSTON, A.S., NITTROUER, C.A., FRICKE, A.T., ASP, N.E.,  
139 SOUZA FILHO, P.W.M. Seasonal, tidal, and geomorphic controls on sediment export to  
140 Amazon River tidal floodplains. *Earth Surf. Process.* **Landforms**, v.44, p. 1846–1859,  
141 2019. <https://doi.org/10.1002/esp.4616>

142 WEGNER, R.C.; FERNANDES, M.P. Expansion of Investments by Chinese Companies  
143 in the Brazilian Amazon – the Case of Agribusiness. **Context. Int.**, v. 45, 2023  
144 <https://doi.org/10.1590/s0102-8529.20234503e20220010>

145 ZHENG, J.; WANG, L.; LI, C. Trends and Hotspots in Riparian Restoration Research: A  
146 Global Bibliometric Analysis during 1990–2022. **Forests**, v. 14, p. 2205, 2023.  
147 <https://doi.org/10.3390/f14112205>  
148

## Capítulo I

### O RISCO DE DESASTRES NATURAIS SUPERA FATORES SOCIOECONÔMICOS NA PRODUÇÃO CIENTÍFICA SOBRE CARBONO EM FLORESTAS RIPÁRIAS

Disaster risk from extreme natural events influences scientific production on riparian forest carbon more than socioeconomic variables

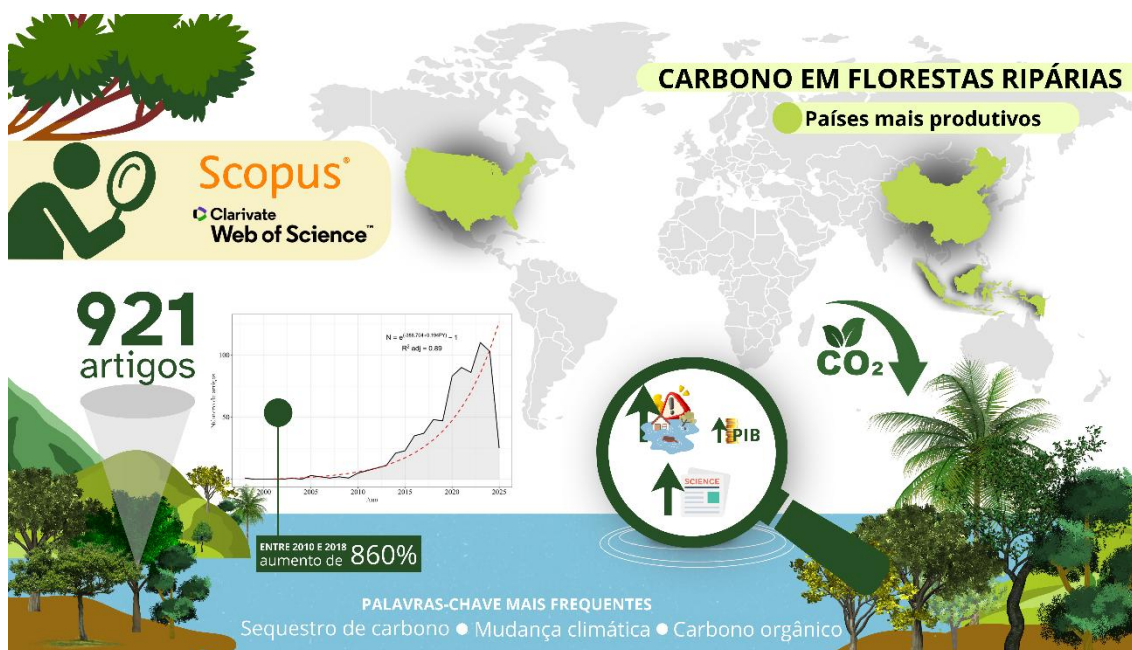
Publicado na revista Environmental Management\*

<https://doi.org/10.1007/s00267-026-02408-1>

Métricas da revista: Qualis A2, percentil Scopus 84%

\* A formatação de citação e referências deste artigo segue as normas da revista

#### Resumo gráfico



#### Resumo

Florestas ripárias são ecossistemas-chave para a mitigação dos efeitos adversos das mudanças climáticas, devido ao amplo potencial de sequestro e armazenamento de carbono. Porém apesar de sua importância ecológica, os fatores que influenciam a dinâmica da produção científica sobre o estoque de carbono nesses ecossistemas ainda são pouco compreendidos. Este estudo realizou uma análise bibliométrica de publicações indexadas na base Scopus e Web of Science, com o objetivo de identificar padrões temporais, distribuição geográfica, redes de colaboração e fatores socioeconômicos

associados à produção científica sobre o tema. Utilizou-se métodos descritivos, análise de rede de coautoria e um modelo de regressão binomial negativa para investigar o efeito de variáveis socioeconômicas (Produto Interno Bruto - PIB per capita, expectativa de vida, taxa de alfabetização, crescimento das emissões de gases de efeito estufa e risco de desastres causados por eventos naturais extremos) na produção científica global sobre carbono. No total, 921 estudos foram catalogados, e os países com o maior número de publicação foram Estados Unidos ( $n = 92$ ), a Indonésia ( $n = 85$ ) e a China ( $n = 82$ ). Os Estados Unidos lideraram a colaboração entre países. Observou-se um efeito positivo significativo do risco de desastres no número de publicações ( $\beta = -0,0524$ ;  $p < 0,001$ ), indicando que uma maior exposição a eventos naturais extremos está associada ao aumento da pesquisa sobre carbono em florestas ripárias. O PIB também apresentou uma associação estatisticamente significativa com a produção científica, embora com um efeito fraco, refletindo seu papel como fator de capacidade estrutural e não como fator determinante. As outras variáveis socioeconômicas não foram estatisticamente significativas. Portanto, a produção científica parece ser regida por um mecanismo duplo, combinando a capacidade estrutural da pesquisa, representada pelo PIB, e a pressão ambiental contextual, representada pelo risco de desastres.

**Palavras-chave:** mudança climática; bibliometria; variáveis socioeconômicas; redes colaborativas.

## Introdução

A crise climática global e a intensificação da degradação dos ecossistemas têm reforçado a urgência de estratégias eficazes para a conservação, mitigação e restauração ambiental. Entre os ecossistemas de maior relevância para a sustentabilidade, destacam-se as florestas ripárias, que consistem em faixas de vegetação natural adjacentes a cursos d'água, atuando como zonas de transição entre ambientes terrestres e aquáticos (Verdonschot and Verdonschot, 2023). Estes ecossistemas apresentam capacidade de prestar múltiplos serviços ecossistêmicos, incluindo regulação hídrica, proteção da biodiversidade e estabilidade geomorfológica (Dinca et al., 2025). Além desses serviços, as florestas ripárias caracterizam-se como ecossistemas-chave para a mitigação da mudança do clima, pois apresentam altas taxas de produtividade e, consequentemente, ampla capacidade de estocar carbono, podendo acumular entre 88 e 202 Mg C ha<sup>-1</sup> na biomassa aérea de florestas tropicais (Elarayan et al., 2015; Pasion et al., 2021), e até 489,16 Mg C ha<sup>-1</sup> no carbono orgânico do solo de florestas ripárias temperadas (Ofosu et

al., 2022). Adicionalmente, os solos ripários frequentemente se caracterizam pelo elevado conteúdo de matéria orgânica, resultado da constante deposição de serapilheira e devido à oxidação dos solos úmidos (Liu et al., 2024).

Apesar da importância ecológica das florestas ripárias, nas últimas décadas a expansão de atividades antrópicas como a agricultura intensiva, a mineração e a urbanização desorganizada têm resultado na conversão, fragmentação e degradação acelerada das zonas ripárias em todo o mundo, ocasionando perdas significativas no estoque de carbono (Lima et al., 2022; Rojas-Castillo et al., 2024). Florestas ripárias mais antigas estocam quatro vezes mais carbono do que florestas mais jovens (Giese et al., 2003), e sua conversão em monocultivos resultaram na redução de 14% do carbono estocado no solo, como observado na Indonésia (Hennings et al., 2021). Diante desse cenário, políticas públicas e programas de restauração florestal têm buscado integrar as florestas ripárias como infraestrutura verde essencial para a resiliência climática e a segurança hídrica (Shah and Race, 2024).

Contudo, a capacidade dos países de gerar conhecimento científico que apoie tais políticas e esforços de restauração não é uniforme e está fortemente condicionada por contextos socioeconômicos e ambientais mais amplos (Jack et al., 2021). As diferenças nacionais em recursos econômicos, desenvolvimento humano, nível educacional, pressão ambiental e exposição a riscos relacionados ao clima podem influenciar a infraestrutura de pesquisa, a disponibilidade de financiamento e as prioridades científicas (Ebi et al., 2016). Nesse sentido, variáveis como Produto Interno Bruto (PIB), expectativa de vida, taxas de alfabetização, crescimento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e o risco de desastres naturais causados por eventos extremos podem moldar tanto o volume quanto o foco da produção científica sobre questões ambientais, incluindo a pesquisa em florestas ripárias (Adams et al., 2016; Lemarié and Marette, 2022).

Estudos anteriores que sintetizaram informações sobre estoques de carbono priorizaram fatores intraecossistemas que influenciam na estocagem, como barreiras físicas (Sutfin et al., 2016). Todavia, ainda é importante compreender como o conhecimento científico sobre o carbono em florestas ripárias se desenvolveu em diferentes países e regiões, visto que há um entendimento limitado de como fatores socioeconômicos e riscos ambientais podem influenciar a produção global de conhecimento sobre florestas ripárias e seu papel na mitigação das mudanças climáticas. Nesse contexto, examinar os padrões globais de produção científica sobre carbono em florestas ripárias pode embasar políticas públicas baseadas em evidências e orientar

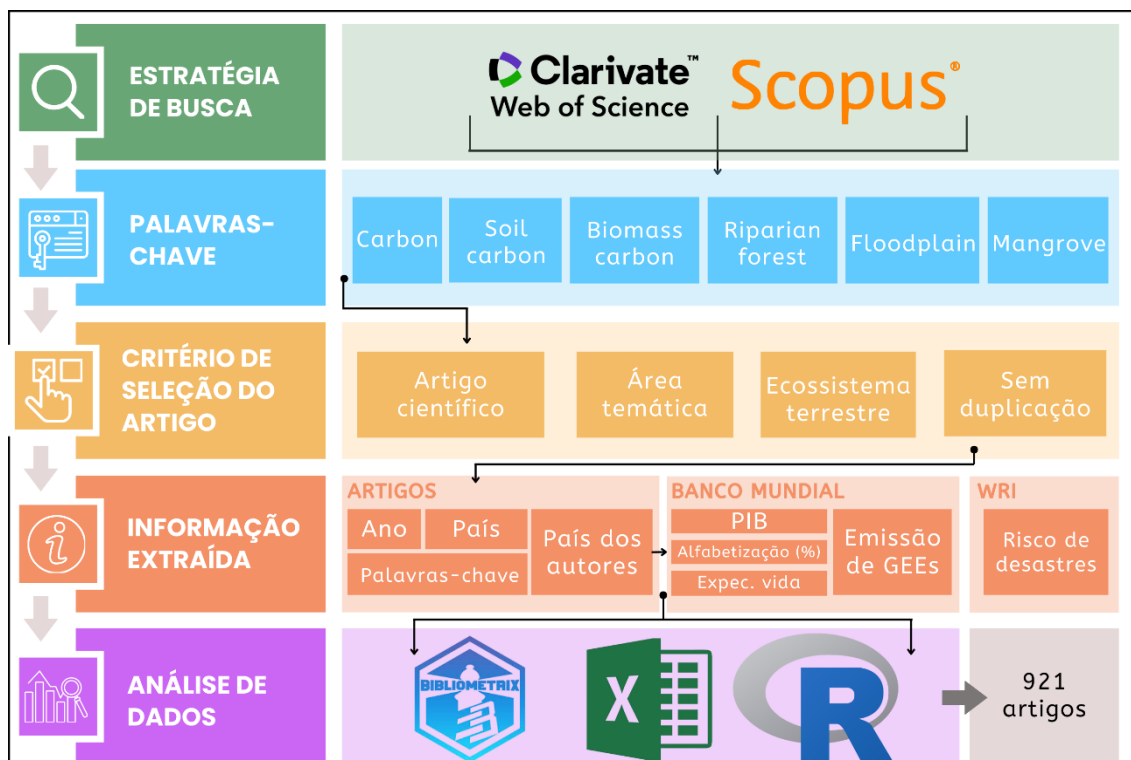
investimentos mais eficazes em conservação. Portanto, este estudo examinou como fatores externos, particularmente variáveis socioeconômicas, estão associados à produção científica relacionada a florestas ripárias, contribuindo para uma compreensão mais clara das diferenças na produção de conhecimento e na capacidade de resposta ambiental entre os países.

Diante desse contexto, a revisão bibliométrica configura-se como uma ferramenta estratégica para mapear padrões de produção científica, identificar lacunas de conhecimento e analisar a evolução das colaborações internacionais, das abordagens metodológicas e dos temas emergentes no campo (Ellili, 2023; Maretti et al., 2019; Martins et al., 2020). Assim, este estudo teve como objetivo sintetizar a literatura científica de artigos sobre florestas ripárias e investigar se a produção científica está associada a variáveis socioeconômicas e ambientais dos países. Especificamente, buscou-se: a) identificar as tendências temporais de publicações, principais países, autores e temas de pesquisa relacionados às florestas ripárias; b) mapear redes de colaboração internacional e c) analisar possíveis associações entre variáveis socioeconômicas e ambiental influenciam a produção científica sobre florestas ripárias.

## **Métodos**

### ***Estratégia de busca e seleção dos estudos***

Foram realizadas buscas nas bases Scopus e Web of Science utilizando uma pesquisa sistemática por palavras-chave ("carbon" OR "soil carbon" OR "biomass carbon" AND "riparian forest" OR "floodplain" OR "mangrove"), as quais poderiam estar contidas no título, resumo ou palavras-chave. Para ser incluídos na pesquisa, os arquivos deveriam seguir quatro critérios: a) ser artigo científico; b) estar classificado em áreas temáticas relacionadas às ciências florestais, ciências agrárias, meio ambiente e/ou similares; c) ser desenvolvido em ecossistema terrestre, excluindo estudos que abordassem apenas o carbono na água ou em fauna; e d) não ser documento duplicado (Figura 1).



**Figura 1.** Procedimentos para seleção e coleta de informações da produção científica sobre o estoque de carbono em florestas ripárias, bem como os indicadores socioeconômicos dos países em que o artigo foi publicado. Expec. vida (expectativa de vida), GEEs (gases de efeito estufa), WRI (World Risk Index), e PIB (Produto Interno Bruto)

Os termos relacionados ao ecossistema “riparian forest”, “floodplain” e “mangrove” foram utilizados para abranger os principais tipos de floresta que ocorrem ao longo de gradientes fluviais e de maré, garantindo uma ampla cobertura dos ambientes ripários investigados na literatura. Palavras-chave relacionadas ao carbono (“carbon”, “soil carbon” e “biomass carbon”) foram incluídas porque os estoques e a dinâmica do carbono representam um dos temas de pesquisa mais recorrentes e integradores em estudos de florestas ripárias, fortemente ligados ao funcionamento do ecossistema, à regulação climática e às mudanças no uso da terra. A inclusão de áreas temáticas como ciências florestais, ciências agrárias e ciências ambientais reflete o foco ecológico e científico da pesquisa em florestas ripárias, por meio de estudos sobre estrutura da vegetação, dinâmica do ecossistema, ciclagem de nutrientes e processos ambientais, destacando a integração interdisciplinar de perspectivas ecológicas e biogeoquímicas no estudo de florestas ripárias.

Com o objetivo de capturar toda a série histórica da produção científica sobre estoque de carbono em florestas ripárias, não foram aplicados filtros de idioma nem restrições quanto ao ano de publicação. Assim, foram considerados todos os artigos disponíveis até fevereiro de 2025, data em que as buscas foram realizadas. Para restringir os resultados apenas a artigos científicos e garantir a pertinência temática, foram utilizados os filtros de tipo de documento (artigos) e de área do conhecimento disponibilizados pelas próprias plataformas de busca (ciências florestais, ciências agrícolas, ciências ambientais ou áreas correlatas).

A triagem foi realizada em duas etapas: I) leitura do título e resumo; II) leitura integral do texto completo. A leitura completa dos textos foi realizada apenas para os estudos que atenderam aos critérios de inclusão durante a primeira etapa de triagem. Ambas foram feitas por um único avaliador para evitar subjetividade. Para o controle de duplicações entre as bases, foi criado para cada artigo um código de identificação único, composto pelas seis primeiras letras do título, pelas três primeiras letras do país de realização da pesquisa e pelo ano de publicação. Com base nesse código, realizou-se uma verificação preliminar de duplicidade. Posteriormente, os artigos foram organizados em ordem cronológica crescente, permitindo identificar casos em que um mesmo trabalho havia sido publicado mais de uma vez, em anos diferentes. Nesses casos, manteve-se apenas a versão mais antiga, considerando que essa é a pesquisa original.

### ***Extração e padronização dos dados***

Dos artigos científicos selecionados foram extraídas as seguintes informações: ano de publicação, país de realização do estudo (quando indicado), uma lista de palavras-chave de cada artigo e das afiliações institucionais dos autores. Nos casos em que os estudos foram conduzidos em mais de um país, cada país foi registrado separadamente e o artigo foi contabilizado uma vez para cada país envolvido, de forma a refletir adequadamente os esforços de pesquisa multinacionais. Utilizou-se as afiliações institucionais dos autores, uma vez que representam o endereço institucional informado no momento da realização da pesquisa e da submissão do manuscrito, em conformidade com as diretrizes da revista. Assim, o país associado a cada afiliação institucional foi considerado o local formal de onde a atividade de pesquisa foi realizada e foi empregado como um indicador para identificar e caracterizar a colaboração científica internacional.

Os dados sobre o risco de desastres decorrentes de eventos naturais extremos foram obtidos do Índice Mundial de Risco de Inundações de 2025

(<https://weltrisikobericht.de/worldriskreport/>). Essa variável foi escolhida porque as inundações estão intrinsecamente ligadas à dinâmica das florestas ripárias, e eventos extremos podem prejudicar substancialmente a provisão de serviços ecossistêmicos nesses sistemas. Além disso, as inundações estão entre os desastres naturais mais frequentes e impactantes em todo o mundo (Frege et al., 2025). Além disso, informações sobre produto interno bruto per capita (PIB), expectativa de vida, taxa de alfabetização e crescimento das emissões de gases de efeito estufa de cada país, correspondentes a série temporal 1960-2023, foram obtidos por meio do pacote WDI (Arel-Bundock, 2025) do software R (R Development Core Team, 2025), o qual compila dados do Banco Mundial (<https://www.worldbank.org/ext/en/home>).

O período de 1960 a 2023 corresponde à cobertura temporal completa disponível para esses indicadores no banco de dados do Banco Mundial e não foi restrito ao período de publicação dos estudos identificados, permitindo uma avaliação abrangente das trajetórias socioeconômicas e ambientais de longo prazo. A expectativa de vida e a taxa de alfabetização foram incluídas como indicadores socioeconômicos complementares que representam o desenvolvimento humano geral, o nível educacional e a capacidade institucional, os quais podem influenciar indiretamente a infraestrutura nacional de pesquisa, o investimento científico e a produção de conhecimento (Wigley and Akkoyunlu-Wigley, 2006). O PIB reflete a capacidade econômica agregada de um país, que está mais diretamente relacionada ao potencial de investimento em infraestrutura de pesquisa, à disponibilidade de financiamento e à produção científica nacional, enquanto o crescimento das emissões de GEE representa o contexto ambiental e climático potencialmente associado às prioridades de pesquisa e à produção científica.

### *Análise de dados*

A produção científica ao longo do tempo foi analisada por meio da contagem anual de publicações, enquanto para a produção por país utilizou-se o número total de publicações. As palavras-chave foram compiladas e padronizadas, e suas frequências foram calculadas em todos os artigos selecionados. As palavras-chave mais frequentes foram então visualizadas usando uma nuvem de palavras-chave, destacando tanto os 70 termos mais frequentes quanto as 15 palavras-chave mais utilizadas durante o período do estudo. A colaboração internacional foi avaliada com base nas afiliações institucionais dos autores, registradas em cada artigo, permitindo a criação de uma matriz de coocorrência entre países por meio do pacote igraph (Csárdi et al., 2025) e a plotagem

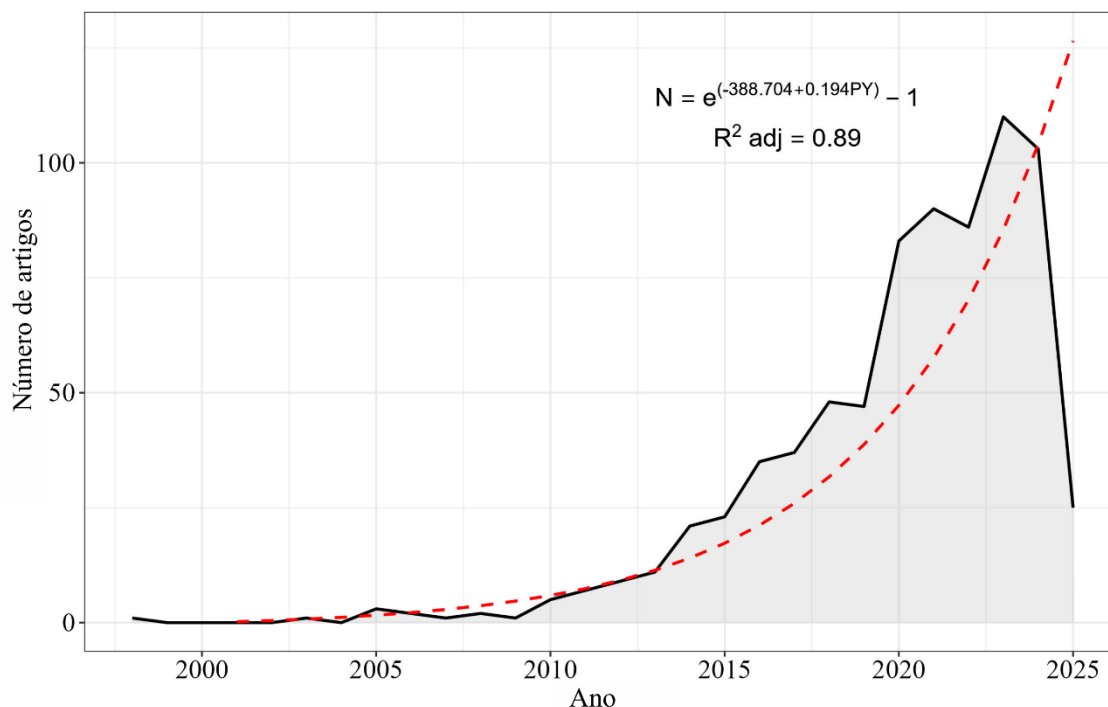
gráfica através do pacote ggraph (Pedersen, 2024). Além disso, com o objetivo de investigar possíveis determinantes socioeconômicos da produção científica, ajustou-se um modelo linear generalizado (GLM), em que a variável dependente foi o número de publicações por país, e as variáveis explicativas foram PIB, expectativa de vida, taxa de alfabetização, crescimento das emissões de gases de efeito estufa, e risco de desastres ambientais causados por eventos naturais extremos.

Para a escolha da melhor distribuição, inicialmente ajustou-se um modelo com distribuição Poisson, porém constatou-se elevada superdispersão ( $>15$ ). Como tentativa de correção, foi testado um modelo quasi-Poisson, que ajusta automaticamente a dispersão, mas os resultados indicaram persistência do overdispersion ( $> 37$ ). Sendo assim, optou-se pelo ajuste de um modelo de regressão binomial negativa por meio do pacote MASS (Venables and Ripley, 2002). O modelo binomial negativo foi validado por meio da simulação de resíduos, realizada usando a função simulateResiduals do pacote DHARMA (Hartig, 2024). O diagnóstico do modelo incluiu testes de dispersão e uniformidade dos resíduos simulados com base no teste de Kolmogorov-Smirnov, bem como a inspeção visual dos resíduos plotados em função dos valores ajustados para avaliar a presença de estrutura sistemática (por exemplo, tendências ou heterocedasticidade). Os efeitos marginais das variáveis explicativas sobre a contagem de publicações foram interpretados usando razões de taxas de incidência (coeficientes exponenciados).

## **Resultados**

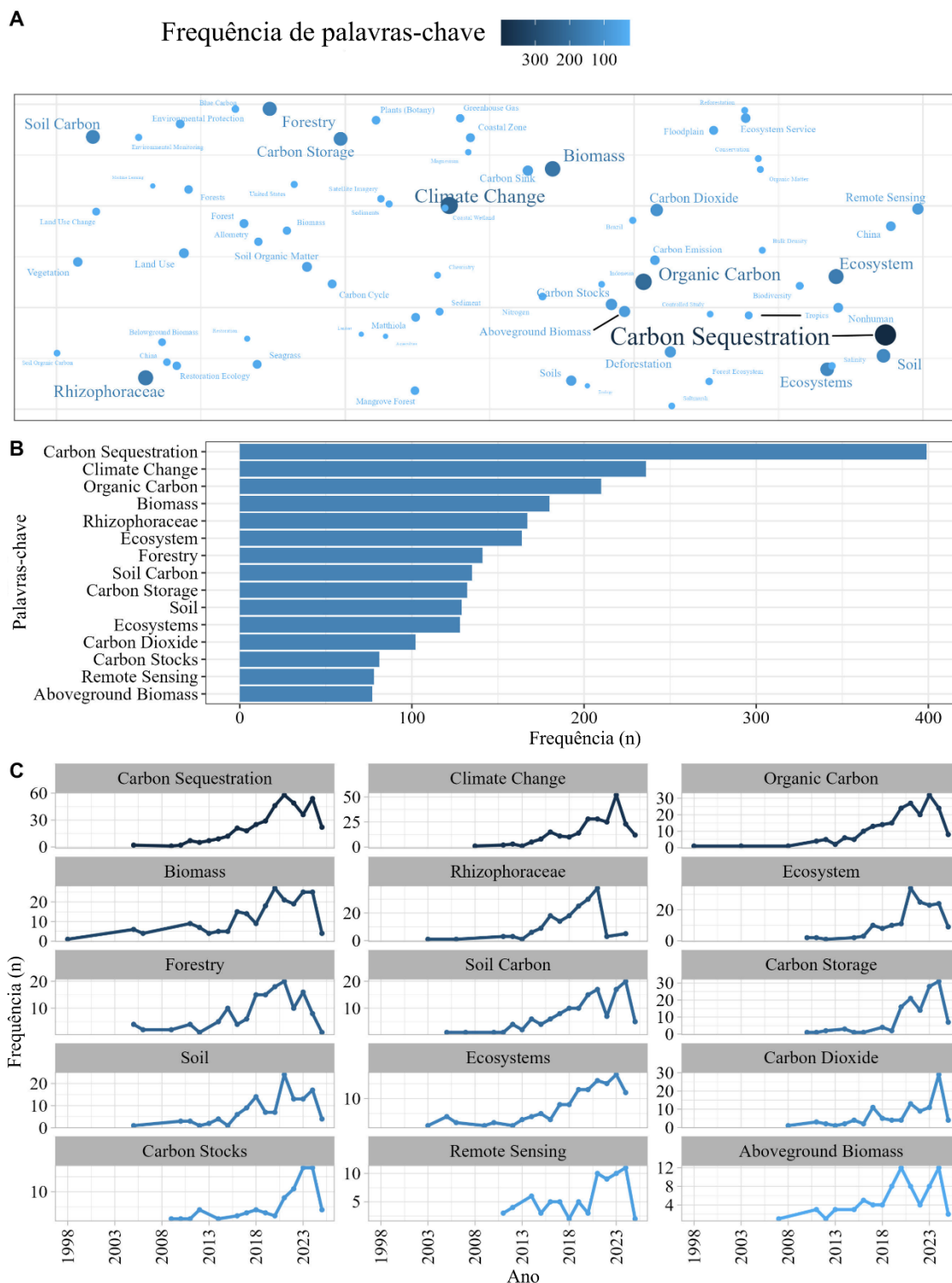
Foram encontrados um total de 3.162 artigos científicos, mas após os critérios de exclusão, 921 artigos científicos sobre estoque de carbono em florestas ripárias na base Scopus foram compilados, sendo que a primeira produção ocorreu no ano de 1998. Entre 1998 e 2009, o número anual de publicações variou entre 0 e 3 artigos, totalizando apenas 11 publicações em 12 anos (Figura 2). A partir de 2010, iniciou-se uma trajetória de crescimento, com 196 artigos publicados entre 2010 e 2018, resultando em um aumento de 860% no número de publicações. Em 2019, houve uma leve redução de 2,1%, com 47 artigos publicados. Em 2020, no entanto, o número quase dobrou em relação ao ano anterior, com 83 publicações. Nos anos seguintes, o número manteve-se elevado, onde foram registrados 90 artigos em 2021, 86 em 2022 (redução de 4,4%) e o maior número da série histórica em 2023, com 110 publicações. Em 2024, houve uma leve redução de

388 6,4%, totalizando 103 publicações. Para 2025, considerando apenas os meses de janeiro  
389 e fevereiro, já foram identificados 25 artigos (Figura 2).



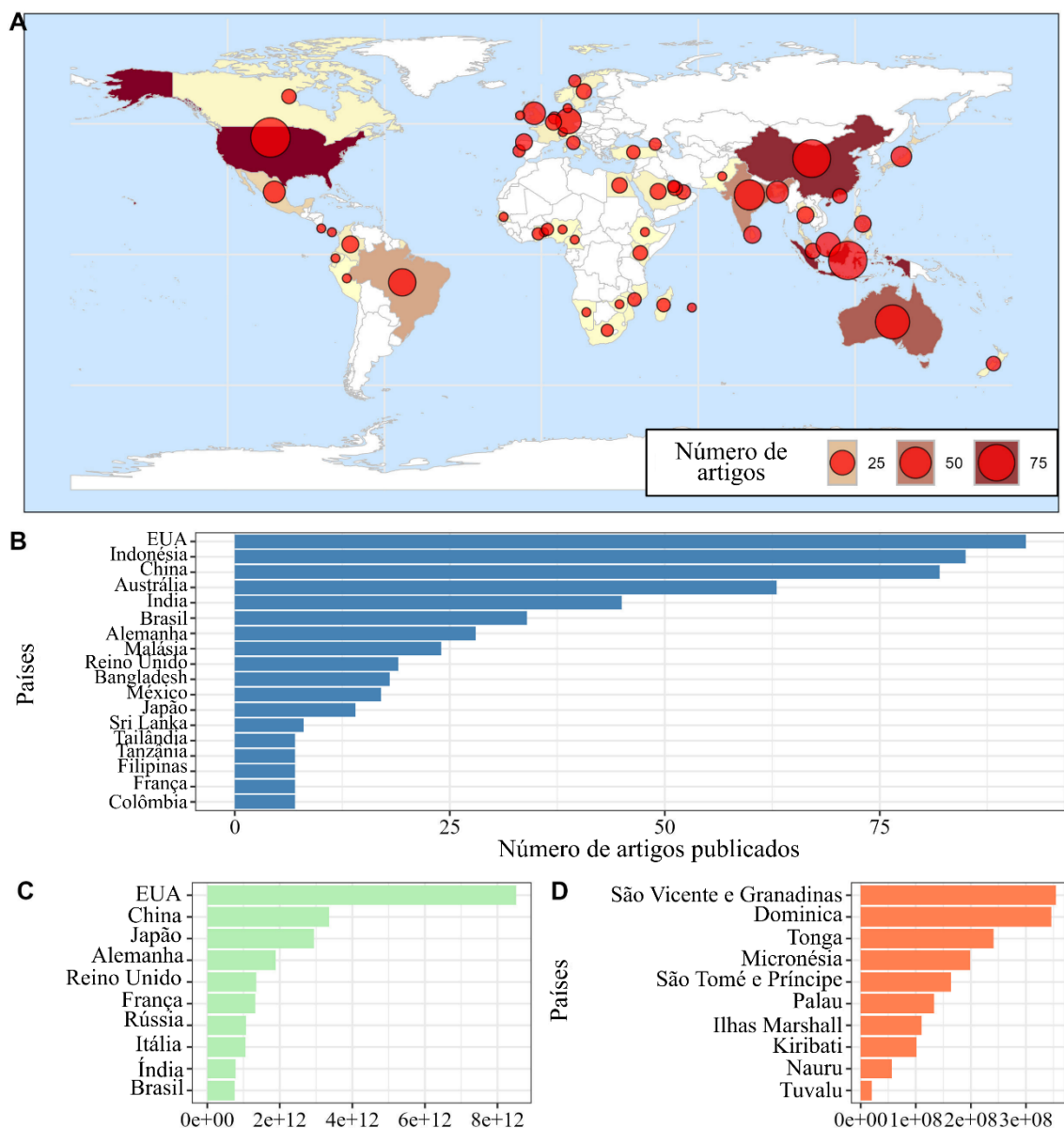
390  
391 **Figura 2.** Crescimento exponencial do número de artigos publicados globalmente sobre  
392 estoque de carbono em florestas ripárias. Os dados incluem todos os artigos disponíveis  
393 até fevereiro de 2025

394 As palavras-chave “carbon sequestration” (n = 399), “climate change” (n = 236)  
395 e “organic carbon” (n = 210) foram as mais frequentes nos artigos. Também se destacaram  
396 “biomass” (n = 180), “Rhizophoraceae” (n = 167), “forestry” (n = 141), “soil carbon” (n  
397 = 135, 8ª), “carbon storage” (n = 132), “soil” (n = 129) e “carbon dioxide” (n = 102). A  
398 palavra-chave “remote sensing” apareceu como a 14ª mais frequente (n = 78) (Figura 3B),  
399 e a primeira ocorrência foi em 2011 (Figura 3C).



**Figura 3.** Nuvem de palavras-chave contendo as 70 mais frequentes (A) e 15 palavra-chave mais utilizadas (B) com as respectivas tendências temporais (C) nos artigos científicos publicados globalmente sobre o estoque de carbono em florestas ripárias ao longo dos anos. Em A, o tamanho e a cor dos círculos significam a frequência de produção por palavra-chave

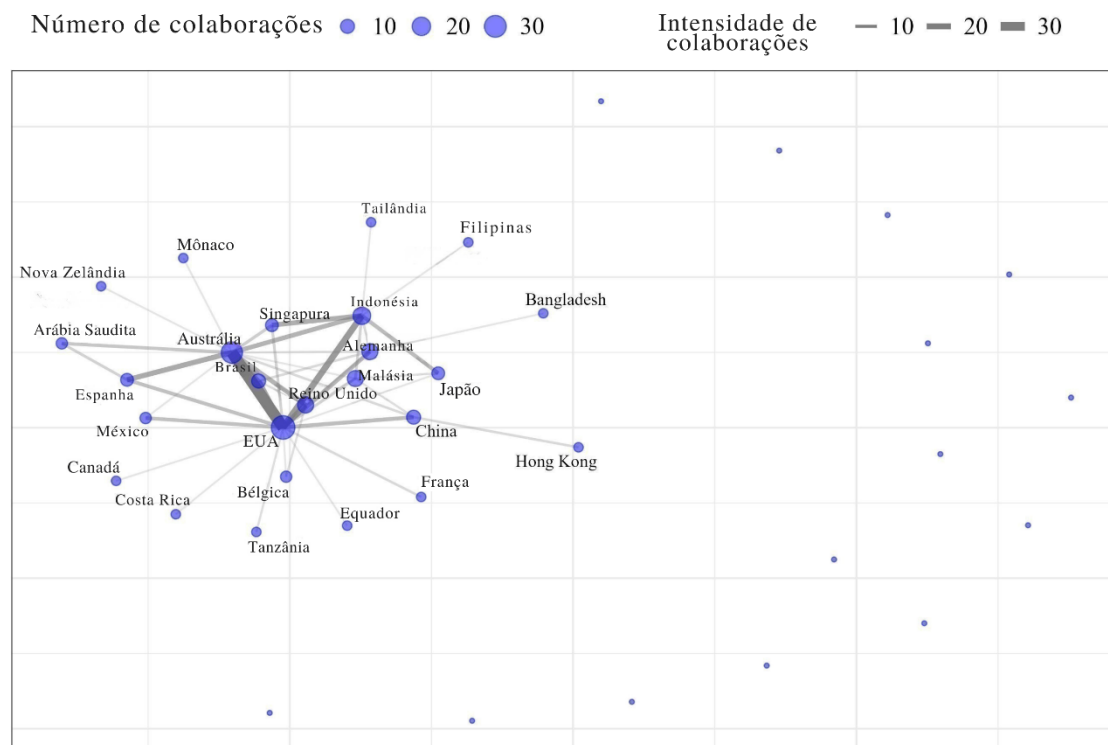
Os 921 artigos foram publicados em 61 países, sendo que Estados Unidos foi o país com o maior número de artigos incluídos ( $n = 92$ ), seguido de Indonésia e a China, com 85 e 82 artigos, respectivamente. Outros países com contribuições significativas foram Austrália ( $n = 63$ ), Índia ( $n = 45$ ) e Brasil ( $n = 34$ ) (Figura 4a-b). Além destes, Alemanha, Malásia, Reino Unido e Bangladesh também estavam entre os dez países com o maior número de publicações sobre o assunto (Figura 4b). No geral, os países classificados como parte do Sul Global foram responsáveis pela maioria das publicações ( $n = 667$ ), enquanto o Norte Global contribuiu com 254 artigos. Dos 10 países com o maior PIB médio entre 1960 e 2023, apenas dois (Reino Unido e Itália) não estavam entre os 15 mais produtivos em pesquisa sobre carbono em florestas ripárias (Figura 4c). Nenhum dos países mais produtivos estava entre os dez com o menor PIB do mundo (Figura 4d).



**Figura 4.** Distribuição do número de artigos científicos publicados globalmente sobre estoque de carbono em florestas ripárias (a), ranking dos dez países que mais publicaram sobre o estoque de carbono em florestas ripárias (b) e ranking dos países com maiores (c) e menores (d) PIBs médios per capita da série histórica 1960-2023

Os Estados Unidos lideraram em número de colaborações, com 471 interações, seguidos por Austrália (n = 331), Indonésia (n = 272), Reino Unido (n = 209), Alemanha (n = 184), China (n = 182) e Brasil (n = 153). Quando observados os pares com maior frequência de colaboração entre países (Figura 5), o par com maior número de colaborações ocorre entre os Estados Unidos e Austrália (n = 76). Em seguida, destacam-

se as colaborações entre Estados Unidos e Indonésia, com 21 publicações em ambas as direções, e entre Estados Unidos e Reino Unido, com 19 publicações recíprocas. O Brasil também apresenta forte parceria com os Estados Unidos, contabilizando 18 publicações conjuntas em cada sentido. Além disso, a cooperação entre Austrália e Espanha soma 17 publicações bilateralmente (Figura 5).



**Figura 5.** Colaboração entre países de acordo com a instituição de origem dos autores que publicaram sobre o estoque de carbono em florestas ripárias para países com mais de cinco colaborações. O tamanho dos pontos indica o número de colaborações, e a largura da linha representa a intensidade de colaboração.

O risco de desastres decorrentes de eventos naturais extremos e o PIB estiveram associados a mudanças no número esperado de artigos publicados, enquanto a expectativa de vida e a taxa de alfabetização não foram significativas (Tabela 1). O PIB apresentou uma relação positiva e estatisticamente significativa com a produção científica, embora a taxa de incidência relativa (TIR) tenha sido igual a 1,00. O risco de desastres decorrentes de eventos naturais extremos apresentou um forte efeito positivo ( $TIR = 1,0538$ ), indicando que cada aumento de uma unidade no risco de desastres está associado a um aumento aproximado de 5,4% no número esperado de publicações. Isto sugere que países mais expostos a riscos relacionados ao clima tendem a investir mais em pesquisas sobre

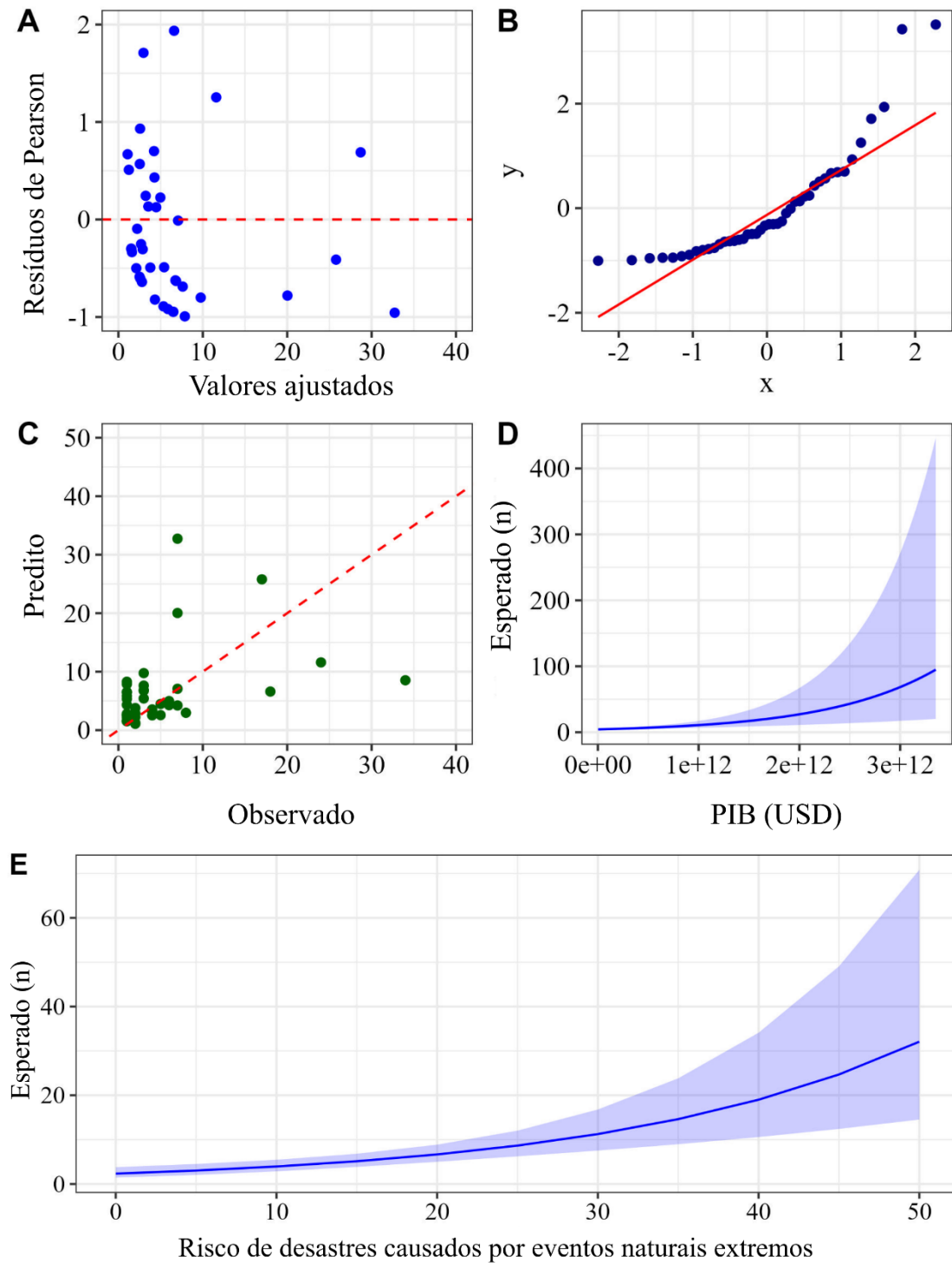
florestas ripárias e dinâmica do carbono. Em contrapartida, a expectativa de vida e a taxa de alfabetização não apresentaram relação significativa com a produção científica.

**Tabela 1.** Resultados do modelo de regressão binomial negativa para prever o número de artigos publicados globalmente sobre estoque de carbono em florestas ripárias com base em variáveis socioeconômicas e ambientais.

|                                    | Coef. Est.           | TIR    | Erro padrão          | t-valor | Pr(> t )                  |
|------------------------------------|----------------------|--------|----------------------|---------|---------------------------|
| Intercepto                         | -0,4998              | 0,6067 | 1,3080               | -0,382  | 0,7023                    |
| PIB (US\$ 1.00)                    | 9,24e <sup>-13</sup> | 1,0000 | 2,50e <sup>-13</sup> | 3,689   | 0,0002(***)               |
| Expectativa de vida (anos)         | -0,00039             | 0,9996 | 0,0325               | -0,012  | 0,9903                    |
| Taxa de alfabetização (%)          | 0,0131               | 1,0132 | 0,0161               | 0,813   | 0,4162                    |
| Crescimento em emissões de GEE (%) | 0,6350               | 1,8870 | 0,3779               | 1,680   | 0,0929                    |
| Risco de desastres naturais        | 0,0524               | 1,0538 | 0,0115               | 4,522   | 6,11e <sup>-6</sup> (***) |

Nota: Coef. Est. = coeficientes estimados; TIR = Taxa de Incidência Relativa; t-valor = valores do teste t; Pr(>|t|)= valores de significância; \*= significância estatística ao nível de 5%.

O modelo linear generalizado (GLM) binomial negativo apresentou um ajuste geral adequado, sem nenhuma estrutura sistemática evidente (por exemplo, tendências ou curvatura) nos diagnósticos residuais (Figura 6A), embora pequenos desvios tenham sido observados nos extremos da distribuição dos resíduos simulados (Figura 6B). A relação entre os valores observados e previstos indicou boa capacidade preditiva do modelo, com uma tendência a subestimar valores observados mais altos (Figura 6C). O efeito marginal do PIB e do risco de desastres apresentou uma relação positiva significativa com a contagem esperada de artigos (Figura 6D-E).



**Figura 6.** Resumo gráfico do ajuste do modelo linear generalizado, mostrando: (A) resíduos versus valores ajustados; (B) gráfico Q-Q dos resíduos; (C) relação entre valores observados e previstos; (D) efeito marginal do PIB; e (E) risco de desastres decorrentes de eventos naturais extremos sobre o número esperado de publicações.

## **Discussão**

Florestas ripárias são ecossistemas estratégicos para a conservação da biodiversidade, proteção dos recursos hídricos e regulação climática, devido a capacidade de estocar carbono. Apesar disso, ainda são subestimadas em políticas públicas e pouco representadas em inventários nacionais de carbono, destacando a necessidade de compreender a distribuição da produção científica, para que se possa embasar ações de conservação e restauração mais eficazes. Nesse contexto, este estudo forneceu uma análise abrangente da tendência temporal de 921 artigos publicados ao longo de 27 anos, relacionando-a com a distribuição geográfica e determinantes socioeconômicos da produção científica sobre o estoque de carbono em florestas ripárias.

Observou-se que desde a assinatura do Acordo de Paris em 2015, o número de publicações aumentou de 23 em 2015 para 110 em 2023, o que representa um crescimento de aproximadamente 378,26%. Nessa perspectiva, acordos como o de Paris (2015), o protocolo de Kyoto (2005) e o acordo de Copenhagen (2009) provocaram mudanças na produção científica ao longo do tempo (Fu and Waltman, 2021), uma vez que criaram demandas e levantaram lacunas no conhecimento que precisam ser preenchidas para basear políticas públicas de mitigação e adaptação climática, apontando também a necessidade de cooperação global (Ourbak and Tubiana, 2017), o que incentivou o alinhamento da pesquisa científica de diversos países às resoluções e objetivos da ONU (Fuentes et al., 2023). Portanto, o aumento da produção científica sobre o tema não pode ser dissociado de marcos globais da governança climática como os sucessivos relatórios do IPCC que destacaram o papel dos ecossistemas ripários como sumidouros de carbono (Mudhee et al., 2025), destacando-se também o papel dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, principalmente dos ODS 14 e 6, os quais tratam da conservação da vida aquática e de ecossistemas relacionados a água (UN, 2015).

Somado a isso, o crescimento da produção científica ao longo dos anos e o aparecimento da palavra-chave “Remote sensing” dentre as mais utilizadas pode estar associado ao desenvolvimento de tecnologias de sensoriamento remoto, como LiDAR e imagens de alta resolução, que eliminou barreiras físicas, permitindo mapear esses ecossistemas fragmentados de forma eficiente e economicamente viável (Bossy et al., 2025). O sensoriamento remoto, aliado a ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica, facilitaram a classificação e o monitoramento dos ecossistemas ripários juntando imagens aéreas e de satélite (Iglseder et al., 2023), viabilizando a identificação de padrões de mudança de uso e cobertura da terra que podem fragilizar essas áreas

(Sarmiento et al., 2025), bem como permitem acessar a saúde dos ecossistemas ripários (Pace et al., 2022).

O uso recorrente das palavras-chave “carbon sequestration” e “climate change” reflete o reconhecimento das florestas ripárias como ecossistemas relevantes para o estudo das mudanças climáticas e relações de dinâmica e estoque de carbono. Consequentemente, afirma a necessidade da incorporação crescente do carbono florestal em políticas nacionais de mitigação, programas de pagamento por serviços ambientais e instrumentos como REDD+. Políticas de crédito de carbono tem aumentado vertiginosamente, com incentivos ao setor privado e público para o lançamento de alternativas inovadoras, em busca de retirar o carbono da atmosfera, bem como retê-lo na vegetação remanescente e/ou em crescimento, sobretudo nas ripárias que são consideradas sensíveis, mas que também crescem em ritmo acelerado quando comparado a outros ecossistemas (Song et al., 2024).

Neste contexto, esperava-se que os países com PIB mais elevado liderassem a pesquisa sobre esses tópicos, uma vez que a renda per capita é comumente associada à capacidade científica nacional e à produção de pesquisa (Jack et al., 2021). No entanto, a distribuição geográfica da produção científica e os resultados do GLM revelam paradoxos quando comparados aos indicadores econômicos convencionais. Isso pode refletir assimetrias globais na produção científica, além de uma maior dependência dos serviços ecossistêmicos ripários em países de baixa renda. Evidências indicam que, apesar de sofrerem impactos climáticos desproporcionalmente negativos, os países de baixa renda são sub-representados na pesquisa sobre serviços ecossistêmicos, que permanece concentrada em regiões de alta renda (Delos et al., 2025). Consequentemente, o interesse científico em serviços ecossistêmicos ripários pode ser moldado não apenas pela dependência local, mas também por fatores estruturais, como capacidade de pesquisa, disponibilidade de financiamento e contexto geográfico, incluindo o tamanho do país e a extensão dos principais sistemas fluviais.

Em contrapartida, a importância do risco de desastres decorrentes de eventos naturais extremos observada neste estudo destaca o papel da vulnerabilidade ambiental como um fator adicional e independente que impulsiona a atenção científica. Este estudo sugere que países expostos a maior risco de desastres tendem a priorizar pesquisas sobre ecossistemas que fornecem serviços de regulação, como florestas ripárias, que desempenham um papel fundamental na mitigação de inundações, no controle da erosão e na estabilização do carbono. Neste estudo, sete dos 15 países com maior produção

científica sobre o tema também estão entre os 15 países com maior risco de desastres ambientais, segundo Frege et al. (2025): Filipinas (1º); Índia (2º); Indonésia (3º); Colômbia (4º); México (5º); China (9º) e Bangladesh (11º). Esses resultados sugerem que a produção científica não é função exclusiva da riqueza econômica, mas também é influenciada pela exposição a riscos climáticos que geram demandas urgentes por conhecimento aplicado, monitoramento e estratégias de adaptação.

As secas no Pantanal brasileiro em 2020 (Marengo et al., 2021; Thielen et al., 2020) e as inundações catastróficas no Paquistão em 2022 (Chen et al., 2024a; Chen et al., 2024b) demonstraram como perturbações hidrológicas podem liberar décadas de carbono estocado em algumas semanas. Além disso, países com menor PIB tendem a abrigar uma proporção maior das florestas remanescentes (López-Carr, 2021), embora os países de renda mais alta sejam frequentemente associados a maiores emissões de CO<sub>2</sub> devido ao crescimento econômico de longo prazo e à demanda por energia, particularmente onde o crescimento depende de fontes de energia não renováveis (Topa, 2024). A importância combinada do PIB, do índice de risco de desastres e da distribuição global da produção científica (Norte e Sul) revela que a liderança científica é mantida pela capacidade econômica do país, enquanto a priorização da pesquisa é amplificada em regiões que enfrentam maior risco climático. No caso dos Estados Unidos, a liderança era previsível dada sua capacidade técnica consolidada e posição central nas redes de colaboração (471 interações), assim como a China. Ademais, a análise da rede de colaborações revelou a centralidade dos países do Norte Global, evidenciando a persistência de uma divisão global do conhecimento e a dependência científica, onde instituições do Norte Global detêm o capital simbólico para validar pesquisas.

No entanto, a proeminência de países como Indonésia (2º lugar) e Bangladesh (9º lugar), os quais apresentam PIB per capita intermediário, mas alta vulnerabilidade climática (Gan et al., 2021; Jerin et al., 2023), sugere que as pesquisas estão menos vinculadas a recursos financeiros domésticos e mais a pressões ambientais imediatas, e fluxos de cooperação internacional orientados por interesses geopolíticos. A relação entre vulnerabilidade climática e prioridade de pesquisa tem sido destacada em estudos que apontam que regiões mais suscetíveis a eventos climáticos extremos tendem a investir mais em conhecimento aplicado à adaptação local e gestão de serviços ecossistêmicos essenciais (Adger, 2006; Barua et al., 2020; Huber and Murray, 2024). A Indonésia, por exemplo, tornou-se foco de investimentos bilionários da Noruega via REDD+ após identificar suas turfeiras ripárias como fontes críticas de emissões, demonstrando como

crises ecológicas locais se transformam em oportunidades científicas mediante financiamento externo (Firdaus and Arkananta, 2024). Além destes, a presença do Brasil entre os principais parceiros reflete a crescente internacionalização da ciência ambiental no Sul Global, ainda que limitada, havendo instabilidades de financiamento e fragilidades institucionais, especialmente reveladas pela baixa valorização da pesquisa científica (Mutinhima et al., 2025).

A ausência de efeitos significativos na taxa de alfabetização e na expectativa de vida sugere que os indicadores gerais de desenvolvimento social não se traduzem diretamente em aumento da produção científica sobre tópicos ambientais especializados. Embora essas variáveis sejam comumente associadas ao capital humano e ao bem-estar geral, elas podem operar indiretamente por meio de trajetórias educacionais e institucionais de longo prazo não capturadas na escala da contagem de publicações (Uddin et al., 2023). Da mesma forma, o efeito não significativo da taxa de crescimento das emissões de gases de efeito estufa indica que as trajetórias de emissão por si só são insuficientes para estimular pesquisas direcionadas ao carbono em florestas ripárias, particularmente quando as emissões são impulsionadas por setores não relacionados à mudança no uso da terra, como energia e indústria. Portanto, os resultados reforçam a interpretação de que a produção científica nessa área é mais fortemente influenciada pela capacidade estrutural de pesquisa e pelo risco ambiental imediato do que por indicadores demográficos ou de crescimento de emissões amplos.

De uma perspectiva contextual mais ampla, as estruturas políticas nacionais podem ajudar a criar condições favoráveis para a valoração do carbono e iniciativas de conservação. No Brasil, programas federais como o Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas para Consolidação de uma Economia de Baixo Carbono na Agricultura (Plano ABC) e sua versão atualizada (ABC+) apoiam os produtores rurais na recuperação de áreas degradadas, na integração de sistemas agropecuários e na conservação de matas ciliares (Brasil, 2009). Estratégias complementares, incluindo o Programa Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais e o Programa Floresta+, promovem ainda mais a conservação e a restauração por meio de incentivos financeiros (Brasil, 2021). Além disso, a legislação brasileira, notadamente o Código Florestal, determina a manutenção de Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Reservas Legais, fornecendo um marco institucional para a proteção de matas ciliares (Brasil, 2012).

De maneira complementar, mercados voluntários de crédito de carbono vêm se fortalecendo no país como alternativa para atrair investimentos privados em projetos de restauração e manejo sustentável, fortalecendo uma nova vertente da bioeconomia (Araujo et al., 2024). Como benefícios, essa estratégia pode criar oportunidades para que governos, empresas e comunidades atuem de forma integrada, transformando a conservação em uma atividade que gera renda e benefícios concretos para quem vive do campo e depende dos recursos naturais (Stephenson and Damerell, 2022). Neste contexto, o papel de atores intermediários, como agências de fomento internacionais, organizações não governamentais e universidades com forte atuação em redes transnacionais, torna-se indispensável e deve ser valorizado para garantir o avanço de estudos sobre o carbono nos ecossistemas ripários.

## **Conclusão**

Nas últimas duas décadas, a produção científica cresceu significativamente, coincidindo com os avanços tecnológicos e políticas ambientais globais, como o REDD+ e os mercados de carbono. No entanto, os resultados deste estudo indicaram que os indicadores econômicos tradicionais geralmente apresentam baixo poder explicativo para a produção científica. Apesar disso, o PIB per capita emergiu como um preditor estatisticamente significativo, embora seu efeito tenha sido baixo. A associação significativa com o risco de desastres decorrentes de eventos naturais extremos revelou que a vulnerabilidade ambiental é um fator determinante da produção científica, destacando que o esforço de pesquisa também é moldado pela exposição a riscos relacionados ao clima e pela sensibilidade dos ecossistemas. Portanto, a produção científica parece ser regida por um mecanismo duplo, combinando a capacidade estrutural de pesquisa, representada pelo PIB, e a pressão ambiental contextual, representada pelo risco de desastres. Isso ressalta a importância de fortalecer a infraestrutura científica e a capacidade de pesquisa em países emergentes e vulneráveis, além de fomentar a cooperação científica internacional para suprir as lacunas de conhecimento globais.

## **Referências**

- Adams, C., Rodrigues, S.T., Calmon, M., Kumar, C., 2016. Impacts of large-scale forest restoration on socioeconomic status and local livelihoods: what we know and do not know. *Biotropica* 48, 731–744. <https://doi.org/10.1111/btp.12385>
- Adger, W.N., 2006. Vulnerability. *Glob. Environ. Chang.* 16, 268–281.

- 643 <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>
- 644 Araujo, E.C.G., Silva, T.C., da Cunha Neto, E.M., Favarin, J.A.S., da Silva Gomes, J.K.,  
645 das Chagas, K.P.T., Fiorelli, E.C., Sonsin, A.F., Maia, E., 2024. Bioeconomy in the  
646 Amazon: Lessons and gaps from thirty years of non-timber forest products research.  
647 J. Environ. Manage. 370, 122420. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122420>
- 648 Arel-Bundock, V., 2025. WDI: World Development Indicators and Other World Bank  
649 Data.
- 650 Barua, S.K., Boscolo, M., Animon, I., 2020. Valuing forest-based ecosystem services in  
651 Bangladesh: Implications for research and policies. Ecosyst. Serv. 42, 101069.  
652 <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101069>
- 653 Bossy, T., Ciais, P., Renaudineau, S., Wan, L., Ygorra, B., Adam, E., Barbier, N., Bauters,  
654 M., Delbart, N., Frappart, F., Gara, T.W., Hamunyela, E., Ifo, S.A., Jaffrain, G.,  
655 Maisongrande, P., Mugabowindekwe, M., Mugiraneza, T., Normandin, C., Obame,  
656 C.V., Peaucelle, M., Pinet, C., Ploton, P., Sagang, L.B., Schwartz, M., Sollier, V.,  
657 Sonké, B., Tresson, P., De Truchis, A., Vo Quang, A., Wigneron, J.-P., 2025. State  
658 of the art in remote sensing monitoring of carbon dynamics in African tropical  
659 forests. Front. Remote Sens. 6. <https://doi.org/10.3389/frsen.2025.1532280>
- 660 Brasil, 2021. Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021. Institui a Política Nacional de  
661 Pagamento por Serviços Ambientais; e altera as Leis n os 8.212, de 24 de julho de  
662 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para  
663 adequá-las à nova .
- 664 Brasil, 2012. Lei nº 12.651 de 25 de maio de 2012. Novo Código Florestal Brasileiro.  
665 Brasília - DF.
- 666 Brasil, 2009. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre  
667 Mudança do Clima – PNMC. Brasil.
- 668 Chen, F., Zhang, M., Zhao, H., Guan, W., Yang, A., 2024. Pakistan’s 2022 floods: Spatial  
669 distribution, causes and future trends from Sentinel-1 SAR observations. Remote  
670 Sens. Environ. 304, 114055. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114055>
- 671 Chen, H., Xiong, J., Cui, P., Chen, X., Ge, Y., Fang, C., Zhang, B., Yang, T., Khan, I.,  
672 2024. Causes and dynamic change characteristics of the 2022 devastating floods in  
673 Pakistan. Nat. Hazards 120, 9691–9711. [https://doi.org/10.1007/s11069-024-06582-](https://doi.org/10.1007/s11069-024-06582-5)  
674 5
- 675 Csárdi, G., Tamás, N., Müller, K., Horvát, S., Traag, V., Zanini, F., Noom, D., 2025.  
676 igraph for R: R interface of the igraph library for graph theory and network analysis.

- 677 <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.7682609>
- 678 Delos, M.C., Johnson, C.G., Weiskopf, S.R., Cushing, J.A., 2025. Climate change effects  
679 on ecosystem services: Disentangling drivers of mixed responses. *PLoS One* 20,  
680 e0306017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306017>
- 681 Dinca, L., Murariu, G., Lupoae, M., 2025. Understanding the Ecosystem Services of  
682 Riparian Forests: Patterns, Gaps, and Global Trends. *Forests* 16, 947.  
683 <https://doi.org/10.3390/f16060947>
- 684 Ebi, K.L., Semenza, J.C., Rocklöv, J. O financiamento e as estruturas atuais para pesquisa  
685 médica são insuficientes para abordar os riscos à saúde decorrentes das mudanças  
686 ambientais globais. *Environ Health* 15, 108 (2016).  
687 <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0183-3>
- 688 Elarayan, M.L.C., Celentano, D., Oliveira, E.C., Triana, S.P., Sodré, D.N., Muchavisoy,  
689 K.H.M., Rousseau, G.X., 2015. Impacto da degradação sobre o estoque total de  
690 carbono de florestas ripárias na Amazônia Oriental, Brasil. *Acta Amaz.* 45, 271–  
691 282. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201500432>
- 692 Ellili, N.O.D., 2023. Bibliometric analysis of sustainability papers: Evidence from  
693 Environment, Development and sustainability. *Environ. Dev. Sustain.* 26, 8183–  
694 8209. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03067-6>
- 695 Firdaus, S.U., Arkananta, F.N.S., 2024. Carbon Trading and Its Role in Shaping  
696 Indonesia’s Environmental Resilience to Climate Change. *IOP Conf. Ser. Earth*  
697 *Environ. Sci.* 1362, 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1362/1/012005>
- 698 Frege, I.A., Budelmann, K., Burawkoski, J., Dittmer, C., 2025. World Risk Report 2025.  
699 Bündnis Entwicklung Hilft, Berlin.
- 700 Fu, H.-Z., Waltman, L., 2021. A Large-Scale Bibliometric Analysis of Global Climate  
701 Change Research Between 2001 and 2018. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-759304/v1>
- 702
- 703 Fuentes, M., Cárdenas, J.P., Olivares, G., Rasmussen, E., Salazar, S., Urbina, C., Vidal,  
704 G., Lawler, D., 2023. Global Digital Analysis for Science Diplomacy on Climate  
705 Change and Sustainable Development. *Sustainability* 15, 15747.  
706 <https://doi.org/10.3390/su152215747>
- 707 Gan, C.C.R., Oktari, R.S., Nguyen, H.X., Yuan, L., Yu, X., KC, A., Hanh, T.T.T., Phung,  
708 D.T., Dwirahmadi, F., Liu, T., Musumari, P.M., Kayano, R., Chu, C., 2021. A  
709 scoping review of climate-related disasters in China, Indonesia and Vietnam:  
710 Disasters, health impacts, vulnerable populations and adaptation measures. *Int. J.*

- Disaster Risk Reduct. 66, 102608. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102608>
- Giese, L.A.B., Aust, W.M., Kolka, R.K., Trettin, C.C., 2003. Biomass and carbon pools of disturbed riparian forests. *For. Ecol. Manage.* 180, 493–508. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00644-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00644-8)
- Hartig, F., 2024. DHARMA: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models.
- Hennings, N., Becker, J.N., Guillaume, T., Damris, M., Dippold, M.A., Kuzyakov, Y., 2021. Riparian wetland properties counter the effect of land-use change on soil carbon stocks after rainforest conversion to plantations. *CATENA* 196, 104941. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104941>
- Huber, J., Murray, U., 2024. Turning climate justice into practice? Channeling loss and damage funding through national social protection systems in climate-vulnerable countries. *WIREs Clim. Chang.* 15. <https://doi.org/10.1002/wcc.867>
- Iglseder, A., Immitzer, M., Dostálová, A., Kasper, A., Pfeifer, N., Bauerhansl, C., Schöttl, S., Hollaus, M., 2023. The potential of combining satellite and airborne remote sensing data for habitat classification and monitoring in forest landscapes. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 117, 103131. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103131>
- Jack, P., Lachman, J., López, A., 2021. Scientific knowledge production and economic catching-up: an empirical analysis. *Scientometrics* 126, 4565–4587. <https://doi.org/10.1007/s11192-021-03973-4>
- Jerin, T., Azad, M.A.K., Khan, M.N., 2023. Climate change-triggered vulnerability assessment of the flood-prone communities in Bangladesh: A gender perspective. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 95, 103851. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103851>
- Lemarié, S., Marette, S., 2022. The socio-economic factors affecting the emergence and impacts of new genomic techniques in agriculture: A scoping review. *Trends Food Sci. Technol.* 129, 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.07.013>
- Lima, M., Firmino, V.C., de Paiva, C.K.S., Juen, L., Brasil, L.S., 2022. Land use changes disrupt streams and affect the functional feeding groups of aquatic insects in the Amazon. *J. Insect Conserv.* 26, 137–148. <https://doi.org/10.1007/s10841-022-00375-6>
- Liu, F., Wang, Z., Liu, J., Latif, J., Qin, J., Yang, H., Jiang, W., Deng, Y., Yang, K., Ni, Z., Ding, Y., Xie, J., Wang, Y., Jia, H., 2024. Seasonal and Spatial Fluctuations of Reactive Oxygen Species in Riparian Soils and Their Contributions on Organic Carbon Mineralization. *Environ. Sci. Technol.* 58, 7066–7077.

- 745 <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c10756>
- 746 López-Carr, D., 2021. A Review of Small Farmer Land Use and Deforestation in Tropical  
747 Forest Frontiers: Implications for Conservation and Sustainable Livelihoods. Land  
748 10, 1113. <https://doi.org/10.3390/land10111113>
- 749 Marengo, J.A., Cunha, A.P., Cuartas, L.A., Deusdará Leal, K.R., Broedel, E., Seluchi,  
750 M.E., Michelin, C.M., De Praga Baião, C.F., Chuchón Angulo, E., Almeida, E.K.,  
751 Kazmierczak, M.L., Mateus, N.P.A., Silva, R.C., Bender, F., 2021. Extreme Drought  
752 in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts.  
753 Front. Water 3. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.639204>
- 754 Maretti, M., Tontodimamma, A., Biermann, P., 2019. Environmental and climate  
755 migrations: an overview of scientific literature using a bibliometric analysis. Int.  
756 Rev. Sociol. 29, 142–158. <https://doi.org/10.1080/03906701.2019.1641270>
- 757 Martins, W.B.R., Lima, M.D.R., Barros, U.O., Amorim, L.S.V.-B., Oliveira, F. de A.,  
758 Schwartz, G., 2020. Ecological methods and indicators for recovering and  
759 monitoring ecosystems after mining: A global literature review. Ecol. Eng. 145,  
760 105707. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105707>
- 761 Mudhee, K.H., Hilal, M.M., Alyami, M., Rendal, E., Algburi, S., Sameen, A.Z.,  
762 Khurramov, A., Abboud, N.G., Barakat, M., 2025. Assessing climate strategies of  
763 major energy corporations and examining projections in relation to Paris Agreement  
764 objectives within the framework of sustainable energy. Unconv. Resour. 5, 100127.  
765 <https://doi.org/10.1016/j.uncre.2024.100127>
- 766 Mutinhima, Y., Sibanda, L., Rono, B.J., Kulunge, S., Kimaili, D., Dickman, A.J.,  
767 Madsen, E., Mandoloma, L., Tacey, J., Allred, S., Hare, D., 2025. International  
768 disparities in conservation priorities are more complicated than Global North–  
769 Global South divisions. Biol. Lett. 21. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2024.0571>
- 770 Ofosu, E., Bazrgar, A., Coleman, B., Deen, B., Gordon, A., Voroney, P., Thevathasan,  
771 N., 2022. Soil organic carbon enhancement in diverse temperate riparian buffer  
772 systems in comparison with adjacent agricultural soils. Agrofor. Syst. 96, 623–636.  
773 <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00691-x>
- 774 Ourbak, T., Tubiana, L., 2017. Changing the game: the Paris Agreement and the role of  
775 scientific communities. Clim. Policy 17, 819–824.  
776 <https://doi.org/10.1080/14693062.2017.1348331>
- 777 Pace, G., Gutiérrez-Cánovas, C., Henriques, R., Carvalho-Santos, C., Cássio, F., Pascoal,  
778 C., 2022. Remote sensing indicators to assess riparian vegetation and river

- 779 ecosystem health. Ecol. Indic. 144, 109519.  
780 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109519>
- 781 Pasion, B.O., Barrias, C.D., Asuncion, M.P., Angadol, A.H., Pabiling, R.R., Pasion, A.,  
782 Braulio, A.A., Baysa, A.M., 2021. Assessing tree diversity and carbon density of a  
783 riparian zone within a protected area in southern Philippines. J. Asia-Pacific  
784 Biodivers. 14, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.japb.2020.10.006>
- 785 Pedersen, T., 2024. ggraph: An Implementation of Grammar of Graphics for Graphs and  
786 Networks.
- 787 R Development Core Team, 2025. R: A Language and Environment for Statistical  
788 Computing. R Foundation for Statistical Computing v. 4.4.3.
- 789 Rojas-Castillo, O.A., Kepfer Rojas, S., Juen, L., Montag, L.F. de A., Carvalho, F.G.,  
790 Mendes, T.P., Chua, K.W.J., Wilkinson, C.L., Amal, M.N.A., Fahmi-Ahmad, M.,  
791 Jacobsen, D., 2024. Meta-analysis contrasting freshwater biodiversity in forests and  
792 oil palm plantations with and without riparian buffers. Conserv. Biol. 38.  
793 <https://doi.org/10.1111/cobi.14172>
- 794 Sarmiento, R., Abella, P., Handayan, S.M., Madelo, J., Mercado, J., Palaso, R., 2025.  
795 Potential impacts of industrial tree plantation encroachment on tree species diversity  
796 and carbon storage in the riparian zones of Andanan Watershed Forest Reserve,  
797 Philippines. One Ecosyst. 10. <https://doi.org/10.3897/oneeco.10.e135722>
- 798 Shah, S., Race, D., 2024. Greening the blue Pacific: Lessons on reducing emissions from  
799 deforestation and forest degradation (REDD+). For. Policy Econ. 166, 103263.  
800 <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2024.103263>
- 801 Song, T., Li, H., Feng, Z., 2024. Policy and market mechanisms for promoting sustainable  
802 energy transition: role of government and private sector. Econ. Chang. Restruct. 57,  
803 153. <https://doi.org/10.1007/s10644-024-09734-6>
- 804 Stephenson, P.J., Damerell, A., 2022. Bioeconomy and Circular Economy Approaches  
805 Need to Enhance the Focus on Biodiversity to Achieve Sustainability. Sustainability  
806 14, 10643. <https://doi.org/10.3390/su141710643>
- 807 Sutfin, N.A., Wohl, E.E., Dwire, K.A., 2016. Banking carbon: a review of organic carbon  
808 storage and physical factors influencing retention in floodplains and riparian  
809 ecosystems. Earth Surf. Process. Landforms 41, 38–60.  
810 <https://doi.org/10.1002/esp.3857>
- 811 Thielen, D., Schuchmann, K.-L., Ramoni-Perazzi, P., Marquez, M., Rojas, W., Quintero,  
812 J.I., Marques, M.I., 2020. Quo vadis Pantanal? Expected precipitation extremes and

- 813 drought dynamics from changing sea surface temperature. PLoS One 15, e0227437.  
814 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227437>
- 815 Topa, R., 2024. Correlation between Economic Growth and Carbon Emissions in the  
816 Context of the Transition to a Zero-Carbon Economy. Proc. Int. Conf. Bus. Excell.  
817 18, 1486–1494. <https://doi.org/10.2478/picbe-2024-0122>
- 818 Uddin, I., Khan, M.A., Tariq, M., Khan, F., Malik, Z.K., 2023. Revisiting the  
819 determinants of life expectancy in Asia—exploring the role of institutional quality,  
820 financial development, and environmental degradation. Environ. Dev. Sustain. 26,  
821 11289–11309. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03283-0>
- 822 UN, U.N., 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development  
823 (General Assembly Resolution 70/1). New York.
- 824 Venables, W.N., Ripley, B.D., 2002. Modern Applied Statistics with S, Fourth. ed.  
825 Springer.
- 826 Verdonschot, P.F.M., Verdonschot, R.C.M., 2023. Ecological Functions and  
827 Management of Large Wood in Fluvial Systems. Curr. For. Reports 10, 39–55.  
828 <https://doi.org/10.1007/s40725-023-00209-x>
- 829 Wigley, S., Akkoyunlu-Wigley, A. 2006. Human Capabilities Versus Human Capital:  
830 Guaging the Value of Education in Developing Countries. Soc Indic Res 78, 287–  
831 304. <https://doi.org/10.1007/s11205-005-0209-7>
- 832

## Capítulo II

### DIVERSIDADE E ESTRUTURA FLORÍSTICA DE FLORESTAS RIPÁRIAS EM POLO INDUSTRIAL E URBANO DA AMAZÔNIA

Diversity and structure of riparian forests in an industrial and urban hub of the Amazon

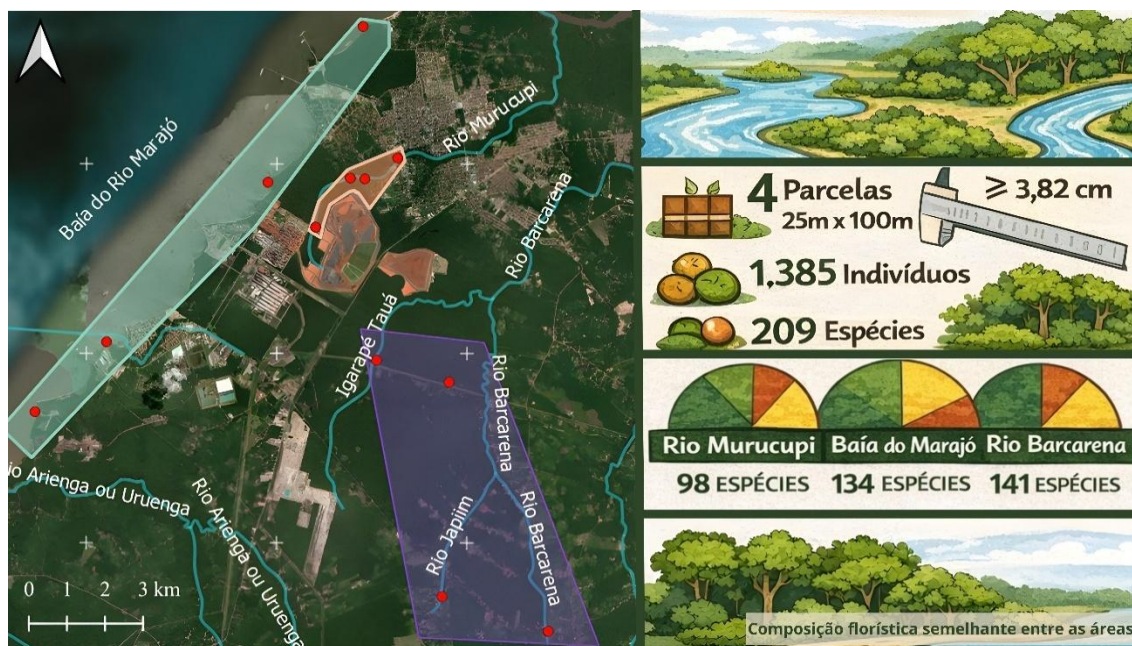
Publicado na revista Environmental, Monitoring and Assessment\*

<https://doi.org/10.1007/s10661-025-14970-y>

Métricas da revista: Qualis A2, percentil Scopus 70%

\* A formatação de citação e referências deste artigo segue as normas da revista

#### Resumo gráfico



#### Resumo

Barcarena destaca-se como um polo industrial da Amazônia Oriental, com diversas atividades, como industriais, adensamento urbano, entre outros, que exercem forte pressão sobre as florestas ripárias. Esses ecossistemas desempenham papel estratégico na provisão de serviços ecossistêmicos, como regulação hídrica e fornecimento de produtos. Assim, compreender a estrutura e a diversidade florística dessas áreas fornece subsídios fundamentais para a gestão ambiental, especialmente em processos de licenciamento e recuperação de áreas degradadas. Por isso, objetivou-se

avaliar a diversidade da vegetação ripária em áreas do complexo industrial na Amazônia Oriental. Para isso, classificou-se as áreas com base na distribuição das formações florestais ripárias ao longo dos três principais sistemas hídricos localizados no município de Barcarena, sendo elas: rio Murucupi, baía do rio Marajó e rio Barcarena. Em cada uma das áreas instalou-se quatro parcelas de 25 m x 100 m (2.500 m<sup>2</sup>) e realizou-se um inventário florístico de todos os indivíduos arbóreos e arbustivos com diâmetro  $\geq 3,82$  cm. Foram inventariados 1.385 indivíduos distribuídos em 53 famílias botânicas e 209 espécies. A área da baía do rio Marajó apresentou densidade de indivíduos menor do que do rio Barcarena. Por meio de curvas de rarefação, observou-se que ao padronizar o número de indivíduos, a riqueza de espécies das florestas do rio Murucupi seria inferior às demais. Apesar disso, constatou-se semelhanças na composição florística entre as áreas. Os resultados indicaram que a conservação de ecossistemas ripários em zonas de múltiplas atividades exige atenção não apenas à estrutura da floresta, mas também à sua integridade ecológica, considerando que mudanças na composição podem anteceder perdas funcionais mais profundas.

**Palavras-chave:** antropização; composição florística; estoque de biomassa; diversidade florística.

## **Introdução**

As florestas ripárias são constituídas de espécies de plantas que crescem em ecossistemas terrestres sob influência fluvial (Zheng et al., 2023) e desempenham funções ecológicas e socioambientais. Nos trópicos, a diversidade de espécies desses ecossistemas garante a renda da população ribeirinha (Sanches et al., 2021), além de desempenhar importância global como sumidouros de carbono, indispensáveis para a mitigação das mudanças climáticas (Sutfin et al., 2016; Verdonschot and Verdonschot, 2023). No entanto, nas últimas décadas, as florestas ripárias vêm sendo alvo de pressões antrópicas decorrentes principalmente da expansão urbana e industrial, da conversão do uso do solo, da construção de infraestruturas e da crescente demanda por recursos naturais (Sharma and Khanal, 2024). Consequentemente, a degradação compromete a estrutura e a composição florística destes ecossistemas, resultando em perdas de funções-chave, como o controle de riscos de erosões e assoreamento de rios, além da menor provisão de alimentos para a fauna aquática (Arantes et al., 2018; Silva et al., 2017).

Na Amazônia, as matas ciliares apresentam padrões ecológicos contrastantes, pois áreas bem conservadas tipicamente mantêm alta diversidade florística e estrutura complexa (Méndez-Toribio et al., 2014), enquanto zonas ripárias degradadas exibem riqueza de espécies reduzida, homogeneização biótica e mudanças em direção a comunidades dominadas por espécies pioneiras (Vallejo et al., 2022). Os impactos documentados incluem declínio na biomassa arbórea, simplificação da estrutura vertical, alteração da dinâmica de regeneração e perda de espécies especialistas (Giese et al., 2003; Maracahipes-Santos et al., 2020; Seidler, 2017).

Em regiões onde há sobreposição de múltiplas atividades humanas, torna-se desafiador isolar os efeitos de uma única fonte de impacto sobre os ecossistemas fluviais e ripários. No contexto amazônico, o município de Barcarena é considerado um polo industrial e dispõe de intensa sobreposição de usos do solo e a proximidade entre áreas industriais, portos e zonas urbanizadas. Historicamente, a região vem sendo objeto de preocupação ambiental em função do adensamento industrial e da vulnerabilidade hídrica, uma vez que as áreas antropizadas abrangem uma extensa rede de drenagem natural, na qual se encontram importantes corredores ecológicos e remanescentes de florestas ripárias, consideradas Áreas de Preservação Permanente pela legislação brasileira (Brasil, 2012).

Embora o Código Florestal Brasileiro (Brasil, 2012) estabeleça normas de proteção, diversos estudos têm demonstrado que o cumprimento e a fiscalização em regiões altamente industrializadas, como Barcarena, permanecem limitados, resultando em desmatamento contínuo, eventos de poluição e ocupação ilegal de áreas ripárias (Lopes et al., 2021). Compreender os padrões ecológicos dessas florestas é, portanto, essencial para orientar estratégias de manejo local e aprimorar a eficácia dos instrumentos regulatórios existentes.

A antropização levanta preocupações sobre a integridade ecológica das margens fluviais, uma vez que a vegetação ripária é altamente sensível à qualidade da água e à dinâmica do solo, tornando-se necessário avaliar se os gradientes de proximidade ao complexo industrial, urbano e de lazer acarreta mudanças estruturais e composicionais nas comunidades vegetais ripárias (Silva et al., 2017). Por isso, abordagens que considerem a hidrografia como unidade de análise são essenciais para o entendimento dos gradientes de perturbação ambiental e suas implicações ecológicas. Neste estudo, optou-se por classificar as áreas de avaliação no município de Barcarena com base nos principais

sistemas fluviais, de forma a refletir mais precisamente os contextos ambientais e os tipos de pressão a que estão submetidas as florestas ripárias locais. Assim, foram selecionadas três unidades hidrográficas com características contrastantes de interferência antrópica: o rio Murucupi, a baía do rio Marajó e o rio Barcarena (Lopes et al., 2021).

O rio Murucupi atravessa regiões densamente ocupadas, com presença de zonas industriais, áreas de disposição de resíduos sólidos e núcleos urbanos, configurando um ambiente de elevada perturbação antrópica. A proximidade com fontes potenciais de poluição e a supressão da vegetação nativa ao longo de seu curso comprometem significativamente as funções ecológicas da floresta ripária. Em contraste, a baía do rio Marajó, embora localizada em área de menor densidade urbana, é fortemente influenciada por múltiplas atividades humanas, como o lançamento contínuo de efluentes tratados por diversos empreendimentos, além de intenso uso recreativo de suas margens, incluindo praias fluviais frequentadas pela população local. Em contraste, o rio Barcarena representa uma área com menor influência antrópica direta, servindo como referência ecológica para comparação dos padrões observados nas demais áreas avaliadas. Apesar de não estar isento de impactos, sua paisagem ripária conserva maior cobertura florestal e menor proximidade com fontes pontuais de contaminação ou supressão vegetal.

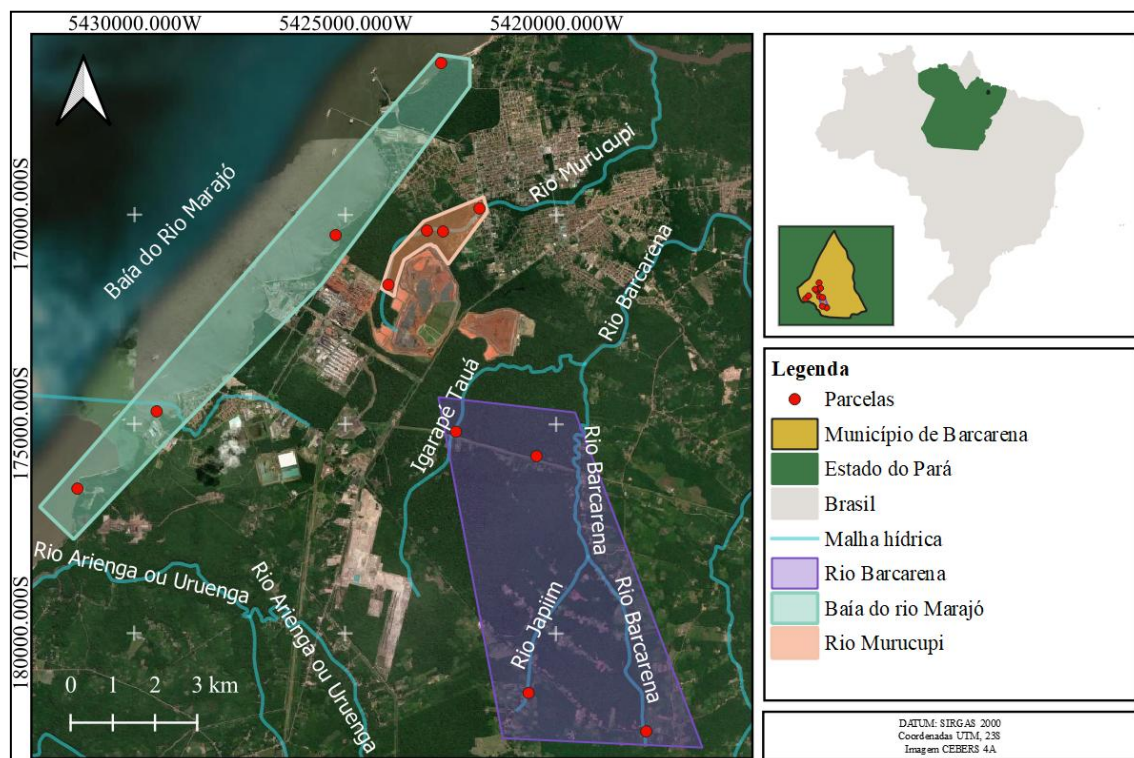
Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a estrutura, a diversidade e a composição florística das florestas ripárias associadas ao rio Murucupi, à baía do rio Marajó e ao rio Barcarena, na Amazônia oriental. Buscou-se responder a seguinte pergunta: os sistemas fluviais da região de Barcarena diferem quanto a estrutura e a composição florística das florestas ripárias? Com a hipótese de que as áreas mais próximas de zonas urbanas, industriais ou portuárias apresentariam efeitos negativos mais acentuados sobre a vegetação.

## **Material e métodos**

### ***Área de estudo***

O estudo foi desenvolvido no município de Barcarena, Pará, Amazônia Oriental (01°30'21" S; 48°37'33" W; Figura 1). Barcarena está situada na região nordeste do estado do Pará, em uma área estratégica para a produção de alumínio devido à sua proximidade com as reservas de bauxita e à infraestrutura portuária, que facilita o escoamento da produção (ANM, 2018). O clima do município é do tipo tropical úmido, de acordo com Köppen (Alvares et al., 2013). Os solos são predominantemente do tipo Latossolos

954 Vermelho-Amarelo distróficos, Espodossolo hidromórfico e Plintossolo  
 955 (RADAMBRASIL, 1974). A vegetação natural é classificada como Floresta Ombrófila  
 956 Densa (IBGE, 2012), porém foi descaracterizada pela ocupação humana, especialmente  
 957 pela expansão industrial e urbana na região (MapBiomias, 2024).



958 **Figura 1.** Pontos amostrais de florestas ripárias localizadas nas áreas de influência de  
 959 diferentes sistemas fluviais no município de Barcarena, Amazônia Oriental, Brasil  
 960

### 961 *Delimitação e classificação das áreas de estudo*

962 A delimitação das áreas de estudo foi realizada com base na distribuição das  
 963 formações florestais ripárias ao longo de três sistemas hídricos localizados no município  
 964 de Barcarena, estado do Pará, Brasil. A escolha desses sistemas fluviais considerou os  
 965 diferentes níveis de interferência antrópica a que estão sujeitos, refletindo distintos  
 966 contextos socioambientais e formas de uso do território. Portanto, a categorização adotada  
 967 visou representar um gradiente de perturbação ambiental, abrangendo desde áreas com  
 968 intensa pressão antrópica até áreas com menor grau de interferência direta. Assim, as  
 969 áreas de estudo foram organizadas em três categorias, correspondentes ao rio Murucupi,  
 970 baía do rio Marajó e rio Barcarena.

971 O rio Murucupi está inserido em uma paisagem altamente antropizada,  
 972 caracterizada pela presença de áreas industriais, centros urbanos densamente ocupados e  
 973 o antigo lixão municipal de Barcarena. O curso do rio percorre zonas periféricas da malha

urbana e regiões adjacentes a polos industriais, sendo potencialmente impactado por múltiplas fontes de poluição difusa e pontual. A supressão da vegetação nativa nas margens, o lançamento de resíduos e a ocupação desordenada contribuem para a degradação da qualidade ambiental do sistema ripário associado. Por essas razões, o rio Murucupi foi classificado como representativo de um cenário de alta interferência antrópica.

A baía do Rio Marajó, situada em uma área de transição entre as zonas urbana e estuarina, sendo influenciada por um conjunto de atividades antrópicas. Entre os principais fatores de pressão destacam-se o lançamento de efluentes tratados por empreendimentos industriais e residenciais, o tráfego de embarcações, as atividades portuárias e o uso recreativo de suas margens, incluindo balneários e praias fluviais. Apesar de não apresentar a concentração de fontes pontuais de impacto verificada no rio Murucupi, a baía do rio Marajó experimenta um tipo de perturbação ambiental persistente, cuja intensidade é modulada pela sazonalidade e pela dinâmica hidrológica do sistema. Em função dessas características, essa área foi classificada como representativa de um cenário de interferência antrópica moderada e difusa.

O rio Barcarena corresponde a uma porção menos urbanizada do município, distante dos principais polos industriais e com menor densidade de ocupação humana em suas margens. As áreas ripárias ao longo do rio Barcarena apresentam maior continuidade de cobertura florestal e menor evidência de intervenção direta, como desmatamento ou lançamento de resíduos. Embora não se configure como uma área totalmente isenta de influência antrópica, o rio Barcarena conserva atributos ecológicos mais próximos de condições naturais, sendo utilizado neste estudo como uma área de referência para a comparação dos efeitos dos diferentes níveis de perturbação observados nas demais categorias.

### ***Coleta de dados***

Foram instaladas sistematicamente 12 parcelas de 25 m x 100 m, sendo quatro em cada uma das áreas de influência hídrica. No interior de cada parcela realizou-se o inventário florístico de todos os indivíduos arbóreos, arbustivos e palmeiras com DAP (Diâmetro a Altura do Peito, coletada a 1,30 da superfície do solo)  $\geq 3,82$  cm. Este limite de DAP (diâmetro à altura do peito) foi adotado para incluir as palmeiras naturalmente esbeltas e outros indivíduos de pequeno diâmetro típicos de florestas ripárias, que seriam

sub-representados usando limiares mais convencionais (por exemplo, 5 a 10 cm). Além da medição do DAP por meio de fitas diamétricas, estimou-se a altura total (Ht) por meio do método bastão de Biltmore. Quando não foi possível fazer a identificação *in situ* das espécies, coletaram-se amostras botânicas padronizadas, as quais foram comparadas com as amostras exemplares do Herbário Felisberto Camargo da Universidade Federal Rural da Amazônia, localizado em Belém, Pará, localizado em Belém, Pará. A biomassa acima do solo (AGB) foi estimada usando a equação alométrica proposta por Chave et al. (2014) (Eq. 1), com dados Neotropicais do Global Wood Density Database (Chave et al. 2009) para a densidade da madeira de cada espécie arbórea e arbustiva. A AGB total foi calculado pela soma da AGB de todos os indivíduos em cada área de influência, que posteriormente foi convertido em megagramas por hectare ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ).

$$AGB = 0,0673 * (\rho D^2 H)^{0,976} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde: AGB = Biomassa acima do solo (kg);  $\rho$  = densidade específica da madeira ( $\text{g cm}^{-3}$ ); D = diâmetro da árvore (cm); H = altura da árvore (m).

### ***Análise de dados***

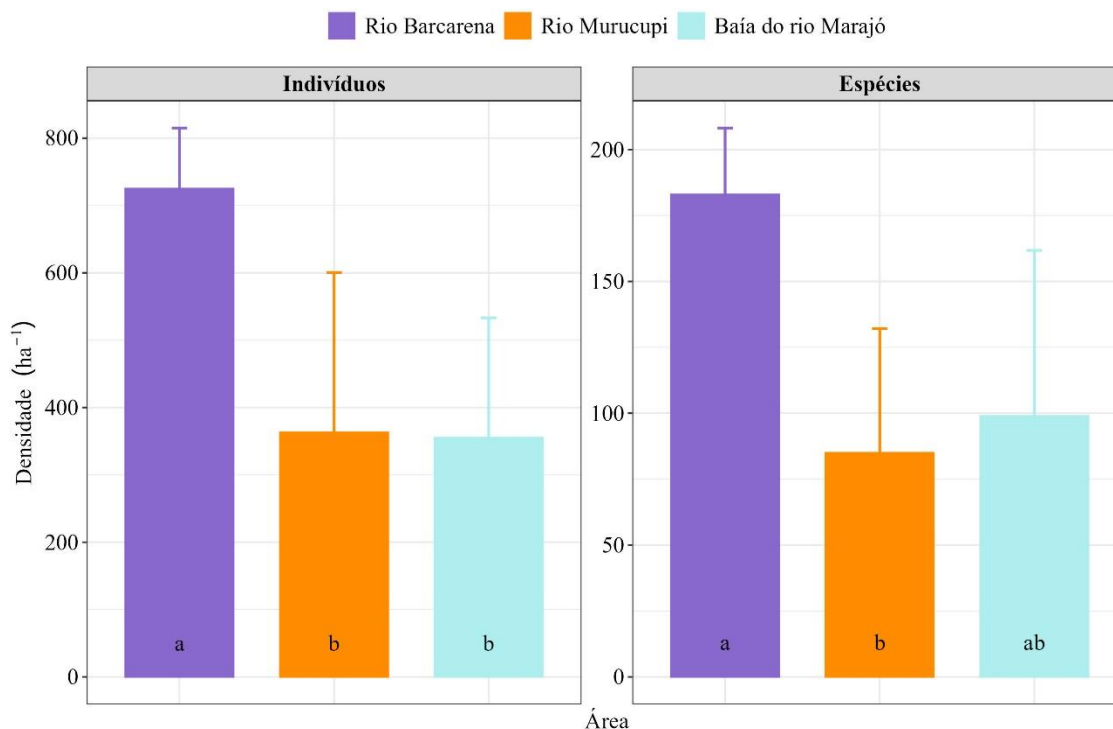
Para o teste de hipóteses, considerou-se um nível de significância de 5% e quatro parcelas em cada área. A semelhança da riqueza de espécies entre as áreas foi avaliada por meio de curvas de rarefação para os indivíduos (*individual-based*) por meio dos números de Hill baseados nas transformações dos índices de Shannon-Weaver e Simpson. As transformações foram propostas por Hill (1973) e visam atribuir pesos às espécies com base na proporção das suas frequências (Shannon-Weaver) ou às espécies mais comuns (Simpson). Para isso, padronizou-se o esforço amostral por número de indivíduos na área amostrada, com auxílio do pacote iNEXT (Chao et al., 2014; Hsieh et al., 2016). Além da riqueza de espécies, avaliou-se a dissimilaridade do padrão florístico-estrutural da vegetação por meio da análise multivariada NMDS (Non-Metric Multidimensional Scaling) com 999 permutações, baseada no índice de Bray-Curtis, sendo que esta análise também foi conduzida a nível de parcela e visualizada através de dendrograma de Cluster. O cálculo do *stress* foi empregado como uma medida de qualidade da representação dos dados no espaço de dimensão reduzida, com ênfase em alcançar um valor baixo ( $\leq 0,2$ ) para indicar uma representação gráfica satisfatória. Além desta, uma análise de agrupamento hierárquico foi realizada a partir de uma matriz de presença e ausência de espécies, utilizando o índice de similaridade de Jaccard. O agrupamento foi visualizado

em um heatmap com dendrogramas, gerado com os pacotes ggplot2 (Wickham, 2016) e factoextra (Kassambara and Mundt, 2020).

Os dados foram verificados quanto à normalidade e a homoscedasticidade de variância pelos testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente, ambos ao nível de 5% de probabilidade de erro. Após atender aos pressupostos, as densidades médias de espécies e indivíduos foram comparadas entre as áreas por meio do teste Tukey ( $p < 0,05$ ) posterior à Análise de Variância significativa ( $p < 0,05$ ). Para a biomassa acima do solo, as premissas de normalidade e homocedasticidade não foram atendidas. Portanto, as diferenças entre as áreas foram avaliadas utilizando um Modelo Linear Generalizado (GLM) com distribuição Gama e função de ligação logarítmica, apropriado para dados contínuos, positivos e com assimetria à direita. Quando o efeito da área foi significativo ( $p < 0,05$ ), comparações pareadas foram realizadas utilizando as médias marginais estimadas com ajuste de Tukey. Todas as análises estatísticas e gráficos foram realizadas utilizando o software R v.4.3.3 (R Development Core Team, 2025).

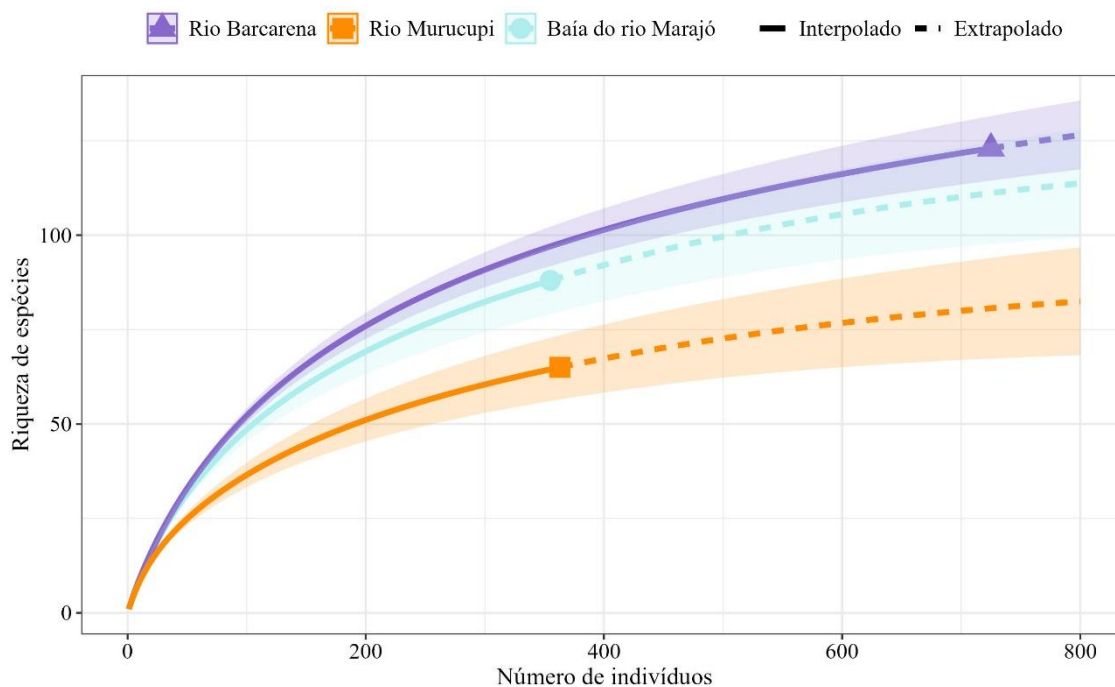
## **Resultados**

Foram inventariados 1385 indivíduos, distribuídos em 53 famílias botânicas e 209 espécies. Fabaceae ( $n = 417$ ), Arecaeae ( $n = 185$ ) e Lecythidaceae ( $n = 104$ ) foram as famílias com o maior número de indivíduos. As famílias com maior riqueza de espécies foram Fabaceae ( $n = 38$ ), Chrysobalanaceae ( $n = 12$ ), e Euphorbiaceae e Lecythidaceae (ambas com nove 9 espécies). A densidade média de indivíduos variou entre  $355,00 \pm 89,94$  ind.  $ha^{-1}$  nas florestas associadas ao rio Murucupi e  $725,00 \pm 89,94$  ind.  $ha^{-1}$  naquelas influenciadas pelo rio Barcarena, respectivamente (Figura 2). Além disso, para esta variável, tanto as florestas do Murucupi quanto as da bacia do rio Marajó apresentaram valores inferiores ao rio Barcarena ( $F_{[2;9]} = 5,58$ ;  $p > 0,05$ ) para a densidade de indivíduos. No caso da densidade de espécies (Figura 2), apenas no Murucupi ( $85,00 \pm 45,15$  sp.  $ha^{-1}$ ) foi inferior ( $F_{[2;9]} = 4,96$ ;  $p = 0,04$ ) ao de Barcarena ( $183,00 \pm 25,17$  sp.  $ha^{-1}$ ).



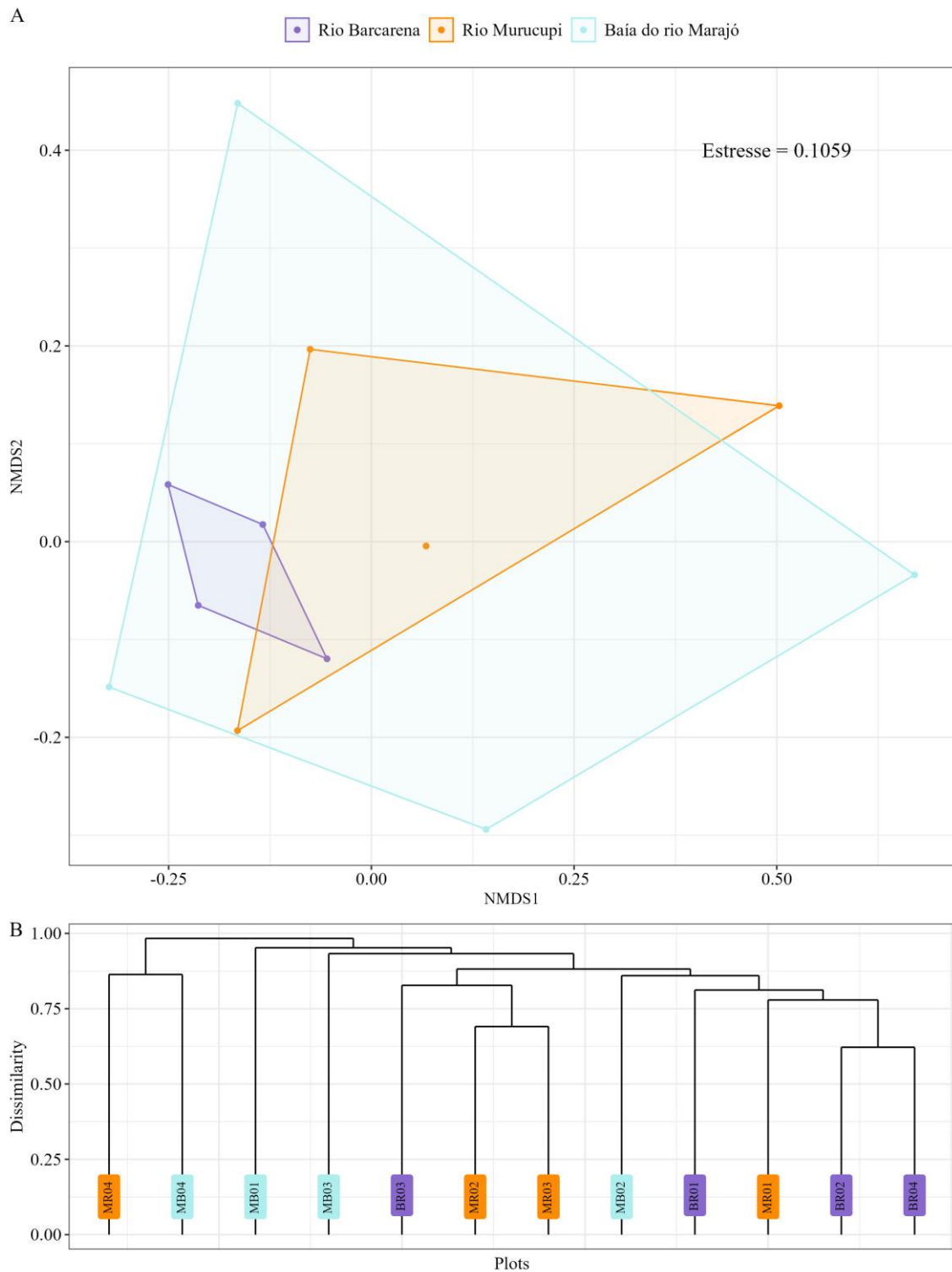
**Figura 2.** Média  $\pm$  desvio padrão da densidade de indivíduos e espécies em florestas ripárias localizadas nas áreas de influência de diferentes sistemas fluviais no município de Barcarena, Amazônia Oriental, Brasil

As curvas de rarefação indicaram que, ao padronizar o número de indivíduos ( $n = 400$ ), a riqueza de espécies das florestas do rio Murucupi (82,46) seria inferior às do rio Barcarena (126,53) e da Baía do rio Marajó (113,73) (Figura 3). A extrapolação até 800 indivíduos mostrou que as florestas do rio Barcarena apresentariam a maior riqueza estimada ( $158,95 \pm 11,89$ ), seguidas pela baía do rio Marajó ( $126,42 \pm 21,79$ ) e, por fim, pelas do rio Murucupi ( $91,11 \pm 13,48$ ). Em relação à diversidade, no rio Barcarena observou-se com os maiores números de Hill baseados em Shannon (71,88) e Simpson (35,28), evidenciando uma comunidade mais diversa e equitativa. Na baía do rio Marajó constatou-se valores intermediários (Hill-Shannon: 63,02; Hill-Simpson: 36,66), enquanto no rio Murucupi houve os menores índices (Hill-Shannon: 36,06; Hill-Simpson: 20,50).



**Figura 3.** Curvas de rarefação baseadas no número de indivíduos em florestas ripárias localizadas nas áreas de influência de diferentes sistemas fluviais no município de Barcarena, Amazônia Oriental, Brasil. As linhas contínuas representam a riqueza média de espécies observada, enquanto as linhas tracejadas são a riqueza de espécies estimada. Áreas sombreadas representam intervalos de confiança de 95%

A análise NMDS revelou semelhanças na composição florística entre as áreas, com valor de stress (0,11) indicando uma boa representação bidimensional dos dados (Figura 4A). No rio Barcarena observou-se agrupamento próximo ao ponto de origem (NMDS1 =  $-0,16 \pm 0,08$ ; NMDS2 =  $-0,03 \pm 0,08$ ), com menor sobreposição à área do rio Murucupi. Em contraste, a baía do rio Marajó apresentou acentuada dispersão (NMDS1 =  $0,08 \pm 0,40$ ; NMDS2 =  $-0,01 \pm 0,32$ ), abrangendo as demais áreas estudadas e sugerindo semelhança na composição florística entre elas (Figura 4A). O dendrograma baseado na distância de Bray-Curtis corroborou os padrões observados na análise NMDS (Figura 4B).



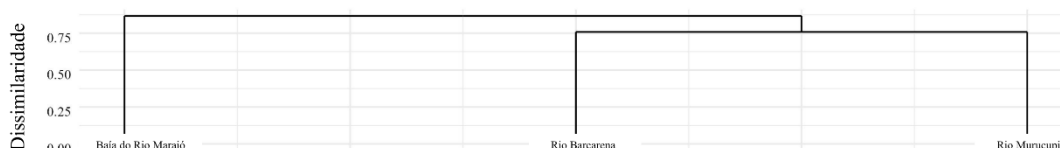
**Figura 4.** A) Escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS), e B) dendrograma de cluster, ambos com base no índice de dissimilaridade de Bray-Curtis em florestas ripárias localizadas nas áreas de influência de diferentes sistemas fluviais no município de Barcarena, Amazônia Oriental, Brasil

1106           A baía do rio Marajó apresentou menor sobreposição de espécies em relação às  
1107 demais áreas, enquanto no rio Murucupi, foi observado padrões semelhantes a  
1108 distribuição de espécies do rio Barcarena (Figura 5A). Onze espécies foram comuns a  
1109 todas as áreas: *Virola surinamensis*, *Tapirira guianensis*, *Protium trifoliolatum*,  
1110 *Pentaclethra macroloba*, *Ormosia coutinhoi*, *Oenocarpus bacaba*, *Mauritia flexuosa*,  
1111 *Lecythis idatimon*, *Jacaranda copaia*, *Inga alba*, *Goupia glabra*, *Euterpe oleracea*,  
1112 *Eschweilera coriacea*, e *Abarema jupunba* (Figura 5A). No rio Barcarena houve a  
1113 presença de 69 espécies exclusivas, seguido de 25 no Murucupi e 16 na baía do rio Marajó  
1114 (Figura 5A). A análise de cluster corroborou com esses resultados, formando dois grupos  
1115 principais, em que um é formado exclusivamente pelas florestas da baía do rio Marajó, e  
1116 o outro inclui o rio Barcarena e o rio Murucupi (Figura 5B).

A



B



**Figura 5.** Heatmap (A) e dendrograma de cluster (B) para a composição florística em florestas ripárias localizadas nas áreas de influência de diferentes sistemas fluviais no município de Barcarena, Amazônia Oriental, Brasil

A biomassa aérea variou entre as áreas, de aproximadamente 89 Mg ha<sup>-1</sup> na Baía do Rio Marajó a 142 Mg ha<sup>-1</sup> no Rio Murucupi (Tabela 1). No entanto, o Modelo Linear

Generalizado (GLM) Gama indicou que essas diferenças não foram estatisticamente significativas ( $p > 0,05$ ), e nenhum contraste entre pares mostrou evidência de diferenças entre as áreas (Tabela 1).

**Tabela 1.** Resultados do Modelo Linear Generalizado (Gama, função de ligação logarítmica) e médias marginais estimadas para a biomassa aérea em matas ciliares localizadas nas áreas de influência de diferentes sistemas fluviais no município de Barcarena, Amazônia Oriental, Brasil.

| Parâmetros         | Estimado | Desv.Pad | Média (Mg ha <sup>-1</sup> ) | p-valor |
|--------------------|----------|----------|------------------------------|---------|
| [Intercepto]       | 4,8066   | 0,2767   | 122,32                       | <0.001  |
| Rio Murucupi       | 0,1495   | 0,3913   | 142,04                       | 0,711   |
| Baía do Rio Marajó | -0,3133  | 0,3913   | 89,42                        | 0,444   |

Nota: Desv.Pad = Desvio padrão.

## **Discussão**

Este estudo avaliou a estrutura e a diversidade florística da vegetação em florestas ripárias localizadas em diferentes sistemas fluviais do município de Barcarena, na Amazônia Oriental, os quais estão sob distintos níveis de pressão antrópica. A comparação entre as áreas associadas ao rio Murucupi e à baía do rio Marajó com a área de menor influência antrópica (rio Barcarena), permitiu compreender como essas pressões podem afetar os atributos florístico-estruturais das formações ripárias. Os resultados responderam à questão do estudo e corroborou parcialmente com a hipótese inicial era de que áreas com maior proximidade a zonas urbanas, industriais ou portuárias apresentariam influência mais pronunciada sobre a vegetação. Os resultados evidenciaram diferenças na composição florística associadas ao grau de perturbação, embora não tenham sido observadas alterações significativas na biomassa acima do solo, o que contribui para a compreensão da resiliência e da vulnerabilidade desses ecossistemas diante de cenários de uso intensivo do solo.

Embora na área do rio Murucupi tenha sido observada menor riqueza de espécies, houve semelhança no padrão florístico-estrutural, na densidade de indivíduos e de espécies comparado com a baía do rio Marajó. Nessas duas áreas, a presença de espécies generalistas como *Mauritia flexuosa* e *Ormosia coutinhoi* representa uma resposta adaptativa a possíveis estresses ambientais. Embora *M. flexuosa* seja tipicamente

associada a solos permanentemente ou sazonalmente alagados, sua ocorrência em locais com diferentes graus de umidade indica uma capacidade de suportar flutuações hidrológicas comuns em zonas ripárias antropizadas (Salvador et al., 2022). *O. coutinhoi*, por sua vez, é conhecida por persistir em habitats perturbados e relativamente conservados, sugerindo tolerância a mudanças na abertura do dossel nas condições do solo e nos regimes de perturbação avaliados (Vale et al., 2014). Além disso, a baía do rio Marajó apresenta características ambientais distintas, pois está inserida em um ambiente estuarino, sujeito a maior influência hidrodinâmica, explicando, em parte, a composição florística diferenciada e a alta dispersão observada neste estudo. Esta área também está mais próxima de pressão antrópica constante, visto que é uma região portuária e frequentemente usada para o lazer.

No caso do acúmulo de biomassa acima do solo, a ausência de diferenças expressivas entre as áreas avaliadas pode ser atribuída à natureza desse indicador estrutural, que é reconhecidamente menos sensível a distúrbios de curto ou médio prazo, devido ao lento crescimento das espécies arbóreas (Cupertino et al., 2024). Ainda assim, a elevada dispersão dos dados, expressada pela grande variabilidade nos valores de biomassa aérea entre as áreas amostradas, especialmente na Baía de Marajó, pode indicar efeitos a longo prazo resultantes da degradação ambiental. Entre os fatores locais que podem ter contribuído para este padrão está o uso histórico do solo, incluindo a ocorrência de acidentes ambientais. Um exemplo relevante é o naufrágio de um navio boiadeiro em 2015 no porto de Vila do Conde, localizado às margens do Rio Pará, cuja baía engloba as parcelas do rio Marajó. Como consequência, houve proliferação de espécies zooplancônicas oportunistas devido à decomposição dos animais (Pinheiro et al., 2019), o que pode ter influenciado os padrões observados nesta pesquisa.

Ainda na baía do rio Marajó, a ocorrência de espécies exclusivas como *Avicennia germinans* (L.) L. e *Chrysobalanus icaco* L. reflete a presença de solos úmidos e sujeitos à influência de marés, conforme verificado em campo. A presença de *Byrsonima spicata* (Cav.) DC. e *Eriotheca globosa* (Aubl.), espécies adaptadas a solos pobres em nutrientes, está em consonância com o padrão de baixa fertilidade edáfica amplamente documentado na região amazônica. Apesar de não estar restrito a ambiente alagados, ambas as espécies são capazes de tolerar condições moderadamente hidromórficas, como solos de drenagem lenta ou saturação temporária (Dantas et al., 2021; Vieira et al., 2017). A ocorrências destas espécies, portanto, reflete a influência combinada da baixa disponibilidade de

nutrientes e das propriedades de retenção de umidade dos solos locais, sugerindo que a composição florística local reflete adaptações a condições nutricionalmente restritivas. Tais condições ambientais específicas exigem espécies adaptadas e tolerantes a ecossistemas degradados, tais quais *Andira inermis* (W.Wright) DC. (Álvarez et al., 2021; Fanday and Tchobsala, 2024) e *Machaerium lunatum* (L.f.) Ducke (Berger et al., 2006), que são da família Fabaceae e apresentam a capacidade de se associar com bactérias fixadoras de nitrogênio. Como consequência, o estabelecimento de espécies especializadas limita a diversidade e ocasiona o predomínio de espécies de baixa densidade da madeira, reduzindo o acúmulo de biomassa geral da vegetação, conforme constatado neste estudo.

A maior riqueza observada no rio Barcarena sugere que, em contextos com menor pressão antrópica, as matas ciliares tendem a manter comunidades vegetais mais densas e diversas, reforçando o potencial dessas áreas como referência para ações de restauração ecológica, inclusive em zonas degradadas ou em processo de revegetação, como aquelas próximas a centros urbanos e zonas industriais. A alta diversidade registrada no entorno da área de referência (rio Barcarena) pode servir como base para bancos de sementes e escolha de espécies adaptadas ao contexto local, caso sejam necessárias intervenções para reflorestamento.

Nesse sentido, o uso de espécies nativas com comprovada resiliência a distúrbios deve ser priorizado em programas de restauração, especialmente porque estas constituem espécies adaptadas a ecossistemas ripários, resilientes e tolerantes a distúrbios. Neste estudo, destacaram-se *O. coutinhoi* e *M. flexuosa*, presentes em todas as áreas avaliadas. *O. coutinhoi* é fixadora de N e desenvolve nodulações mesmo em condições de estresse nutricional (Pons et al., 2007), enquanto *M. flexuosa* controla o estresse oxidativo causado pela inundação do solo, garantindo a persistência nestes ambientes (Salvador et al., 2022). Somado a isso, *T. guianensis* apresentou alta plasticidade ecológica, o que reforça seu papel como espécie generalista e resistente a distúrbios ambientais (Ødegaard and Frame, 2007; Santos et al., 2024).

Portanto, embora os impactos associados ao uso intensivo do solo não tenham ocasionado alterações significativas no estoque de biomassa acima do solo, os resultados indicaram mudanças na composição florística das áreas mais impactadas. A substituição de espécies sensíveis por espécies generalistas e tolerantes, aliada à redução da diversidade em determinadas parcelas, sugere um processo inicial de degradação

ecológica, que pode evoluir para estágios mais severos caso medidas preventivas não sejam adotadas. A introdução estratégica de espécies-chave resilientes, como *O. coutinhoi* e *M. flexuosa*, pode contribuir para a manutenção das funções ecológicas e para a mitigação de riscos cumulativos (Pons et al., 2007; Salvador et al., 2022), sobretudo em ecossistemas ripários amazônicos situados em regiões sob forte pressão por desenvolvimento, como o polo industrial de Barcarena. Nessas áreas, a sinergia entre distúrbios antrópicos e eventos extremos representa uma ameaça concreta à estabilidade dos serviços ecossistêmicos, tornando urgente a adoção de estratégias de manejo e conservação baseadas no conhecimento ecológico local.

Apesar da relevância dos resultados observados, algumas limitações do estudo devem ser reconhecidas para contextualizar a força e o alcance de novas abordagens. Dentre elas, destaca-se o esforço amostral, que foi restrito a quatro parcelas por unidade hidrográfica devido ao acesso limitado a diversas áreas de Barcarena, uma vez que a região contém instalações industriais, propriedades privadas e conflitos socioambientais de longa data que dificultam o estabelecimento de projetos de amostragem maiores. Além disso, embora o estudo avalie a estrutura da vegetação, essa avaliação não é exaustiva. Outros parâmetros estruturais importantes, como área basal, distribuição de classes de diâmetro e altura dos estratos de árvores e arbustos (Rosenfield et al., 2023), não foram incluídos e devem ser incorporados em análises futuras. No entanto, a biomassa integra os efeitos da composição de espécies, densidade da madeira e distribuição de diâmetro (Ulla et al., 2025), tornando-a sensível aos gradientes de perturbação comumente observados em ambientes ripários afetados por atividades industriais e urbanas (Araujo et al., 2023).

Mesmo com essas limitações, os resultados deste estudo oferecem uma base sólida para a compreensão de como as florestas ripárias respondem a diferentes níveis de perturbação em paisagens amazônicas industrializadas. Portanto, forneceu-se uma visão geral comparativa da composição florística e da estrutura da vegetação em matas ciliares expostas a diferentes níveis de pressão antropogênica. Os resultados reforçaram o valor das florestas ripárias amazônicas como indicadores sensíveis de integridade ecológica e destacaram sua relevância para o monitoramento ambiental, o manejo e o planejamento de restauração. Pesquisas futuras devem expandir o desenho amostral onde o acesso for viável, incorporar um conjunto mais amplo de métricas estruturais e funcionais e estabelecer programas de monitoramento de longo prazo para aprofundar a compreensão

de como os gradientes de perturbação influenciam a resiliência e as trajetórias ecológicas desses ecossistemas.

## **Conclusão**

A ausência de diferenças marcantes na estrutura da vegetação sugere uma capacidade de manutenção física do dossel florestal, mesmo sob influência de atividades industriais e urbanas no entorno. No entanto, a composição florística reflete a atuação de múltiplos fatores históricos e ambientais, incluindo o regime hidrológico, salinidade e possíveis perturbações passadas, o que resulta em variações na diversidade e na substituição de espécies sensíveis por táxons mais generalistas e adaptáveis. Esses padrões indicam que a conservação de ecossistemas ripários em zonas de múltiplas atividades exige atenção não apenas à estrutura da floresta, mas também à sua integridade ecológica, considerando que mudanças na composição podem anteceder perdas funcionais mais profundas. A manutenção e o aperfeiçoamento de medidas de gestão ambiental são, portanto, essenciais para garantir a resiliência e a funcionalidade desses ecossistemas estratégicos na Amazônia Oriental.

## **Referências**

- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., De Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorol. Zeitschrift 22, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Álvarez, F., Casanoves, F., Suárez, J.C., 2021. Influence of scattered trees in grazing areas on soil properties in the Piedmont region of the Colombian Amazon. PLoS One 16, e0261612. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261612>
- Arantes, C.C., Winemiller, K.O., Petrere, M., Castello, L., Hess, L.L., Freitas, C.E.C., 2018. Relationships between forest cover and fish diversity in the Amazon River floodplain. J. Appl. Ecol. 55, 386–395. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12967>
- Araujo, E.C.G., Sanquetta, C.R., Dalla Corte, A.P., Pelissari, A.L., Orso, G.A., Silva, T.C., 2023. Global review and state-of-the-art of biomass and carbon stock in the Amazon. J. Environ. Manage. 331, 117251. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117251>
- Berger, U., Adams, M., Grimm, V., Hildenbrandt, H., 2006. Modelling secondary succession of neotropical mangroves: Causes and consequences of growth reduction

- 1284 in pioneer species. *Perspect. Plant Ecol. Evol. Syst.* 7, 243–252.  
1285 <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2005.08.001>
- 1286 Brasil, 2012. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012: Dispõe sobre a proteção da vegetação  
1287 nativa. Brasil.
- 1288 Chao, A., Gotelli, N.J., Hsieh, T.C., Sander, E.L., Ma, K.H., Colwell, R.K., Ellison, A.M.,  
1289 2014. Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: a framework for sampling  
1290 and estimation in species diversity studies. *Ecol. Monogr.* 84, 45–67.  
1291 <https://doi.org/10.1890/13-0133.1>
- 1292 Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S.L., Swenson, N.G., Zanne, A.E., 2009.  
1293 Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecol. Lett.* 12, 351–366.  
1294 <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x>
- 1295 Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M.S., Delitti,  
1296 W.B.C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P.M., Goodman, R.C., Henry, M., Martínez-  
1297 Yrizar, A., Mugasha, W.A., Muller-Landau, H.C., Mencuccini, M., Nelson, B.W.,  
1298 Ngomanda, A., Nogueira, E.M., Ortiz-Malavassi, E., Pélissier, R., Ploton, P., Ryan,  
1299 C.M., Saldarriaga, J.G., Vieilledent, G., 2014. Improved allometric models to  
1300 estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Glob. Chang. Biol.* 20, 3177–  
1301 3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- 1302 Cupertino, A., Dufour, S., Rodríguez-González, P.M., 2024. Chasing success: A review  
1303 of vegetation indicators used in riparian ecosystem restoration monitoring. *Ecol.*  
1304 *Indic.* 166, 112371. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112371>
- 1305 Dantas, D., Carvalho, W.V. De, Vilar, S., Neto, C., Ubiratan, J., Nazaré, M. De, Tôrres,  
1306 L., Simone, E., Gurgel, C., 2021. Floristic influence of Amazonian Lowland Dense  
1307 Rain Forest on the pioneer vegetation with marine influence , Restinga of Pará state  
1308 , Brazil Abstract The coastal region of the municipalities of Curuçá and Maracanã ,  
1309 on the northeastern coast of Pará , she.
- 1310 Fanday, H., Tchobsala, 2024. Impact of Human Activities on Woody Vegetation in  
1311 Gallery Forests in the Mandara Mountains (Far North, Cameroon). *Sci. World J.*  
1312 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/9198533>
- 1313 Giese, L.A.B., Aust, W.M., Kolka, R.K., Trettin, C.C., 2003. Biomass and carbon pools  
1314 of disturbed riparian forests. *For. Ecol. Manage.* 180, 493–508.  
1315 [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00644-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00644-8)
- 1316 Hill, M.O., 1973. Diversity and Evenness: A Unifying Notation and Its Consequences.

- 1317 Ecology 54, 427–432. <https://doi.org/10.2307/1934352>
- 1318 Hsieh, T.C., Ma, K.H., Chao, A., 2016. iNEXT: an R package for rarefaction and  
1319 extrapolation of species diversity ( <scp>H</scp> ill numbers). *Methods Ecol. Evol.*  
1320 7, 1451–1456. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12613>
- 1321 IBGE, I.B. de G. e E., 2012. Manual técnico da vegetação brasileira, Second. ed. Rio de  
1322 Janeiro.
- 1323 Kassambara, A., Mundt, F., 2020. factoextra: Extract and Visualize the Results of  
1324 Multivariate Data Analyses.
- 1325 Lopes, I.D. da S., Medeiros, A.C., de Melo, N.F.A.C., Lima, M. de O., Santos, M. de  
1326 L.S., 2021. Multivariate Analysis of Amazonian Rivers Located in an Area of  
1327 Intense Industrial Activity, Barcarena, Pará State, Brazil. *J. Water* 1, 1–16.  
1328 <https://doi.org/10.14302/issn.2769-2264.jw-21-3870>
- 1329 MapBiomias, 2024. Cobertura e uso da terra [WWW Document]. URL  
1330 [https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura?activeBaseMap=9&layersOpacity=100&activeModule=coverage&activeModuleContent=coverage%3Acoverage\\_](https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura?activeBaseMap=9&layersOpacity=100&activeModule=coverage&activeModuleContent=coverage%3Acoverage_main&activeYear=2022&mapPosition=-12.361466%2C-49.504395%2C5&timelineLimitsRange=1985%2C2022&baseParams[terri)  
1331 [main&activeYear=2022&mapPosition=-12.361466%2C-](https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura?activeBaseMap=9&layersOpacity=100&activeModule=coverage&activeModuleContent=coverage%3Acoverage_main&activeYear=2022&mapPosition=-12.361466%2C-49.504395%2C5&timelineLimitsRange=1985%2C2022&baseParams[terri)  
1332 [49.504395%2C5&timelineLimitsRange=1985%2C2022&baseParams\[terri](https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura?activeBaseMap=9&layersOpacity=100&activeModule=coverage&activeModuleContent=coverage%3Acoverage_main&activeYear=2022&mapPosition=-12.361466%2C-49.504395%2C5&timelineLimitsRange=1985%2C2022&baseParams[terri)  
1333 (accessed 2.1.24).
- 1334
- 1335 Maracahipes-Santos, L., Silvério, D. V., Macedo, M.N., Maracahipes, L., Jankowski,  
1336 K.J., Paolucci, L.N., Neill, C., Brando, P.M., 2020. Agricultural land-use change  
1337 alters the structure and diversity of Amazon riparian forests. *Biol. Conserv.* 252,  
1338 108862. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108862>
- 1339 Méndez-Toribio, M., Zermeño-Hernández, I., Ibarra-Manríquez, G., 2014. Effect of land  
1340 use on the structure and diversity of riparian vegetation in the Duero river watershed  
1341 in Michoacán, Mexico. *Plant Ecol.* 215, 285–296. [https://doi.org/10.1007/s11258-](https://doi.org/10.1007/s11258-014-0297-z)  
1342 [014-0297-z](https://doi.org/10.1007/s11258-014-0297-z)
- 1343 Ødegaard, F., Frame, D., 2007. Generalist flowers and phytophagous beetles in two  
1344 tropical canopy trees: resources for multitudes. *Taxon* 56, 696–706.  
1345 <https://doi.org/10.2307/25065853>
- 1346 Pinheiro, S., Lima, M., Carneiro, B., Costa Tavares, V., Câmara, V., 2019. Effects of a  
1347 shipwreck on the zooplankton community in a port region of the Amazon. *Environ.*  
1348 *Sci. Pollut. Res.* 26, 5738–5750. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3999-2>
- 1349 Pons, T.L., Perreijn, K., Van Kessel, C., Werger, M.J.A., 2007. Symbiotic nitrogen

fixation in a tropical rainforest: 15 N natural abundance measurements supported by experimental isotopic enrichment. *New Phytol.* 173, 154–167. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01895.x>

R Development Core Team, 2025. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing v. 4.4.3.

RADAMBRASIL, 1974. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Folha SA. 22. Rio de Janeiro.

Rosenfield, M.F., Jakovac, C.C., Vieira, D.L.M., Poorter, L., Brancalion, P.H.S., Vieira, I.C.G., de Almeida, D.R.A., Massoca, P., Schietti, J., Albernaz, A.L.M., Ferreira, M.J., Mesquita, R.C.G., 2023. Ecological integrity of tropical secondary forests: concepts and indicators. *Biol. Rev.* 98, 662–676. <https://doi.org/10.1111/brv.12924>

Salvador, H.F., Mazzottini-dos-Santos, H.C., Dias, D.S., Azevedo, A.M., Lopes, P.S.N., Nunes, Y.R.F., Ribeiro, L.M., 2022. The dynamics of *Mauritia flexuosa* (Arecaceae) recalcitrant seed banks reveal control of their persistence in marsh environments. *For. Ecol. Manage.* 511, 120155. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120155>

Sanches, R.A., Futemma, C.R.T., Alves, H.Q., 2021. Indigenous territories and governance of forest restoration in the Xingu River (Brazil). *Land use policy* 104, 104755. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104755>

Santos, F.F. de M., Durigan, G., Boschi, R.S., Ivanauskas, N., Rodrigues, R.R., 2024. Tree community dynamics in the cerrado (2002-2016): A case of biome shift. *For. Ecol. Manage.* 555, 121698. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121698>

Seidler, R., 2017. Patterns of Biodiversity Change in Anthropogenically Altered Forests ☆, in: *Reference Module in Life Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.02186-5>

Sharma, S., Khanal, P., 2024. Assessing Land-Cover Change and Urbanization Impact on Riparian Zones in South Carolina: A Decade of Transition. *Land* 13, 2232. <https://doi.org/10.3390/land13122232>

Silva, R.L., Leite, M.F.A., Muniz, F.H., de Souza, L.A.G., de Moraes, F.H.R., Gehring, C., 2017. Degradation impacts on riparian forests of the lower Mearim river, eastern periphery of Amazonia. *For. Ecol. Manage.* 402, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.07.019>

Sutfin, N.A., Wohl, E.E., Dwire, K.A., 2016. Banking carbon: a review of organic carbon storage and physical factors influencing retention in floodplains and riparian

- 1383 ecosystems. *Earth Surf. Process. Landforms* 41, 38–60.  
1384 <https://doi.org/10.1002/esp.3857>
- 1385 Utlá, C.S., Dashora, A., Mishra, R.K., Zhang, Y., 2025. A review on aboveground  
1386 biomass estimation methods utilizing forest structural characteristics. *Int. J. Remote*  
1387 *Sens.* 46, 5917–5937. <https://doi.org/10.1080/01431161.2025.2524082>
- 1388 Vale, I. do, Costa, L.G.S., Miranda, I.S., 2014. Espécies indicadas para a recomposição  
1389 da floresta ciliar da sub-bacia do rio Peixe-Boi, Pará. *Ciência Florest.* 24, 573–582.
- 1390 Vallejo, M., López-Sánchez, J.G., Hernández-Ordoñez, O., Torres-García, I., Ramírez,  
1391 M.I., 2022. Biodiversity of riparian vegetation under a management gradient in the  
1392 Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Bot. Sci.* 100, 837–856.  
1393 <https://doi.org/10.17129/botsci.3015>
- 1394 Verdonschot, P.F.M., Verdonschot, R.C.M., 2023. Ecological Functions and  
1395 Management of Large Wood in Fluvial Systems. *Curr. For. Reports* 10, 39–55.  
1396 <https://doi.org/10.1007/s40725-023-00209-x>
- 1397 Vieira, D. dos S., Oliveira, M.L.R. de, Gama, J.R.V., Machado, E.L.M., Görgens, E.B.,  
1398 Lafetá, B.O., Garcia, J.S., 2017. Phytosociology of a natural fragment of the  
1399 oodplain forest in the Lower Tapajós River, Brazil. *Bosque* 38, 357–369.
- 1400 Wickham, H., 2016. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*.
- 1401 Zheng, J., Wang, L., Li, C., 2023. Trends and Hotspots in Riparian Restoration Research:  
1402 A Global Bibliometric Analysis during 1990–2022. *Forests* 14, 2205.  
1403 <https://doi.org/10.3390/f14112205>

### Capítulo III

#### FLORESTAS RIPÁRIAS ANTROPIZADAS APRESENTAM POTENCIAL DE USO NÃO-MADEIREIRO EM POLO INDUSTRIAL NA AMAZÔNIA ORIENTAL

Anthropized riparian forests show non-timber forest product potential in an industrial hub of the Eastern Amazon

Submetido na Revista Sustainable Futures\*

Métricas da revista: Qualis A1, percentil Scopus 79%

\* A formatação de citação e referências deste artigo segue as normas da revista

#### Resumo gráfico



#### Resumo

Compreender o potencial de uso não-madeireiro de florestas ripárias é importante para a sociobioeconomia em regiões antropizadas na Amazônia. Este estudo avaliou o potencial de uso de espécies registradas em florestas ripárias, e identificou os fatores relacionados à distribuição das espécies em um polo industrial na Amazônia brasileira. As espécies com maior índice de valor de importância registradas ao longo dos principais rios da região e com algum *status* de conservação foram classificadas quanto ao potencial de uso (alimentício, medicinal, cosmético e artesanato). Utilizou-se uma modelagem da distribuição potencial por máxima entropia, considerando aspectos hidrológicos, topográficos e de usos do solo. Foram avaliadas 25 espécies e apenas 18 apresentaram pelo menos uma categoria de uso. Os usos mais frequentes foram medicinal, alimentício, artesanal e cosmético, nesta ordem. As palmeiras *Euterpe oleracea* e *Mauritia flexuosa*

se destacaram pelo potencial de uso em todas as categorias, enquanto *Byrsonima spicata*, *Eschweilera coriacea* e *Apuleia leiocarpa* apenas com um único uso conhecido. As partes vegetais mais utilizadas foram a casca (13 espécies), associada ao uso medicinal; frutos (10 espécies), majoritariamente para fins alimentícios; e folhas (6 espécies), empregadas principalmente em fitoterapia. Na modelagem espacial, *E. coriacea* e *Symphonia globulifera* apresentaram influência negativa do uso do solo, enquanto *M. flexuosa*, demonstrou relação positiva com a declividade. A diversidade funcional e de usos identificada evidencia o elevado potencial bioeconômico das florestas ripárias amazônicas, porém a influência negativa do uso do solo reforça importância de estratégias integradas de conservação e manejo sustentável de produtos florestais não madeireiros em áreas antropizadas.

**Palavras-chave:** bioeconomia; uso alimentício; uso cosmético; artesanato

## Introdução

As florestas ripárias são ecossistemas-chave em paisagens tropicais, atuando como interfaces entre ambientes terrestres e aquáticos e desempenhando múltiplas funções ecológicas, como a regulação do ciclo hidrológico, a estabilização de margens fluviais, a retenção de sedimentos e nutrientes, e a moderação de extremos climáticos locais (Verdonschot and Verdonschot, 2023). Além disso, estes ecossistemas oferecem abrigo, alimentação e rotas migratórias para uma diversidade de espécies animais, configurando-se como corredores ecológicos (Salviano et al., 2021). Na Amazônia, as florestas ripárias contribuem significativamente para a manutenção da conectividade ecológica e para o funcionamento de processos ecossistêmicos em bacias hidrográficas de grande escala, sendo especialmente relevantes em áreas sujeitas a variações sazonais no nível da água, como as várzeas e igapós (Nowacki et al., 2019).

Todavia, mudanças no uso e cobertura da terra resultaram na perda de cerca de 89 milhões de hectares de florestas na Amazônia entre 1985 e 2023, impulsionadas principalmente pela expansão agropecuária, exploração madeireira e atividades de mineração (MapBiomass, 2024). Florestas ripárias são particularmente vulneráveis a esses distúrbios devido à sua localização estratégica ao longo dos cursos d'água, sendo frequentemente as primeiras áreas a serem degradadas em regiões sob intensa ocupação industrial, urbana e agrícola (Caldas et al., 2023). No estado do Pará, considerado um epicentro de degradação florestal na Amazônia Oriental, aproximadamente 20% da cobertura florestal original já havia sido perdida em 2023, com grande parte dessa

conversão ocorrendo em áreas próximas a rios e igarapés (PRODES, 2024). As intervenções têm comprometido não apenas a integridade ecológica das florestas ripárias, mas também os serviços ecossistêmicos que elas oferecem às populações humanas, incluindo provisão de água, regulação climática e suporte à biodiversidade (Dinca et al., 2025).

O município de Barcarena, no estado do Pará, é um exemplo de transformação territorial sob influência de grandes projetos industriais e portuários. O município está situado em uma região estratégica da Amazônia Oriental, com acesso direto ao Oceano Atlântico por meio de sua rede hidrográfica, e abriga um dos maiores polos industriais da região Norte do Brasil (Nahum, 2017). A instalação e operação de empreendimentos vinculados à mineração, siderurgia, energia e logística têm modificado substancialmente as paisagens naturais, sobretudo ao longo dos rios que margeiam o território (Narayanan et al., 2024). Apesar dessas alterações, remanescentes florestais ripários ainda persistem em diversas áreas, sustentando uma diversidade florística relevante e apresentando espécies com reconhecido uso tradicional, potencial farmacêutico, cosmético, alimentício e ornamental (Oliveira et al., 2022).

Nesse cenário, cresce o interesse por abordagens que aliem a conservação da biodiversidade ao desenvolvimento de alternativas econômicas sustentáveis, como as que integram a bioeconomia de base não-madeireira (Araujo et al., 2024). Essa perspectiva propõe o aproveitamento racional e ético dos recursos biológicos, com foco na agregação de valor, inclusão social e valorização de saberes tradicionais (Rosenfeld et al., 2024). No contexto amazônico, essa estratégia pode contribuir para reduzir a pressão sobre os ecossistemas e oferecer soluções baseadas na natureza para os desafios do desenvolvimento regional (Garrett et al., 2024). A identificação de espécies nativas com potencial bioeconômico, sobretudo aquelas associadas a ecossistemas ripários, é um passo essencial para subsidiar políticas públicas, orientar investimentos e fomentar cadeias produtivas sustentáveis, integradas a programas de restauração ecológica, desenvolvimento territorial e adaptação às mudanças climáticas.

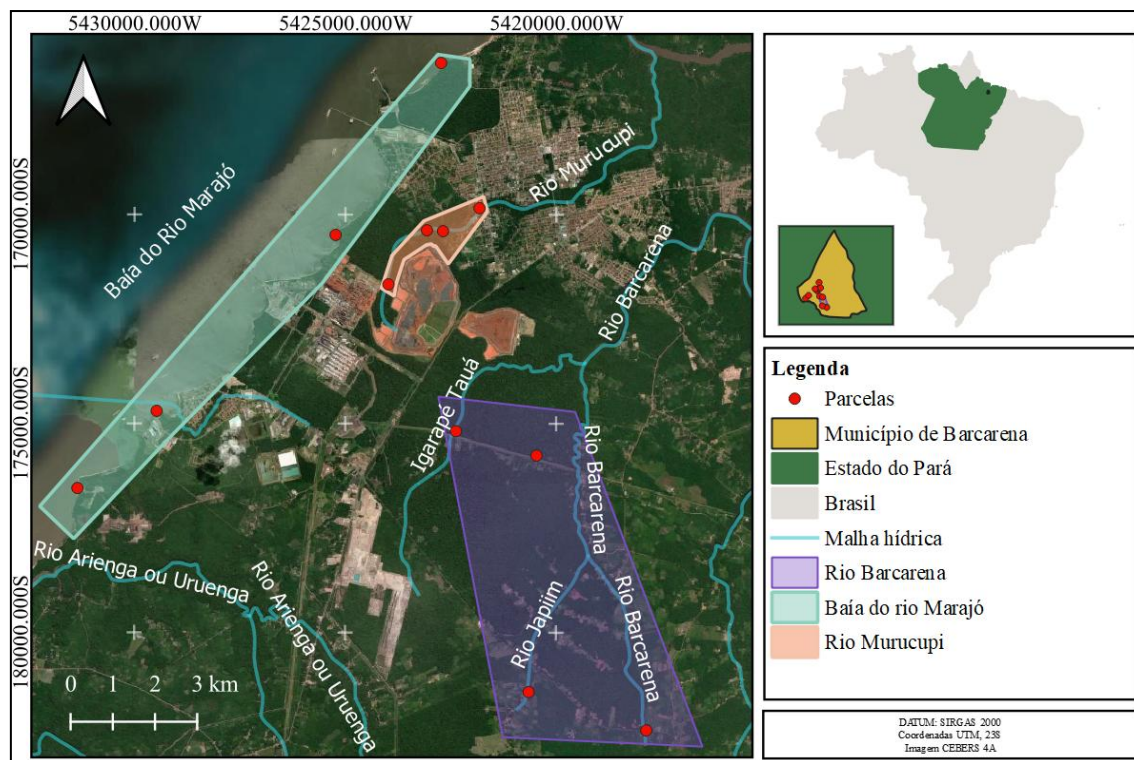
Além disso, a compreensão dos fatores ambientais que influenciam a distribuição das espécies é, portanto, fundamental para prever a dinâmica de comunidades arbóreas em paisagens antropizadas. Técnicas de modelagem de distribuição de espécies (SDM), como o MaxEnt, têm sido amplamente aplicadas para identificar os preditores ambientais que determinam a ocorrência de espécies, integrando dados de campo com informações espaciais sobre clima, topografia e hidrografia (Luo et al., 2025; Njomaba et al., 2025).

Dessa forma, este estudo teve como objetivo: a) avaliar o potencial de uso de espécies arbóreas nativas presentes em florestas ripárias associadas aos principais rios do polo industrial de Barcarena; b) avaliar os fatores ambientais que influenciam a distribuição de espécies com potencial uso na bioeconomia, em florestas ripárias do município.

## Material e Métodos

### Área de estudo

O estudo foi desenvolvido no município de Barcarena, Pará, Amazônia Oriental (01°30'21" S; 48°37'33" W; Figura 1). O clima do município é do tipo tropical úmido, de acordo com Köppen-Geiger (Alvares et al., 2013). Os solos são predominantemente do tipo Latossolos Vermelho-Amarelo distróficos, Espodossolo hidromórfico e Plintossolo (RADAMBRASIL, 1974). A vegetação natural é classificada como Floresta Ombrófila Densa (IBGE, 2012), porém foi descaracterizada pela ocupação humana, especialmente pela expansão industrial na região (MapBiomas, 2024).



**Figura 1.** Pontos amostrais em áreas do polo industrial localizado no município de Barcarena, Brasil, Amazônia Oriental

A definição das áreas amostradas dependeu da distribuição das formações florestais ripárias ao longo de três corpos hídricos situados no município de Barcarena, no estado do Pará, Brasil. A seleção considerou a variação nos níveis de intervenção

humana observados, visando representar um gradiente de impactos socioambientais e diferentes padrões de uso do solo e pressão antrópica. Com isso, foi possível classificar as áreas de estudo em três categorias: a) rio Murucupi; b) baía do rio Marajó e c) rio Barcarena. O rio Murucupi representa a categoria de maior impacto humano, pois está inserido em uma região urbanizada e industrializada, percorrendo áreas densamente povoadas, adjacentes a instalações industriais e ao antigo lixão da cidade.

A baía do rio Marajó, por sua vez, localiza-se em uma zona de transição entre áreas urbanas e estuarinas, sendo sujeita a fontes contínuas de perturbação. As pressões ambientais incluem o lançamento de efluentes domésticos e industriais tratados, o tráfego de embarcações, atividades portuárias e uso recreativo de suas margens. Já o rio Barcarena foi caracterizado como uma área de menor impacto direto, servindo como referência para condições menos alteradas. Os pontos amostrados nesta área do rio englobam uma parte do município com baixa densidade populacional e afastado dos principais complexos industriais, com margens de maior cobertura vegetal contínua e menor evidência de intervenções humanas severas

### ***Coleta de dados florísticos***

Foram instaladas 12 parcelas de 25 m x 100 m, sendo quatro em cada uma das áreas de influência hídrica. No interior de cada parcela realizou-se o inventário florístico de todos os indivíduos arbóreos, arbustivos e palmeiras com DAP (Diâmetro a Altura do Peito, medido a 1,30 da superfície do solo)  $\geq 3,82$  cm. Além da medição do DAP usando fitas diamétricas, estimou-se a altura total (Ht) por meio do método bastão de Biltmore. Quando não foi possível fazer a identificação in situ das espécies, foi coletado amostras botânicas padronizadas, as quais foram comparadas com as amostras exemplares do Herbário Felisberto Camargo da Universidade Federal Rural da Amazônia, localizado em Belém, Pará.

O Índice de Valor de Importância (IVI) foi calculado por meio da média da soma dos valores de Dominância Relativa (DomR), Frequência Relativa (FreqR) e Densidade Relativa (DensR), de acordo com a metodologia proposta por Müller-Dombois and Ellenberg (1974). Somado a isso, todas as espécies foram classificadas de acordo com seu *status* de conservação em Vulnerável (VU), criticamente em Perigo (CR) e Pouco Preocupante (LC), de acordo com a IUCN (2025) e Martinelli and Moraes (2013).

### ***Avaliação do potencial bioeconômico***

O potencial bioeconômico foi avaliado para as dez espécies com maior IVI nas áreas avaliadas e para espécies classificadas em algum status de conservação. O tipo de uso foi avaliado por meio do banco de dados do Useful Tropical Plants (Fern, 2025), que permitiu a classificação em quatro categorias: a) alimentar, quando estiver relacionado ao uso direto de frutos, sementes ou outras partes da planta para alimentação humana ou animal; b) medicinal ou farmacêutico, no caso de espécies com utilização em sistemas tradicionais ou na indústria farmacêutica; c) cosmético, referentes àquelas usadas em formulações cosméticas, higiene pessoal ou perfumaria; e d) artesanato, quando o uso de madeira, casca, fibras ou sementes for destinado à produção artesanal. Buscas adicionais na literatura técnico-científica foram realizadas para complementar as informações e identificar usos de espécies que não apresentavam informações no banco de dados.

Para avaliar a diversidade de usos das espécies, foi construída uma rede bipartida não direcionada, seguindo Dormann et al. (2009) entre as dez espécies com maior IVI e as categorias de uso identificadas. Além disso, avaliou-se a sobreposição entre os valores de IVI e o número de categorias de uso, por meio de um gráfico de dispersão, que permitiu determinar a prioridade das espécies em relação ao potencial bioeconômico em cada uma das áreas avaliadas. A prioridade foi definida a partir da localização nos quadrantes, em que espécies de maior prioridade estavam presentes do primeiro quadrante (superior direito), enquanto as de menor prioridade estavam no terceiro quadrante (inferior esquerdo). Os outros quadrantes compreenderam espécies relevantes em apenas um dos eixos (IVI ou quantidade de usos).

### ***Modelagem e distribuição das espécies***

Para avaliar os fatores ambientais que influenciam a distribuição das espécies com potencial bioeconômico, foram utilizados preditores ambientais relacionados à topografia, hidrografia e cobertura do solo. Para a topografia, o modelo digital de elevação (MDE) foi obtido a partir do Shuttle Radar Topography Mission com resolução espacial de 30 m, por meio do pacote elevatr no R (Hollister, 2017). A partir do MDE foram derivadas as variáveis declividade e aspecto (em graus) utilizando o pacote terra (Hijmans, 2020). A rede hidrográfica foi extraída do OpenStreetMap usando o pacote osmdata (Maspons et al., 2017), considerando feições classificadas como river, stream e canal, e calculou-se a distância mínima aos cursos d'água para cada parcela amostral.

Somado a isso, camadas de uso e cobertura do solo foram obtidas do MapBiomias (Coleção 9), sendo utilizadas como variáveis categóricas na modelagem.

Todas as variáveis raster foram reprojctadas para o mesmo sistema de coordenadas geográficas (WGS84) e ajustadas para a extensão do município de Barcarena, utilizando as funções crop e mask do pacote terra. Para cada parcela, foi extraído o valor médio dos preditores contínuos e a classe predominante para variáveis categóricas, gerando uma matriz de variáveis ambientais associadas a cada ponto amostral.

A colinearidade entre preditores ambientais foi avaliada por meio do cálculo do fator de inflação da variância (VIF), mantendo apenas variáveis com  $VIF < 10$ . Em seguida, a modelagem da distribuição potencial foi realizada utilizando o algoritmo de máxima entropia implementado no pacote maxnet (Phillips, 2016). Nesta etapa, considerou-se apenas espécies que apresentaram no mínimo a presença em duas parcelas após a remoção de valores ausentes para os preditores ambientais. Cada modelo foi gerado automaticamente pela função maxnet.formula, incluindo termos lineares, quadráticos e interações, permitindo capturar as relações entre as espécies e os preditores.

A acurácia dos modelos foi avaliada por meio da Área Sob a Curva ROC (AUC), calculada diretamente no conjunto de dados de treino (AUC-Treino), devido ao baixo número de observações, que inviabiliza a validação cruzada tradicional de 10 repetições. Valores de AUC foram classificados conforme Metz (1978), em que: a)  $AUC < 0,7$  = desempenho fraco; b)  $0,7 \leq AUC < 0,8$  = desempenho aceitável; c)  $0,8 \leq AUC < 0,9$  = bom; e d)  $AUC \geq 0,9$ : excelente. A influência dos fatores ambientais na distribuição de cada espécie foi determinada pela análise do peso e direção (positiva ou negativa) dos coeficientes do modelo maxnet.

## Resultados

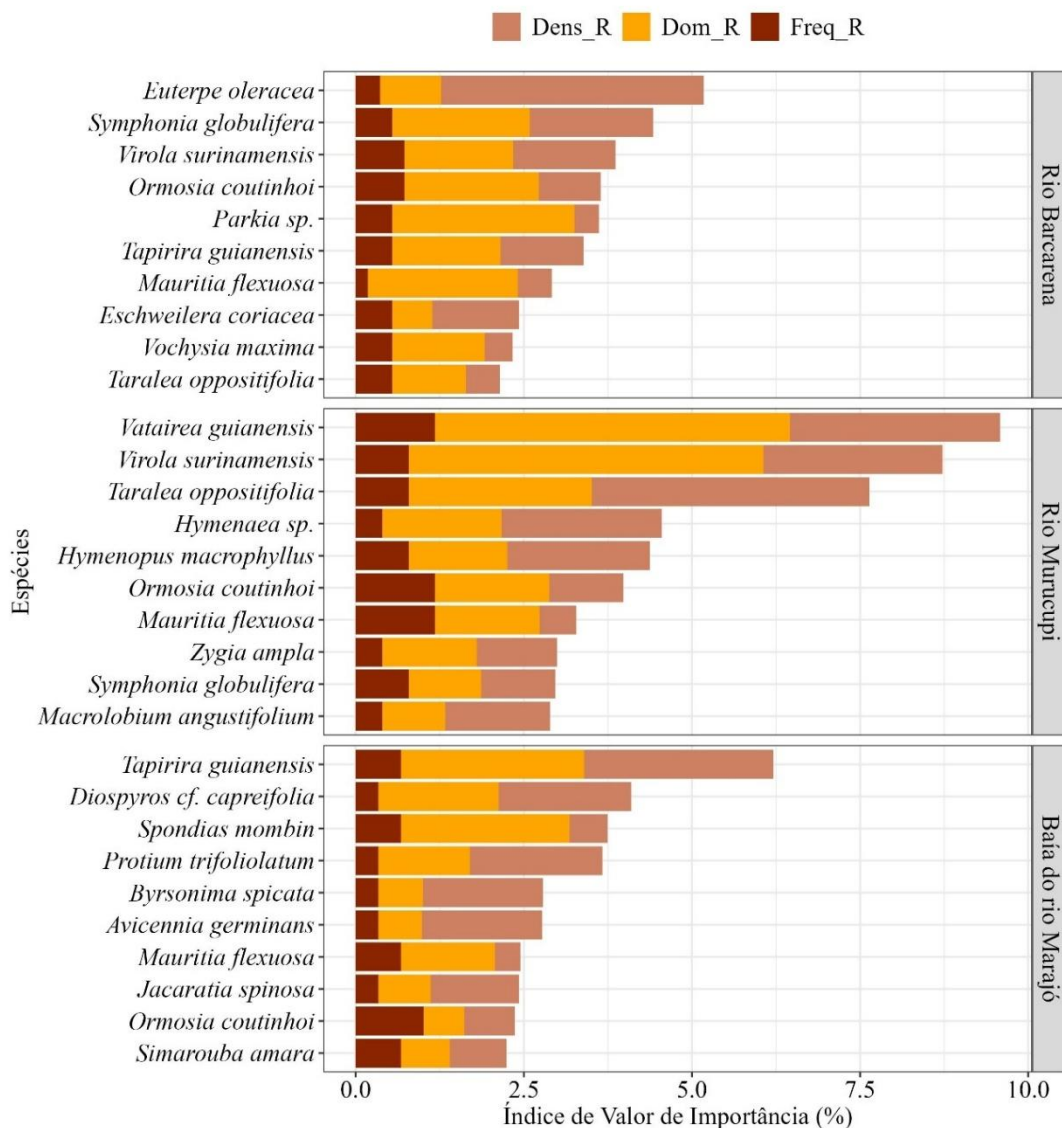
Foram inventariados 1385 indivíduos, distribuídos em 53 famílias botânicas e 209 espécies. Do total, quatro espécies, representadas por 92 indivíduos apresentaram alguma categoria de ameaça, representando 1,91% das espécies e 7,55% das famílias botânicas (Tabela 1).

**Tabela 1.** Espécies com algum status de conservação e número de indivíduos em florestas ripárias localizadas nas áreas de influência de diferentes sistemas fluviais no município

1620 de Barcarena, Amazônia Oriental, Brasil. VU = Vulnerável; LC: Pouco preocupante; EN:  
1621 Em perigo.

| Família       | Nome científico                                     | MMA<br>(2013) | IUCN<br>(2025) | N         |
|---------------|-----------------------------------------------------|---------------|----------------|-----------|
| Fabaceae      | <i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J.F.Macbr.         | VU            | -              | 6         |
| Lauraceae     | <i>Mezilaurus itauba</i> (Meisn.) Taub. Ex Mez      | VU            | VU             | 1         |
| Myristicaceae | <i>Viola surinamensis</i> (Rol. ex Rottb.) Warb.    | VU            | EN             | 80        |
| Sapotaceae    | <i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.)<br>Monach. | -             | EN             | 2         |
| <b>Total</b>  |                                                     |               |                | <b>92</b> |

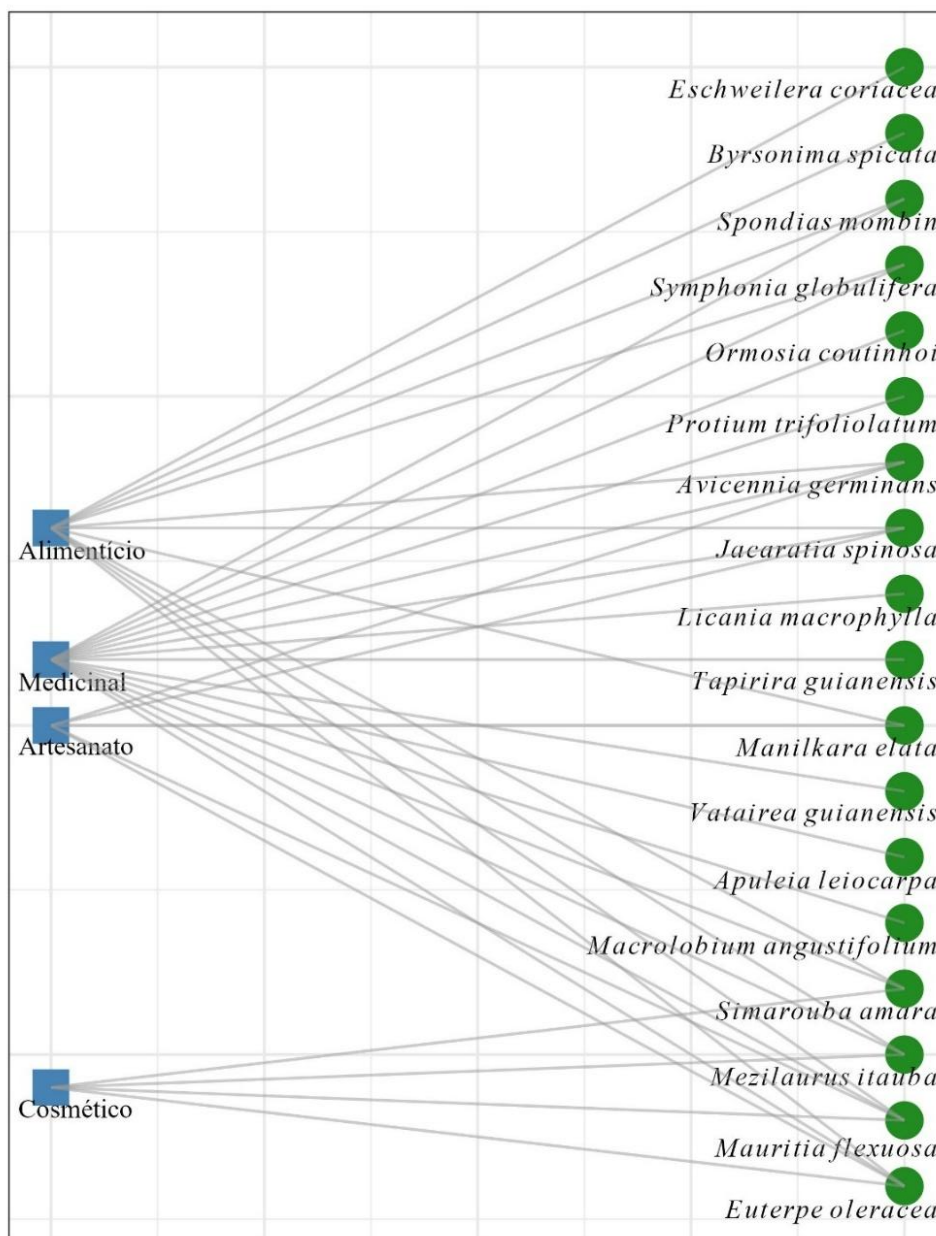
1622  
1623 O maior valor de importância foi registrado para *Euterpe olearacea* Mart. ao  
1624 longo do rio Barcarena (5,18%), enquanto *Ormosia countinhoi* Ducke e *Mauritia flexuosa*  
1625 L.f. estavam entre as 10 espécies com maior IVI em todas as áreas e, *Tapirira guianensis*  
1626 Aubl. só não foi registrada no rio Murucupi. *Taralea oppositifolia* Aubl., *Symphonia*  
1627 *globulifera* L.f. e *Viola surinamensis* (Rol. ex Rottb.) Warb. estavam entre as 10 espécies  
1628 com maior IVI tanto no rio Barcarena quanto no rio Murucupi (Figura 2).



**Figura 2.** As dez espécies com os maiores índices de valor de importância (IVI) em florestas ripárias localizadas nas áreas de influência de diferentes sistemas fluviais no município de Barcarena, Amazônia Oriental, Brasil

Após a exclusão da presença de duplicidade de espécies comuns entre as áreas amostradas e com algum status de conservação, foram identificadas 25 espécies para a avaliação do potencial bioeconômico. Desse total, 18 apresentaram ao menos uma categoria de uso, enquanto sete não foram encontrados registros de uso. A categoria de uso mais frequentemente atribuída foi a medicinal, com 15 espécies associadas, seguida da alimentícia (11 espécies), artesanal (5 espécies) e cosmética (4 espécies). As palmeiras *E. oleracea* e *M. flexuosa* se destacaram por apresentarem usos em todas as categorias (Figura 3), principalmente, pelos seus frutos, folhas, fibras e sementes (Tabela 2).

1641 *Avicennia germinans* (L.) L., *Jacaratia spinosa* (Aubl.) A.DC., *Simarouba amara* Aubl.  
 1642 e *M. itauba* registraram uso em três categorias, enquanto *Byrsonima spicata* (Cav.) DC.,  
 1643 *Eschweilera coriácea* (DC.) S.A.Mori e *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J.F.Macbr. foram  
 1644 registradas com indicação de apenas um tipo de uso. As partes das plantas mais utilizadas  
 1645 são casca (13 espécies), fruto (10 espécies) e folhas (6 espécies), sendo que casca e folhas  
 1646 estão mais associadas ao uso medicinal, enquanto frutos, ao alimentício (Tabela 2).



1647  
 1648 **Figura 3.** Rede bipartida não direcionada do potencial de uso das dez espécies com maior  
 1649 IVI e com algum status de conservação em florestas ripárias localizadas às margens dos  
 1650 principais rios do município de Barcarena, Amazônia oriental

1651 **Tabela 2.** Categorias de uso atribuídas às espécies selecionadas em florestas ripárias localizadas às margens dos principais rios do município de  
1652 Barcarena, Amazônia oriental, com base em registros etnobotânicos.

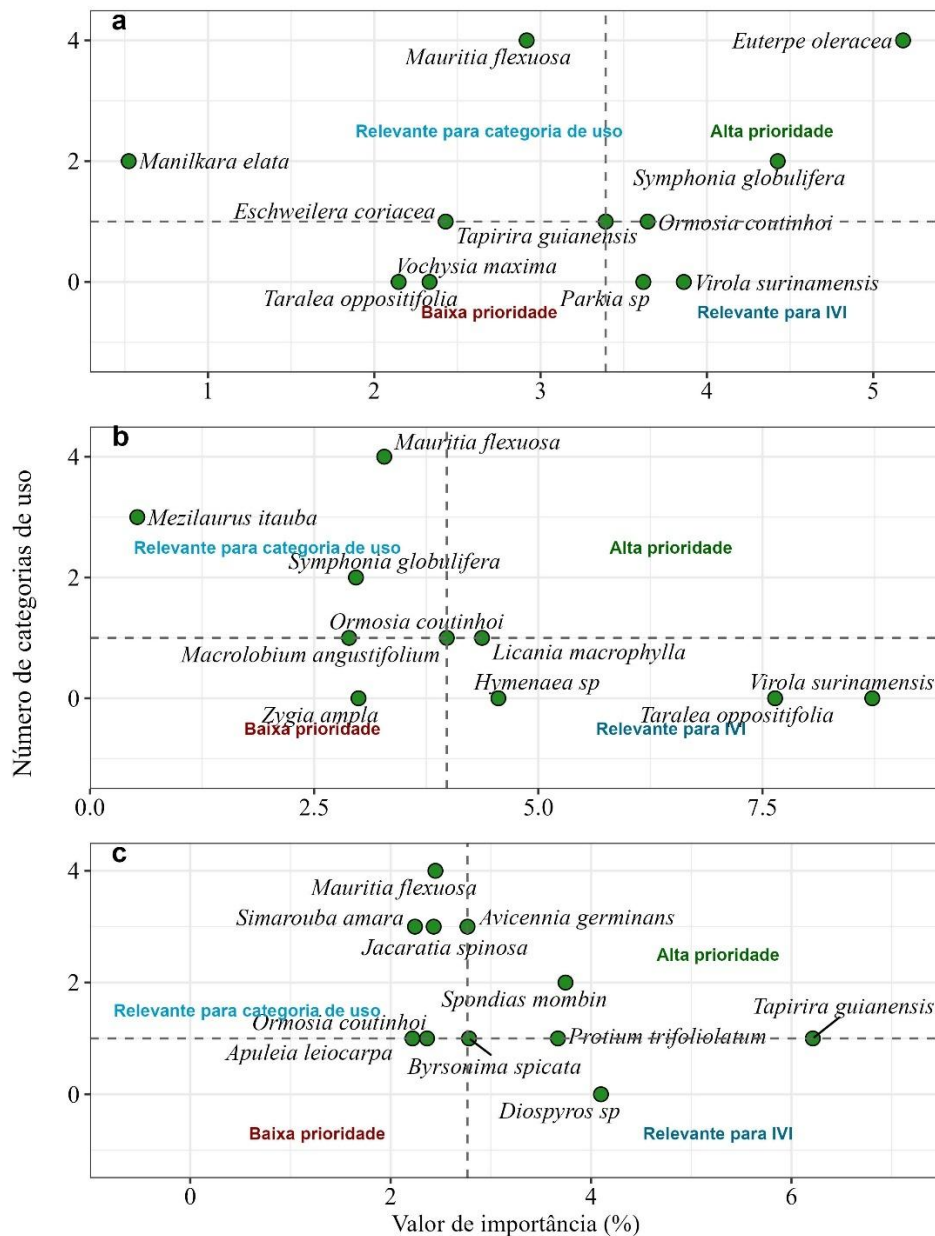
| Espécie                                    | Hábito   | Uso         | Parte da planta          | Descrição de uso                                                              |
|--------------------------------------------|----------|-------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Avicennia germinans</i> (L.) L.         | Árvore   | Alimentício | Folhas e raízes          | Preparo de sal vegetal                                                        |
|                                            |          | Medicinal   | Folha                    | Tratamento de hemorroidas                                                     |
|                                            |          |             | Casca                    | Tratamento de problemas de pele, tumores, diarreia, inflamações e hemorragias |
|                                            |          |             | Raiz                     | Tratamento de problemas intestinais                                           |
|                                            |          | Artesanato  | Casca                    | Corante avermelhado natural                                                   |
| <i>Byrsonima spicata</i> (Cav.) DC.        | Árvore   | Alimentício | Fruto                    | Sucos e sobremesas                                                            |
| <i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) S.A.Mori | Árvore   | Alimentício | Semente                  | Consumo                                                                       |
| <i>Euterpe oleracea</i> Mart.              | Palmeira | Alimentício | Fruto                    | Sucos, vitaminas, sorvetes, e outros produtos alimentícios                    |
|                                            |          |             | Palmito                  | Culinária                                                                     |
|                                            |          | Medicinal   | Folhas e semente         | Tratamento de febre                                                           |
|                                            |          |             | Raiz                     | Tratamento de diarreia                                                        |
|                                            |          | Cosmético   | Frutos                   | Higiene e cuidado pessoal                                                     |
|                                            |          | Artesanato  | Folhas, fibras, sementes | Biojóias, utensílios de decoração e domésticos                                |
|                                            | Árvore   | Alimentício | Fruto                    | In natura ou cozido (geléias, doces)                                          |

|                                                         |          |             |                        |                                                            |
|---------------------------------------------------------|----------|-------------|------------------------|------------------------------------------------------------|
| <i>Jacaratia spinosa</i> (Aubl.) A.DC.                  |          | Medicinal   | Fruto                  | Anti-inflamatório e anti-helmíntico                        |
|                                                         |          | Artesanato  | Fruto                  | Biojóias                                                   |
| <i>Hymenopus macrophyllus</i> (Benth.) Sothers & Prance | Árvore   | Medicinal   | Casca                  | Anti-helmíntico                                            |
| <i>Macrolobium angustifolium</i> (Benth.) R.S.Cowan     | Árvore   | Medicinal   | Casca                  | Tratamento de febre                                        |
| <i>Mauritia flexuosa</i> L.f.                           | Palmeira | Alimentício | Fruto                  | In natura e culinária (geléia, farinha, suco, sobremesas)  |
|                                                         |          |             | Flor                   | Produção de açúcar e vinho                                 |
|                                                         |          |             | Palmito                | Culinária                                                  |
|                                                         |          | Medicinal   | Semente                | Tratamento de queimaduras                                  |
|                                                         |          | Cosmético   | Fruto                  | Higiene e cuidado pessoal                                  |
|                                                         |          | Artesanato  | Folhas, fruto e fibras | Biojóias, brinquedos, utensílios de decoração e domésticos |
| <i>Ormosia coutinhoi</i> Ducke                          | Árvore   | Medicinal   | Casca                  | Induzir a transpiração e tratamento para febre             |
| <i>Protium trifoliolatum</i> Engl.                      | Árvore   | Medicinal   | ----                   | -----                                                      |
| <i>Simarouba amara</i> Aubl.                            | Árvore   | Alimentício | Semente                | Óleo para panificação                                      |
|                                                         |          | Medicinal   | Folha e casca          | Tratamento de malária, febre e desinteria                  |

|                                                     |        |             |                |                                                                                       |
|-----------------------------------------------------|--------|-------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                     |        | Cosmético   | Semente        | Óleo para produção de sabonetes, lubrificantes e demais cosméticos                    |
| <i>Spondias mombin</i> L.                           | Árvore | Alimentício | Fruto          | Sucos, vitaminas, sorvetes, e outros produtos alimentícios                            |
|                                                     |        | Medicinal   | Casca e flores | Tratamento de doenças no trato digestivo, dores lombares, reumatismo e febre malárica |
| <i>Symphonia globulifera</i> L.f.                   | Árvore | Alimentício | Fruta          | <i>In natura</i>                                                                      |
|                                                     |        | Medicinal   | Casca          | Laxante, tratamento de tosse, coceiras e úlceras                                      |
| <i>Tapirira guianensis</i> Aubl.                    | Árvore | Medicinal   | Casca          | Tratamento de candidíase infantil, cortes e feridas                                   |
| <i>Vatairea guianensis</i> Aubl.                    | Árvore | Medicinal   | Casca          | Tratamento de úlcera                                                                  |
| <i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel)<br>J.F.Macbr.      | Árvore | Medicinal   | Casca          | Tratamento contra sífilis                                                             |
| <i>Mezilaurus itauba</i> (Meisn.)<br>Taub. ex Mez   | Árvore | Alimentício | Fruto          | <i>In natura</i>                                                                      |
|                                                     |        | Medicinal   | Casca          | Abortivo                                                                              |
|                                                     |        | Cosmético   | Casca          | Óleo essencial                                                                        |
| <i>Manilkara elata</i> (Allemão<br>ex Miq.) Monach. | Árvore | Alimentício | Fruto          | <i>In natura</i>                                                                      |
|                                                     |        | Artesanato  | Látex          | Borracha para produção de forma de mascar                                             |

1653 Fonte: elaborado pelos autores a partir dos dados de Fern (2025).

Na área do rio Barcarena *E. oleracea* foi indicada com espécie de alta prioridade para uso bioeconômico (Figura 4a). Por outro lado, *Parkia* sp., *T. oppositifolia* e *Vochysia maxima* Ducke foram classificadas como baixa prioridade, com valores reduzidos tanto de IVI quanto de usos. Na área do rio Murucupi não houve espécie classificada como alta prioridade, porém *M. itauba*, *S. globulifera* e *M. flexuosa* demonstraram ser relevantes devido ao número de categorias de uso (Figura 4b). *Virola surinamensis* (Rol. ex Rottb.) Warb. e *T. oppositifolia* se destacaram pelo relevante IVI, mas sem registros de uso. Na baía do rio Marajó, *Spondias mombin* L. foi identificada como alta prioridade (Figura 4c), enquanto *M. flexuosa*, *S. amara* e *J. spinosa* são relevantes pelo elevado número de categorias de uso.



**Figura 4.** Relação entre o índice de valor de importância (IVI) e o número de categorias de uso das espécies arbóreas nas áreas avaliadas sob influência do rio Barcarena (a), rio Mucurupi (b) e baía do rio Marajó (c) no município de Barcarena, Amazônia Oriental

Apenas três espécies (*Eschweilera coriacea*, *Mauritia flexuosa* e *Symphonia globulifera*) atenderam ao critério de presença mínima e, consequentemente, tiveram modelos MaxEnt válidos gerados e analisados (Tabela 2). A variável com maior peso foi declividade para *Mauritia flexuosa*, com resultado positivo, indicando que a ocorrência dessa espécie está mais relacionada a locais com maiores declividades. *Eschweilera coriacea* apresentou influência tanto do uso do solo quanto do aspecto, enquanto *Symphonia globulifera* apresentou influência do uso do solo (Tabela 2).

**Tabela 2.** Peso e direção (positiva e negativa) da influência dos preditores ambientais nos modelos de distribuição potencial das espécies selecionadas em Barcarena, Pará.

| Espécie                      | Variável        | Coefficiente do modelo MaxEnt |
|------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| <i>Eschweilera coriacea</i>  | Uso do solo     | -0,117                        |
| <i>Eschweilera coriacea</i>  | Aspecto (grau)  | -0,006                        |
| <i>Mauritia flexuosa</i>     | Declividade (m) | 0,269                         |
| <i>Symphonia globulifera</i> | Uso do solo     | -0,102                        |

Nota: MaxEnt = Máxima Entropia

### Discussão

As florestas ripárias desempenham um papel essencial não apenas na manutenção dos serviços ecossistêmicos, mas também para o sustento e na qualidade de vida das comunidades locais, que dependem desses ecossistemas para obtenção de alimentos, remédios e outras fontes de renda (Athayde et al., 2025). No entanto, em regiões fortemente influenciadas pela atividade antrópica, como o polo industrial de Barcarena, esses ecossistemas estão sob crescente pressão, tornando-se regiões de conflitos entre empresas e comunidades tradicionais do entorno (Soares et al., 2020). Por isso, destaca-se a necessidade deste estudo para avaliar o potencial de uso não-madeireiro de espécies nativas presentes em florestas ripárias, visando identificar oportunidades para o uso sustentável de recursos florestais e contribuir para a construção de estratégias que integrem conservação ambiental e geração de benefícios sociais (Oliveira et al., 2024).

Os resultados deste estudo refletiram um paradoxo entre biodiversidade e necessidade de valorização social, evidenciado pela presença de espécies de alto valor econômico e cultural, ao mesmo tempo que indicou a ausência de informações sobre espécies que podem apresentar potencial de uso. *E. oleracea* (açaí), reconhecida por ser nativa de florestas ripárias e pela importância econômica e ecológica desempenhada (Teixeira et al., 2024), foi a espécie predominante no rio Barcarena (área menos antropizada), corroborando o potencial bioeconômico de áreas conservadas, visto que a espécie é uma das principais fontes de renda da população Amazônida (Barbosa and Carvalho Junior, 2022). Além desta, a identificação de *M. flexuosa* como relevante para categoria de uso sugere que a área tem um alto potencial para o aproveitamento de produtos florestais não madeireiros (PFNMs), bem como para atividades de manejo sustentável. A espécie oferece múltiplos usos, desde a produção de artesanato a partir de suas folhas até a extração de óleos e alimentos de seus frutos (Silva et al., 2023a).

No caso do açaí, sua crescente demanda tem impulsionado a conversão de áreas naturais ou de usos diversificados em monocultivos da espécie, resultando na perda de biodiversidade da floresta (Freitas et al., 2021). Nesse contexto, o manejo de mínimo impacto é uma estratégia relevante, pois integra práticas que conciliam produção com conservação, sem prejuízos para a estrutura da vegetação (Silva et al., 2023b). Já no caso de *M. flexuosa*, a constância da espécie entre as dez mais importantes em todas as áreas analisadas, inclusive nas zonas de maior influência antrópica, aponta para sua capacidade de persistência e adaptação em ambientes sujeitos a distúrbios (Almeida et al., 2024; Kahn et al., 1993). A presença dessa espécie pode ser interpretada como um sinal de resiliência ecológica dos ecossistemas ripários, cuja estrutura florística ainda mantém características de estabilidade mesmo diante da transformação da paisagem. Esse padrão é coerente com a literatura que reconhece a espécie como tolerante à perturbação hidrológica e antrópica, com alta capacidade de regeneração e múltiplos usos econômicos (Kahn et al., 1993).

*M. flexuosa* e *E. oleracea*, além de desempenharem papéis ecológicos importantes, oferecem oportunidades econômicas que podem ser integradas a estratégias de desenvolvimento sustentável (Freitas et al., 2024). Além da importância bioeconômica, a análise dos fatores ambientais que orientam a distribuição das espécies, como a declividade para *M. flexuosa*, é ecologicamente coerente com a literatura, que frequentemente associa a espécie a gradientes topográficos sutis, onde maiores declividades podem indicar uma drenagem eficiente do solo, reduzindo a saturação hídrica e otimizando o suprimento de água e nutrientes, especialmente em áreas de transição ripária (Almeida et al., 2024; Kahn et al., 1993).

Em relação às espécies arbóreas, a resina obtida da *S. globulifera* (Lukubye et al., 2023) e os óleos essenciais de *V. surinamensis* (Ferreira et al., 2022) têm propriedades medicinais e pode ser utilizada na produção de fármacos e cosméticos (Tabela 2). Por outro lado, embora os resultados indiquem a presença de espécies importantes em termos ecológicos e econômicos, o avanço desordenado da industrialização, da infraestrutura portuária e da urbanização no município de Barcarena impõe sérios riscos à biodiversidade, conforme observado por Ritter et al. (2017) em outros locais da Amazônia. Neste estudo, a influência negativa do uso do solo observada para *Eschweilera coriacea* e *Symphonia globulifera* sugere que a ocorrência dessas espécies está significativamente reduzida ou comprometida nas classes em áreas antropizadas. Portanto, este estudo indica a sensibilidade dessas espécies à perturbação dos ecossistemas, indicando que a manutenção da integridade da cobertura vegetal ripária é

um fator crucial para a sua conservação. Especificamente, *E. coriacea* também apresentou ligeira preferência por áreas com menor exposição solar ou em gradientes específicos, reforçando a importância dos fatores topográficos microclimáticos.

No entanto, a limitação de informações sobre espécies arbóreas nativas da Amazônia dificulta estratégias de manejo de produtos florestais não madeireiros, conforme evidenciado neste estudo para *Diospyros* sp., *Hymenaea* sp., *Parkia* sp., *T. oppositifolia*, *V. surinamensis*, *V. maxima* e *Zygia ampla*, as quais não apresentaram registros de uso nas categorias consideradas. Estas espécies podem representar recursos subutilizados ou com potencial ainda não documentado. Por exemplo, um aspecto relevante observado neste estudo foi o registro de usos alimentício, medicinal e cosmético da *Mezilaurus itauba* (itaúba), que é amplamente explorada por sua madeira de alta durabilidade, muito valorizada na construção civil e na fabricação de móveis de luxo, ultrapassando R\$ 4.000,00 por metro cúbico de madeira serrada no mercado (Pará, 2016). Todavia, a espécie é considerada vulnerável e a exploração pode comprometer severamente a regeneração natural e acelerar o risco de extinção. Por isso, este estudo auxilia na reflexão sobre a relação custo-benefício, considerando que os potenciais usos não madeireiros, como a extração de óleos, preparados medicinais e produtos cosméticos, podem gerar fluxos de renda contínuos e sustentáveis, sem a necessidade de eliminar indivíduos reprodutivos da população natural. Dessa forma, a valorização econômica da itaúba não deve estar associada exclusivamente à exploração madeireira, mas também ao fortalecimento de cadeias produtivas baseadas em PFNMs, que priorizem a conservação da espécie e garantam retorno econômico às comunidades locais a longo prazo.

A identificação das categorias de uso, neste estudo, baseou-se em registros etnobotânicos disponíveis, mas a inclusão do conhecimento tradicional local pode ampliar a compreensão sobre o valor das espécies. Comunidades tradicionais detêm saberes fundamentais sobre manejo sustentável, usos medicinais e formas de processamento dos PFNMs (Vieira, 2023). Dessa maneira, a integração desse conhecimento à ciência, respeitando os protocolos éticos de repartição de benefícios previstos na Convenção sobre Diversidade Biológica (Brasil, 1994), pode fortalecer estratégias de conservação participativa e desenvolvimento sustentável. Isso foi corroborado pela predominância da categoria medicinal (Tabela 2, Figura 3) com estudos realizados em comunidades amazônicas, nos quais as plantas medicinais são amplamente utilizadas devido ao acesso limitado a serviços de saúde e à forte tradição de conhecimento etnobotânico local (Homma, 2014).

A categoria alimentícia, atribuída a 11 espécies (Tabela 2, Figura 3), evidenciou o papel das florestas ripárias na segurança alimentar das comunidades ribeirinhas e urbanas próximas. No entanto, presença de múltiplas atividades antrópicas no polo industrial de Barcarena eleva consideravelmente o risco de contaminação ambiental, principalmente por metais pesados e compostos orgânicos persistentes (Matos et al., 2023), os quais podem comprometer a utilização de produtos não-madeireiros para o uso alimentício. Sendo assim, este estudo alerta para a necessidade de realização de análises químicas detalhadas, incluindo teores de metais pesados no solo, na água e nos tecidos vegetais, bem como testes de fitotoxicidade e biomonitoramento, a fim de avaliar os riscos à saúde pública e à segurança alimentar da população.

As espécies identificadas como de alta prioridade tanto para IVI quanto para bioeconomia neste estudo, e aquelas com maior potencial de distribuição, como indicado pelos modelos MaxEnt, podem ser integradas a modelos de restauração ecológica produtiva, nos quais a recuperação de funções ecológicas é aliada à geração de benefícios econômicos para populações locais (Borchardt et al., 2023). A utilização de espécies nativas adaptadas, ou seja, aquelas que demonstraram resiliência ou preferência por fatores ecológicos específicos, como a *M. flexuosa* em declividade, para projetos de reflorestamento em áreas com alto grau de perturbação, especialmente aquelas com alto IVI e valor bioeconômico, representa uma estratégia promissora para ampliar a eficácia de programas de restauração e, simultaneamente, fomentar atividades produtivas baseadas em PFNMs na Amazônia. A adoção desse tipo de abordagem pode facilitar o engajamento comunitário e a sustentabilidade financeira de iniciativas de recuperação ambiental. Por isso, estudos etnobotânicos participativos com comunidades locais destacam-se como indispensáveis para divulgar conhecimentos tradicionais ainda não registrados, fortalecendo o vínculo entre ciência e manejo sustentável (Oliveira et al., 2024).

Os resultados deste estudo sugerem oportunidades voltadas ao fortalecimento de cadeias de valor baseadas em PFNMs, muitas vezes subvalorizadas em contextos amazônicos industrializados. A integração entre conservação, uso sustentável da biodiversidade e restauração ecológica é crucial para o futuro das florestas ripárias amazônicas, especialmente em regiões como Barcarena, onde os desafios socioambientais são complexos. Na prática, os resultados deste estudo podem subsidiar estratégias de manejo florestal que conciliem o aproveitamento econômico com a manutenção da integridade ecológica. No Pará, o desenvolvimento e a implementação de

políticas públicas como o Plano Estadual de Bioeconomia do Pará (PlanBio - Pará) e as diretrizes da Estratégia Estadual de Bioeconomia do Pará oferecem oportunidade para consolidar esses modelos integrados de uso e conservação (Mascarenhas et al., 2024), desde que sejam estimuladas a diversificação da produção e a consolidação de cadeias produtivas (Rosenfeld et al., 2024). Para isso, a conexão entre ciência, políticas públicas e sociedade civil será fundamental para garantir que o potencial bioeconômico das florestas ripárias seja plenamente aproveitado, sem comprometer sua função ecológica e seu papel na mitigação das desigualdades socioambientais amazônicas.

### Conclusão

A presença de espécies nativas com elevado valor ecológico e socioeconômico, como *Euterpe oleracea*, *Mauritia flexuosa* e *Symphonia globulifera*, destaca o potencial das áreas ripárias sob influência antrópica para o manejo sustentável de produtos florestais não madeireiros. As espécies com maior valor de importância, associadas a usos alimentares, medicinais e cosméticos, reforçam a relevância bioeconômica da vegetação nativa e sua capacidade de gerar alternativas sustentáveis de renda. A Modelagem de Distribuição Potencial revelou que a declividade demonstrou ser o principal preditor para a *M. flexuosa*, enquanto o uso do solo apresentou influência negativa significativa para as espécies arbóreas *Eschweilera coriacea* e *Symphonia globulifera*, ressaltando o risco que o avanço antrópico impõe à manutenção dessas populações. Portanto, observou-se que mesmo em áreas antropizadas é possível manter espécies-chave com potencial de uso múltiplo, indicando que estratégias de restauração produtiva podem aliar conservação da biodiversidade e geração de renda para populações locais. Todavia, em polos industriais cercados de atividades antrópicas, tem-se a necessidade de testes de fitotoxicidade para garantir segurança no consumo da população.

### Referências

Almeida, T. da S., Ribeiro, L.M., Martins, C. de P.S., Barbosa, T.L., Mercadante-Simões, M.O., de Oliveira Vieira, E., Nunes, Y.R.F., Lopes, P.S.N., 2024. Structural and physiological responses to water availability provide insights into the maintenance of *Mauritia flexuosa* (Arecaceae) seedling banks. *For. Ecol. Manage.* 561, 121881. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121881>

- 1838   Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., De Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G.,  
1839       2013. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorol. Zeitschrift 22, 711–  
1840       728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- 1841   Araujo, E.C.G., Silva, T.C., da Cunha Neto, E.M., Favarin, J.A.S., da Silva Gomes, J.K.,  
1842       das Chagas, K.P.T., Fiorelli, E.C., Sonsin, A.F., Maia, E., 2024. Bioeconomy in the  
1843       Amazon: Lessons and gaps from thirty years of non-timber forest products research.  
1844       J. Environ. Manage. 370, 122420. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122420>
- 1845   Athayde, S., Utsunomiya, R., Victoria-Lacy, L., Beveridge, C., Jenkins, C.N., Laufer, J.,  
1846       Heilpern, S., Olivas, P., Anderson, E.P., 2025. Interdependencies between  
1847       Indigenous peoples, local communities, and freshwater systems in a changing  
1848       Amazon. Conserv. Biol. 39. <https://doi.org/10.1111/cobi.70034>
- 1849   Barbosa, J.R., Carvalho Junior, R.N. de, 2022. Food sustainability trends - How to value  
1850       the açaí production chain for the development of food inputs from its main bioactive  
1851       ingredients? Trends Food Sci. Technol. 124, 86–95.  
1852       <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.005>
- 1853   Borchardt, K.E., Kadelka, C., Schulte, L.A., Toth, A.L., 2023. An ecological networks  
1854       approach reveals restored native vegetation benefits wild bees in agroecosystems.  
1855       Biol. Conserv. 287, 110300. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110300>
- 1856   Brasil, 1994. Decreto Legislativo no 2, de 1994. Aprova o texto do Convenção sobre  
1857       Diversidade Biológica, assinada durante a Conferência das Nações Unidas sobre  
1858       Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada na Cidade do Rio de Janeiro, no  
1859       período de 5 a 14 de junho de 1992.
- 1860   Caldas, B., Thieme, M.L., Shahbol, N., Coelho, M.E., Grill, G., Van Damme, P.A.,  
1861       Aranha, R., Cañas, C., Fagundes, C.K., Franco-León, N., Herrera-Collazos, E.E.,  
1862       Jézéquel, C., Montoya, M., Mosquera-Guerra, F., Oliveira-da-Costa, M.,  
1863       Paschoalini, M., Petry, P., Oberdorff, T., Trujillo, F., Tedesco, P.A., de Brito  
1864       Ribeiro, M.C.L., 2023. Identifying the current and future status of freshwater  
1865       connectivity corridors in the Amazon Basin. Conserv. Sci. Pract. 5.  
1866       <https://doi.org/10.1111/csp2.12853>
- 1867   Dinca, L., Murariu, G., Lupoae, M., 2025. Understanding the Ecosystem Services of  
1868       Riparian Forests: Patterns, Gaps, and Global Trends. Forests 16, 947.  
1869       <https://doi.org/10.3390/f16060947>

- 1870 Dormann, C.F., Frund, J., Bluthgen, N., Gruber, B., 2009. Indices, Graphs and Null  
1871 Models: Analyzing Bipartite Ecological Networks. *Open Ecol. J.* 2, 7–24.  
1872 <https://doi.org/10.2174/1874213000902010007>
- 1873 Fern, K., 2025. Useful Tropical Plants Database [WWW Document]. URL  
1874 <https://tropical.theferns.info/refs.php> (accessed 5.20.25).
- 1875 Ferreira, O.O., Cruz, J.N., de Moraes, Â.A.B., de Jesus Pereira Franco, C., Lima, R.R.,  
1876 Anjos, T.O. dos, Siqueira, G.M., Nascimento, L.D. do, Cascaes, M.M., de Oliveira,  
1877 M.S., Andrade, E.H. de A., 2022. Essential oil of the plants growing in the Brazilian  
1878 Amazon: chemical composition, antioxidants, and biological applications.  
1879 *Molecules* 27, 4373. <https://doi.org/10.3390/molecules27144373>
- 1880 Freitas, L.C., Santos, R.W.S. dos, Reis, F.R., Haminiuk, C.W.I., Corazza, M.L., Masson,  
1881 M.L., 2024. Green extraction technologies: A path to the Amazon bioeconomy  
1882 development. *Trends Food Sci. Technol.* 147, 104462.  
1883 <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104462>
- 1884 Freitas, M.A.B., Magalhães, J.L.L., Carmona, C.P., Arroyo-Rodríguez, V., Vieira, I.C.G.,  
1885 Tabarelli, M., 2021. Intensification of açaí palm management largely impoverishes  
1886 tree assemblages in the Amazon estuarine forest. *Biol. Conserv.* 261, 109251.  
1887 <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109251>
- 1888 Garrett, R., Ferreira, J., Abramovay, R., Brandão, J., Brondizio, E., Euler, A., Pinedo, D.,  
1889 Porro, R., Cabrera Rocha, E., Sampaio, O., Schmink, M., Torres, B., Varese, M.,  
1890 2024. Transformative changes are needed to support socio-bioeconomies for people  
1891 and ecosystems in the Amazon. *Nat. Ecol. Evol.* 8, 1815–1825.  
1892 <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02467-9>
- 1893 Hijmans, R.J., 2020. terra: Spatial Data Analysis. CRAN Contrib. Packag.  
1894 <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.terra>
- 1895 Hollister, J., 2017. elevatr: Access Elevation Data from Various APIs. CRAN Contrib.  
1896 Packag. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.elevatr>
- 1897 Homma, A.K.O., 2014. Extrativismo vegetal na Amazônia: história, ecologia, economia  
1898 e domesticação. Embrapa, Brasília, DF.
- 1899 IBGE, I.B. de G. e E., 2012. Manual técnico da vegetação brasileira, Second. ed. Rio de  
1900 Janeiro.
- 1901 IUCN, International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. (2025).  
1902 The IUCN Red List of Threatened Species. Accessed in Jan 15 2025.

- 1903 Kahn, F., Mejía, K., Moussa, F., Gómez, D., 1993. *Mauritia flexuosa*, la más acuática de  
1904 las palmeras amazónicas, in: *Las Plantas Vasculares En Las Aguas Continentales*  
1905 *Del Perú*. IFEA, Lima. Instituto Francés de Estudios Andinos, Lima - Peru, pp. 287–  
1906 308.
- 1907 Lukubye, B., Wangalwa, R., Kagoro-Rugunda, G., 2023. Traditional uses,  
1908 ethnopharmacology, antibacterial and antiparasitic activities of *Symphonia* spp. *J.*  
1909 *Herb. Med.* 39, 100666. <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2023.100666>
- 1910 Luo, Y., Yang, J., Liu, L., Zhang, K., 2025. MaxEnt Modeling and Effects of Climate  
1911 Change on Shifts in Habitat Suitability for *Sorbus alnifolia* in China. *Plants* 14, 677.  
1912 <https://doi.org/10.3390/plants14050677>
- 1913 MapBiomias, 2024. Cobertura e uso da terra [WWW Document]. URL  
1914 [https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura?activeBaseMap=9&layersOpacity=100&activeModule=coverage&activeModuleContent=coverage%3Acoverage\\_](https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura?activeBaseMap=9&layersOpacity=100&activeModule=coverage&activeModuleContent=coverage%3Acoverage_main&activeYear=2022&mapPosition=-12.361466%2C-49.504395%2C5&timelineLimitsRange=1985%2C2022&baseParams[terri)  
1915 [main&activeYear=2022&mapPosition=-12.361466%2C-](https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura?activeBaseMap=9&layersOpacity=100&activeModule=coverage&activeModuleContent=coverage%3Acoverage_main&activeYear=2022&mapPosition=-12.361466%2C-49.504395%2C5&timelineLimitsRange=1985%2C2022&baseParams[terri)  
1916 [49.504395%2C5&timelineLimitsRange=1985%2C2022&baseParams\[terri](https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura?activeBaseMap=9&layersOpacity=100&activeModule=coverage&activeModuleContent=coverage%3Acoverage_main&activeYear=2022&mapPosition=-12.361466%2C-49.504395%2C5&timelineLimitsRange=1985%2C2022&baseParams[terri)  
1917 (accessed 2.1.24).
- 1918
- 1919 Martinelli G, Moraes MA (2013) *Livro vermelho da flora do Brasil*. Instituto de Pesquisas  
1920 Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Centro Nacional de Conservação da Flora, Rio  
1921 de Janeiro
- 1922 Mascarenhas, D.F., Paes, A. de M.P., Farias, L. de M., Faria, T.L.M., 2024. Minimum  
1923 Price Guarantee for Sociobiodiversity Products in Pará, Brazil. *Rev. Adm. Contemp.*  
1924 28. <https://doi.org/10.1590/1982-7849rac2024240186.en>
- 1925 Maspons, J., Padgham, M., Rudis, B., Lovelace, R., Salmon, M., 2017. osmdata: Import  
1926 “OpenStreetMap” Data as Simple Features or Spatial Objects. *CRAN Contrib.*  
1927 *Packag.* <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.osmdata>
- 1928 Matos, G.S.B. de, Brasil Neto, A.B., Gama, M.A.P., Gonçalves, D.A.M., Cardoso,  
1929 D.F.S.R., Ramos, H.M.N., 2023. Soil potentially toxic element contents in an area  
1930 under different land uses in the Brazilian Amazon. *Heliyon* 9, e17108.  
1931 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17108>
- 1932 Metz, C.E., 1978. Basic principles of ROC analysis. *Semin. Nucl. Med.* 8, 283–298.  
1933 [https://doi.org/10.1016/S0001-2998\(78\)80014-2](https://doi.org/10.1016/S0001-2998(78)80014-2)
- 1934 Müeller-Dombois, D., Ellenberg, H., 1974. *Aims and Methods of Vegetation Ecology*.  
1935 New York.

- 1936 Nahum, J.S., 2017. Modernization and Political Actions in the Brazilian Amazon,  
1937 SpringerBriefs in Latin American Studies. Springer International Publishing, Cham.  
1938 <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58030-2>
- 1939 Narayanan, A., Cohen, S., Gardner, J.R., 2024. Riverine sediment response to  
1940 deforestation in the Amazon basin. *Earth Surf. Dyn.* 12, 581–599.  
1941 <https://doi.org/10.5194/esurf-12-581-2024>
- 1942 Njomaba, E., Aikins, B.E., Surovy, P., 2025. Mapping species distribution and estimating  
1943 population abundance of dominant forest tree species in Ghana: implications for  
1944 conservation prioritization. *Trees, For. People* 22, 101019.  
1945 <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.101019>
- 1946 Nowacki, D.J., Ogston, A.S., Nittrouer, C.A., Fricke, A.T., Asp, N.E., Souza Filho,  
1947 P.W.M., 2019. Seasonal, tidal, and geomorphic controls on sediment export to  
1948 Amazon River tidal floodplains. *Earth Surf. Process. Landforms* 44, 1846–1859.  
1949 <https://doi.org/10.1002/esp.4616>
- 1950 Oliveira, F.S. de, Hell, G., Rocha, J. das D. de S., 2022. Produção da extração vegetal e  
1951 da silvicultura de fibras no Brasil. *Rev. Adm. e Negócios da Amaz.* 13, 121–140.  
1952 <https://doi.org/10.18361/2176-8366/rara.v13n4p121-140>
- 1953 Oliveira, P.M.C., Sousa, J.P.B., Albernaz, L.C., Salmen Espindola, L., Coelho-Ferreira,  
1954 M., 2024. Natural resources used in the traditional medicine of the Marinaú  
1955 community, Caxiuanã forest, Brazil. *Front. Pharmacol.* 15.  
1956 <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1443360>
- 1957 Pará, S. de E. de M.A. do P., 2016. Beneficiamento e comércio de produtos da madeira  
1958 por espécie florestal. Belém.
- 1959 Phillips, S., 2016. maxnet: Fitting “Maxent” Species Distribution Models with “glmnet.”  
1960 CRAN Contrib. Packag. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.maxnet>
- 1961 PRODES, 2024. Monitoramento do desmatamento da floresta amazônica brasileira por  
1962 satélite [WWW Document]. URL  
1963 <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes> (accessed  
1964 4.25.24).
- 1965 RADAMBRASIL, 1974. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial  
1966 da terra. Folha SA. 22. Rio de Janeiro.
- 1967 Ritter, C.D., McCrate, G., Nilsson, R.H., Fearnside, P.M., Palme, U., Antonelli, A., 2017.  
1968 Environmental impact assessment in Brazilian Amazonia: Challenges and prospects

- 1969 to assess biodiversity. *Biol. Conserv.* 206, 161–168.
- 1970 <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.12.031>
- 1971 Rosenfeld, T., Pokorny, B., Marcovitch, J., Poschen, P., 2024. Bioeconomy based on non-
- 1972 timber forest products for development and forest conservation - untapped potential
- 1973 or false hope? A systematic review for the Brazilian amazon. *For. Policy Econ.* 163,
- 1974 103228. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2024.103228>
- 1975 Salviano, I.R., Gardon, F.R., dos Santos, R.F., 2021. Ecological corridors and landscape
- 1976 planning: a model to select priority areas for connectivity maintenance. *Landsc.*
- 1977 *Ecol.* 36, 3311–3328. <https://doi.org/10.1007/s10980-021-01305-8>
- 1978 Silva, J.S.P., Rodrigues, J.I. de M., Ferreira, G.C., Santos, D.R.S., Gomes, T.L., Martins,
- 1979 W.B.R., 2023. Manejo de mínimo impacto para a produção de Açaí na Amazônia.
- 1980 *Biodiversidade Bras.* 13.
- 1981 <https://doi.org/10.37002/biodiversidadebrasileira.v13i1.2213>
- 1982 Silva, N.R.R. do N., Cavalcante, R.B.M., Silva, F.A. da, 2023. Nutritional properties of
- 1983 Buriti (*Mauritia flexuosa*) and health benefits. *J. Food Compos. Anal.* 117, 105092.
- 1984 <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.105092>
- 1985 Soares, P.P., Hazeu, M.T., Corrêa, S. de A., 2020. A judicialização de conflitos socio
- 1986 ambientais na Amazônia rural e urbana: experiências com termos de ajustamento de
- 1987 conduta em Barcarena e Belém (PA). *Mediações - Rev. Ciências Sociais* 25, 449.
- 1988 <https://doi.org/10.5433/2176-6665.2020v25n2p449>
- 1989 Teixeira, B., Teixeira, G., Darnet, E., Schaller, H., Rogez, H., Darnet, S., 2024. A review
- 1990 of the genus *Euterpe* : botanical and genetic aspects of açaí, the purple gold of the
- 1991 Amazon. *Bot. J. Linn. Soc. boae060*. <https://doi.org/10.1093/botlinnean/boae060>
- 1992 Verdonschot, P.F.M., Verdonschot, R.C.M., 2023. Ecological Functions and
- 1993 Management of Large Wood in Fluvial Systems. *Curr. For. Reports* 10, 39–55.
- 1994 <https://doi.org/10.1007/s40725-023-00209-x>
- 1995 Vieira, P., 2023. Introduction. The Amazon River Basin: Extractivism, Indigenous
- 1996 Perspectives, and a Political Aesthetics of Resistance. *J. Lat. Am. Cult. Stud.* 32,
- 1997 177–183. <https://doi.org/10.1080/13569325.2023.2228720>
- 1998

## Capítulo IV

### DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO CARBONO AÉREO DE ESPÉCIES COM POTENCIAL DE USO NÃO MADEIREIRO EM UM POLO INDUSTRIAL DA AMAZÔNIA ORIENTAL

Spatial distribution of aboveground carbon of species with non-timber use potential in an industrial hub of the Eastern Amazon

Submetido na revista Journal For Nature Conservation\*

Métricas da revista: Qualis A3, Percentil Scopus 70%

\* A formatação de citação e referências deste artigo segue as normas da revista

#### Resumo gráfico



#### Resumo

Embora florestas ripárias amazônicas desempenhem papel fundamental no armazenamento de carbono acima do solo, a distribuição espacial desses estoques resulta da interação entre fatores ambientais e antrópicos ainda pouco integrados em análises espaciais em escala local. Este estudo teve como objetivo avaliar a distribuição espacial do estoque de carbono acima do solo, associado à presença de espécies com potencial bioeconômico, em florestas ripárias em um polo industrial na Amazônia. Com isso, foi ajustado um Modelo Linear Generalizado (GLM) para avaliar a relação entre os estoques de carbono e as variáveis ambientais, e um modelo Random Forest (RF) para predição

especial com base nas variáveis topográficas significativas. A autocorrelação espacial foi avaliada pelo índice global de Moran. Os estoques de carbono acima do solo apresentaram elevada variabilidade espacial ( $36,60 \pm 48,10 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ), com forte assimetria nos valores. O GLM indicou que apenas a elevação exerceu influência significativa sobre o carbono aéreo, enquanto declividade, aspecto do terreno e classes de uso e cobertura do solo não apresentaram associação estatisticamente significativa. O teste I de Moran revelou ausência de autocorrelação espacial significativa, sugerindo distribuição espacial próxima da aleatoriedade. O RF apresentou baixo desempenho preditivo, embora os mapas derivados tenham evidenciado gradientes espaciais coerentes, com maiores estoques associados a áreas de maior elevação. Os resultados indicaram que, em paisagens ripárias amazônicas, o carbono acima do solo é controlado predominantemente por gradientes ambientais de elevação, enquanto classificações amplas de uso do solo apresentam capacidade limitada para explicar sua variabilidade.

**Palavras-chave:** geoestatística; Random Forest; bioeconomia.

## Introdução

O aumento da demanda por recursos naturais intensifica a mudança de uso e cobertura do solo e, conseqüentemente, levando à degradação de ecossistemas e ao acúmulo de 1/3 do CO<sub>2</sub> da atmosfera (Gao et al., 2020). Em todo o mundo foram perdidos, mais de 5,5 milhões de hectares em 5 anos (2010 - 2015), sendo que a cada hectare desflorestado tem-se uma perda de 100 a 200 tonC ha<sup>-1</sup> (Houghton and Hackler, 1999). As alterações no uso e cobertura do solo ocasionam prejuízos para o carbono estocado em longo prazo, seja na agricultura (Bell et al., 2023), pecuária (Carvalho et al., 2019), mineração (Yuan et al., 2023) ou urbanização desordenada (Chang et al., 2024). Na Amazônia, o município de Barcarena, localizado no estado do Pará, destaca-se como um dos principais polos agroindustriais da região, concentrando estas atividades, além de atividades industriais, portuárias e lazer (Wegner and Fernandes, 2023).

A instalação e expansão de grandes empreendimentos resulta em mudanças substanciais no uso da terra, com a substituição de florestas nativas por infraestrutura urbana, redes de transporte, aterros industriais e áreas de disposição de resíduos (Delaroche et al., 2023). Conseqüentemente, tem-se a fragmentação e eliminação de ecossistemas ripários, os quais desempenham um papel crucial no ciclo global do carbono, atuando como sumidouros importantes que capturam e armazenam carbono na biomassa aérea (Sutfin et al., 2016). Além disso, a supressão de formações florestais pode

levar à liberação de quantidades expressivas de carbono, dificultando, consequentemente a sua posterior recomposição (Baskerville et al., 2021; Dinca et al., 2025; Li et al., 2024).

Em escalas locais, especialmente em paisagens ripárias amazônicas, a distribuição espacial dos estoques de carbono acima do solo é mais condicionada por fatores edáficos, topográficos e pelo uso e cobertura do solo do que por variáveis climáticas (Castilho et al., 2006), pois estes últimos apresentam baixa variabilidade espacial na Amazônia Oriental (Correa-Guamán et al., 2025). Variáveis topográficas, como elevação, declividade e aspecto, exercem influência direta sobre a hidrologia do solo, frequência de inundação, deposição de sedimentos e disponibilidade de nutrientes, fatores ambientais determinantes para o crescimento e a estrutura da vegetação ripária (Bispo et al., 2009). De forma complementar, o uso do solo reflete pressões antrópicas diretas, como desmatamento, fragmentação e conversão da vegetação nativa, que afetam imediatamente a cobertura do solo, a biomassa arbórea e, consequentemente, os estoques de carbono (Bhan et al., 2021).

Para avaliar os impactos ambientais, o uso de ferramentas geoespaciais permite análises detalhadas da variação espacial de processos ecológicos (Vatandaşlar and Abdikan, 2022). Em particular, as técnicas de sensoriamento remoto e os sistemas de informações geográficas têm se mostrado indispensáveis para mapear estoques de carbono e identificar áreas críticas impactadas por atividades antrópicas (Corenblit et al., 2024). Adicionalmente, tem-se explorado modelos preditivos que combinam variáveis geoespaciais com dados de campo para estimar estoques de carbono ou biomassa florestal (Ahmad et al., 2023; Ho et al., 2024). Esses modelos, frequentemente baseados em aprendizado de máquina ou estatísticas espaciais, têm demonstrado potencial para identificar zonas prioritárias de carbono e prever áreas mais vulneráveis às alterações ambientais (Xu et al., 2025).

No entanto, ainda há uma lacuna no entendimento sobre como os estoques de carbono acima do solo se distribuem espacialmente em função dos tipos de uso do solo e da topografia local, principalmente devido à concentração de estudos voltados ao carbono orgânico do solo. Em florestas tropicais, os estoques de carbono acima do solo são determinados por um subconjunto reduzido de espécies estruturalmente dominantes, que concentram a maior parte da biomassa arbórea (Fauset et al., 2015). Portanto, compreender como ocorre a distribuição do estoque de carbono da biomassa acima do solo é fundamental para identificar áreas prioritárias para conservação e restauração de paisagens ripárias amazônicas.

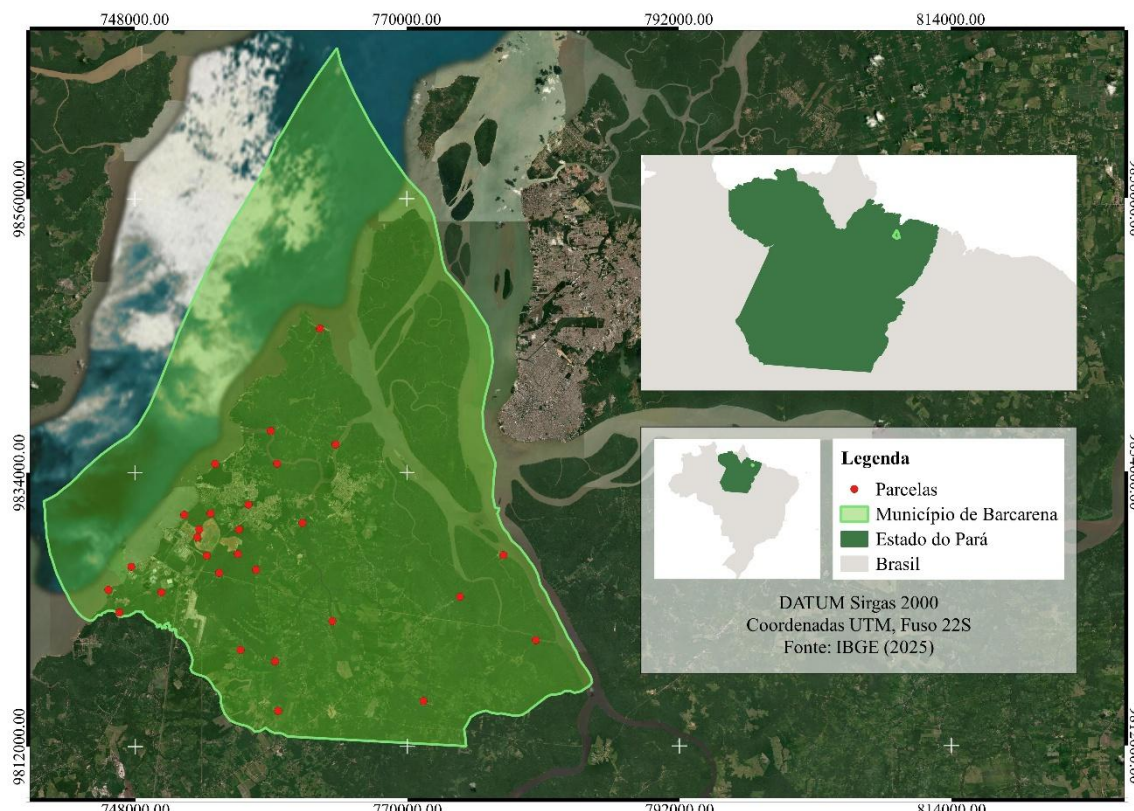
Em um estudo piloto realizado no polo industrial de Barcarena, Amazônia Oriental (ainda não publicado), foram identificadas 17 espécies arbóreas e palmeiras com potencial de uso não madeireiro. Com base nisso, esta pesquisa aborda, em escala espacial mais ampla, estas espécies, pois representam uma interface estratégica entre conservação da biodiversidade, mitigação das mudanças climáticas e geração de renda local, sendo frequentemente apontadas como elementos-chave para iniciativas de bioeconomia na Amazônia (Araujo et al., 2024).

Dessa maneira, buscou-se responder: como o uso do solo e variáveis topográficas influenciam a distribuição espacial dos estoques de carbono da biomassa aérea de espécies com potencial bioeconômico em paisagens ripárias de Barcarena, Amazônia Oriental? A hipótese testada foi a de que os estoques de carbono acima do solo associados a espécies com potencial bioeconômico apresentam distribuição espacial heterogênea em paisagens ripárias de Barcarena, sendo maiores em áreas com menor intensidade de uso antrópico e controlados principalmente por variáveis ambientais e de uso do solo. Sendo assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a distribuição espacial do estoque de carbono acima do solo associado a espécies com potencial bioeconômico em florestas ripárias do município de Barcarena.

## **Material e métodos**

### ***Área de estudo***

O estudo foi desenvolvido no município de Barcarena, Pará, Amazônia Oriental (01°30'21" S; 48°37'33" W; Figura 1), que apresenta clima do tipo tropical úmido, de acordo com Köppen (Alvares et al., 2013). Os solos são predominantemente do tipo Latossolos Vermelho-Amarelo Distróficos, Podzol Hidromórfico e Concrecionário Laterítico (RADAMBRASIL, 1974). A vegetação natural é classificada como Floresta Ombrófila Densa (IBGE, 2012), porém foi descaracterizada pela ocupação humana, especialmente pela expansão industrial na região (MapBiomass, 2024).



**Figura 1.** Localização do município de Barcarena, Pará, Amazônia Oriental, e distribuição espacial dos pontos amostrais

### *Seleção de espécies*

A seleção das espécies analisadas neste estudo foi baseada em um levantamento florístico e em uma avaliação do potencial bioeconômico conduzidos de forma independente na mesma área de estudo, em um estudo piloto. As áreas amostrais foram definidas ao longo dos três principais corpos hídricos no município de Barcarena, Pará, que representam um gradiente de intensidade de intervenção antrópica e distintos padrões de uso e ocupação do solo, sendo eles: rio Murucupi, baía do rio Marajó e rio Barcarena (Figura 1 – Capítulo II). Nesse levantamento, quatro parcelas de 25 m × 100 m foram estabelecidas em cada área, e todos os indivíduos arbóreos, arbustivos e palmeiras com diâmetro à altura do peito (DAP)  $\geq 3,82$  cm foram inventariados. Este limite de DAP foi adotado para incluir as palmeiras e outros indivíduos de pequeno diâmetro, típicos de florestas ripárias, que seriam sub-representados usando limiares mais convencionais (por exemplo, 5 a 10 cm).

A importância ecológica das espécies foi avaliada por meio do Índice de Valor de Importância (IVI), calculado a partir da densidade, frequência e dominância relativas (Müeller-Dombois and Ellenberg, 1974). Adicionalmente, as espécies com maior IVI

foram classificadas quanto ao seu status de conservação com base nos critérios da IUCN (2025) e em listas nacionais de referência. O potencial de uso não madeireiro foi determinado a partir de consulta ao banco de dados Useful Tropical Plants (Fern, 2025), complementada por revisão da literatura técnico-científica, permitindo a classificação das espécies em diferentes categorias de uso, incluindo alimentação, uso medicinal ou farmacêutico, cosmético e artesanato. Com base nesses critérios, foram priorizadas as espécies que apresentaram maior valor de IVI, múltiplas categorias de uso e/ou status de conservação. A partir desse procedimento, foi definido um conjunto de espécies com potencial de uso não madeireiro, o qual foi utilizado no presente estudo exclusivamente para avaliar sua contribuição aos estoques e à distribuição espacial do carbono acima do solo (Tabela 2 – Capítulo III).

#### **Coleta de dados em campo e estimativa de carbono acima do solo**

Após o estudo piloto, a área amostral foi ampliada, instalando-se 28 parcelas de 25 m x 100 m distribuídas no município (Figura 1). Em cada parcela mensurou-se o Diâmetro a Altura do Peito, obtido a 1,30 da superfície do solo (DAP) e estimou-se a altura total (Ht) por meio do método bastão de Biltmore, de indivíduos referentes às espécies selecionadas. Indivíduos não pertencentes à família Arecaceae tiveram biomassa acima do solo estimada em por meio da equação alométrica pan-tropical de Chave et al. (2014), que utiliza informações de diâmetro, altura e densidade da madeira (Eq. 1). A densidade da madeira de cada espécie foi a média obtida a partir dos dados Neotropicais do Global Wood Density Database de Chave et al. (2009), após a identificação das espécies *in situ*.

No caso das palmeiras *Euterpe oleracea* Mart. (Eq. 2) e *Mauritia flexuosa* L.f. (Eq. 3), a estimativa foi realizada por meio de equações específicas propostas por Goodman et al. (2013). Para obtenção do estoque de carbono, o resultado da biomassa acima do solo estimada em Mg foi extrapolado para Mg ha<sup>-1</sup> e multiplicado pelo fator de conversão 0,47, proposto pelo IPCC (2006).

$$BAS = 0,0673 * (\rho D^2 H)^{0,976} \quad (1)$$

$$BAS = -108,81 + 13,589H \quad (2)$$

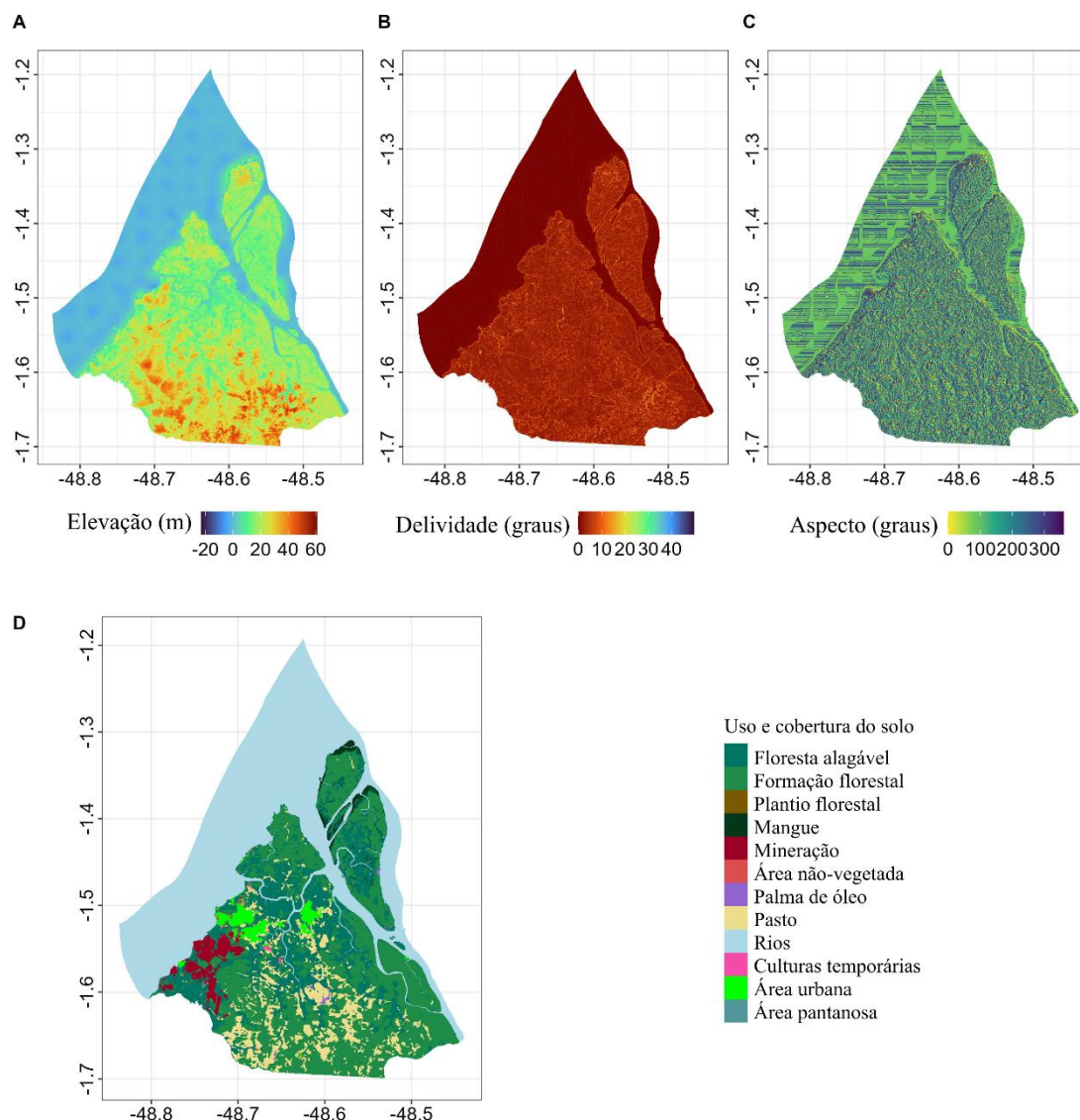
$$BAS = e^{(2,4647 + 1,3777 \ln(H))} \quad (3)$$

Onde: BAS = Biomassa acima do solo (Mg);  $\rho$  = Densidade específica da madeira ( $\text{g cm}^{-3}$ ); D = diâmetro (cm); H = altura (m)

### ***Coleta de dados espaciais***

Dados topográficos foram obtidos a partir de um Modelo Digital de Elevação (SRTM), com resolução espacial aproximada de 30 m, com auxílio do pacote elevatr (Hollister, 2017), do software R v. 4.4.3 (R Development Core Team, 2025). A partir do MDE foram derivados mapas de elevação (Figura 2A), declividade (Figura 2B) e aspecto (Figura 2C). Todas as camadas espaciais foram reprojctadas para o sistema de referência UTM zona 22S e ajustadas para a mesma extensão espacial e resolução. As variáveis ambientais utilizadas nas análises espaciais incluíram elevação, declividade, aspecto e classes de uso e cobertura do solo. No caso do aspecto, considerando que esta é uma variável angular e circular, aplicou-se uma transformação trigonométrica para evitar descontinuidades matemáticas entre valores angulares equivalentes, como  $0^\circ$  e  $360^\circ$ . Assim, o aspecto foi convertido de graus para radianos e transformado por meio da função seno, permitindo sua utilização como variável contínua nos modelos estatísticos. Por fim, os valores de todas as variáveis foram extraídos para as coordenadas centrais das parcelas amostrais.

O uso e a cobertura do solo foram obtidos a partir de um mapa raster previamente classificado pelo MapBiomias (2024), abrangendo toda a extensão do município de Barcarena. As classes de uso do solo incluíram formações florestais, áreas agrícolas, pastagens, áreas urbanizadas, zonas úmidas, corpos d'água, mineração e outras categorias antrópicas (Figura 2D). O raster de uso do solo foi recortado para o limite municipal e reprojctado para coincidir espacialmente com os demais dados ambientais utilizados nas análises. As classes foram posteriormente utilizadas como variável categórica nos modelos de predição espacial do carbono acima do solo.



**Figura 2.** Distribuição espacial da elevação (A), declividade (B), aspecto (C) e uso e cobertura do solo (D) do município de Barcarena, Amazônia Oriental

### *Modelagem e análise espacial do carbono*

Todas as análises espaciais e estatísticas foram conduzidas no software R v. 4.4.3 (R Development Core Team, 2025), em que a distribuição espacial do carbono acima do solo foi inicialmente explorada por meio de interpolação espacial utilizando o método do Inverso do Quadrado da Distância (IDW), com o objetivo de visualizar padrões espaciais gerais dos estoques de carbono no município. Em seguida foi ajustado um Modelo Linear Generalizado (GLM) com distribuição gaussiana para avaliar a relação entre os estoques de carbono acima do solo e as variáveis ambientais. O estoque de carbono foi utilizado como variável resposta, enquanto elevação, declividade, aspecto do relevo (transformado pela função seno) e classes de uso e cobertura do solo foram incluídos como variáveis

explicativas. A significância dos efeitos foi avaliada com base nos testes associados aos coeficientes do modelo.

Em seguida, com as variáveis significativas do GLM foi ajustado um modelo de aprendizado de máquina do tipo Random Forest, através do pacote randomForest (Breiman, 2001), utilizando os estoques de carbono acima do solo como variável resposta. A importância relativa das variáveis foi avaliada com base no aumento percentual do erro quadrático médio (%IncMSE). O modelo treinado foi utilizado para gerar mapas contínuos de predição espacial do carbono acima do solo em toda a área de estudo. Além disso, a autocorrelação espacial dos estoques de carbono acima do solo foi avaliada por meio do índice global de Moran (Moran's I), utilizando o pacote spdep (Bivand, 2002). A matriz de vizinhança espacial foi construída com base na distância entre parcelas, considerando um raio máximo de 2.000 m. A significância estatística do índice foi avaliada por meio de teste de permutação, permitindo identificar a presença de padrões espaciais agregados, aleatórios ou dispersos.

## Resultados

A média  $\pm$  desvio padrão do estoque de carbono acima do solo por ponto amostral foi de  $36,60 \pm 48,10$  Mg C ha<sup>-1</sup>, com mediana de 16,90 Mg C ha<sup>-1</sup>. O modelo linear generalizado indicou que apenas a variável topográfica elevação apresentou efeito significativo sobre o carbono aéreo ( $p < 0,05$ ), enquanto o aspecto do terreno, representado pelo seno, a declividade e as classes de uso e cobertura do solo não apresentaram associação estatisticamente significativa com o carbono aéreo (Tabela 2). O modelo apresentou desvio residual de 24.775.187, com AIC igual a 680,14.

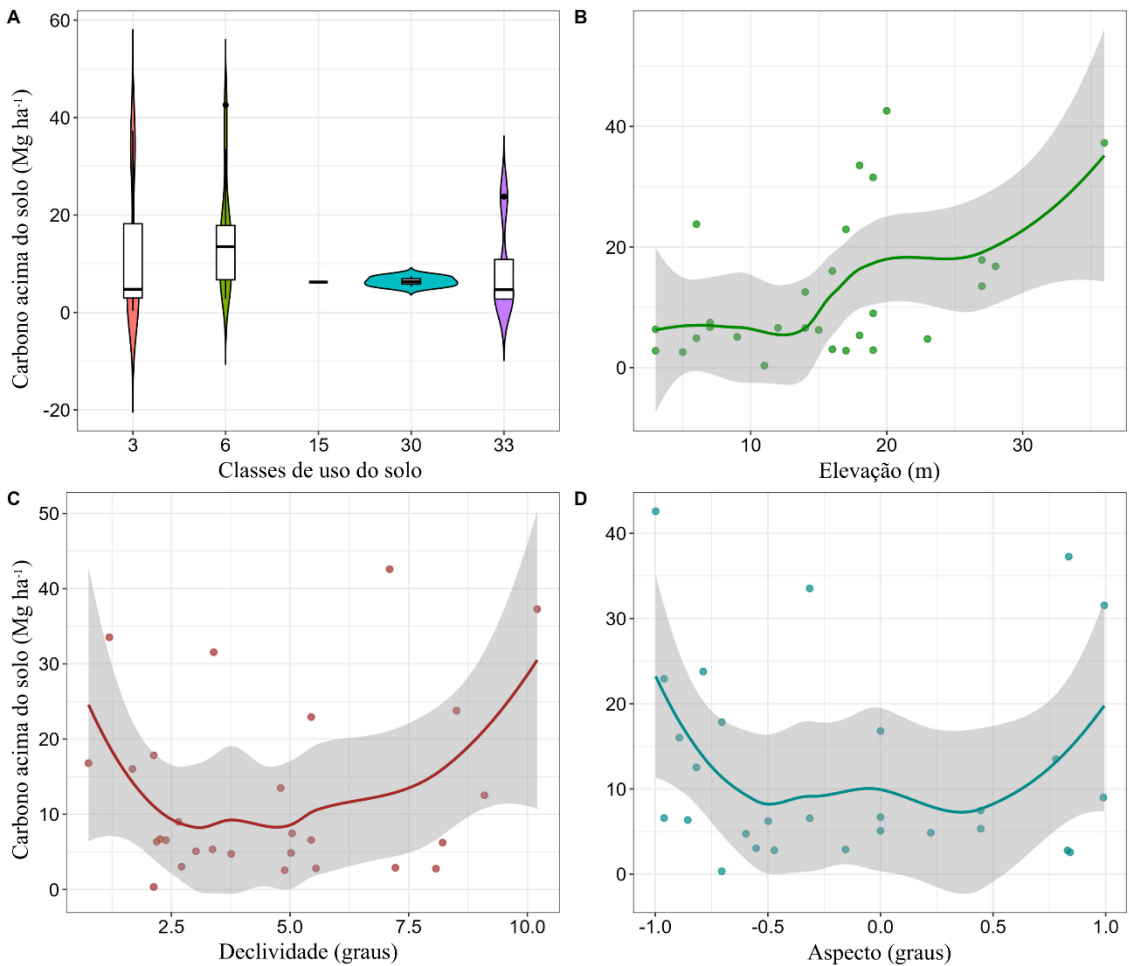
**Tabela 2.** Estimativas dos coeficientes do Global Linear Model para carbono da biomassa aérea estimado para espécies arbóreas e palmeiras com potencial bioeconômico em função de variáveis topográficas e uso do solo no município de Barcarena, Amazônia Oriental

| Variável      | Estimativa | Erro-padrão | t       | p-valor |
|---------------|------------|-------------|---------|---------|
| Intercepto    | -6,9839    | 8,1682      | -0,8550 | 0,4027  |
| Elevação      | 0,7330     | 0,3212      | 2,2820  | 0,0336* |
| Declividade   | 1,1132     | 0,8911      | 1,2490  | 0,2260  |
| Aspecto (sen) | -1,4971    | 3,3715      | -0,440  | 0,6618  |

|                         |         |         |         |        |
|-------------------------|---------|---------|---------|--------|
| Uso do solo (classe 6)  | 4.9171  | 5.3540  | 0.9180  | 0.3694 |
| Uso do solo (classe 15) | -7.6778 | 12.2957 | -0.6240 | 0.5394 |
| Uso do solo (classe 30) | 2.6059  | 8.2093  | 0.3170  | 0.7542 |
| Uso do solo (classe 33) | 4.3476  | 8.0069  | 0.5430  | 0.5931 |

Nota: uso do solo - classe 6 (Floresta alagável); uso do solo - classe 15 (Pastagem); uso do solo - classe 30 (Mineração); uso do solo - classe 33 (Rios e baías)

Observou-se elevada variabilidade nos valores de carbono entre classes de uso do solo (Figura 3A) e tendências positivas ao longo do gradiente analisado para elevação (Figuras 3B). Em contraste, não foi evidenciado um padrão claro para declividade (Figura 3C) e aspecto (Figura 3D).

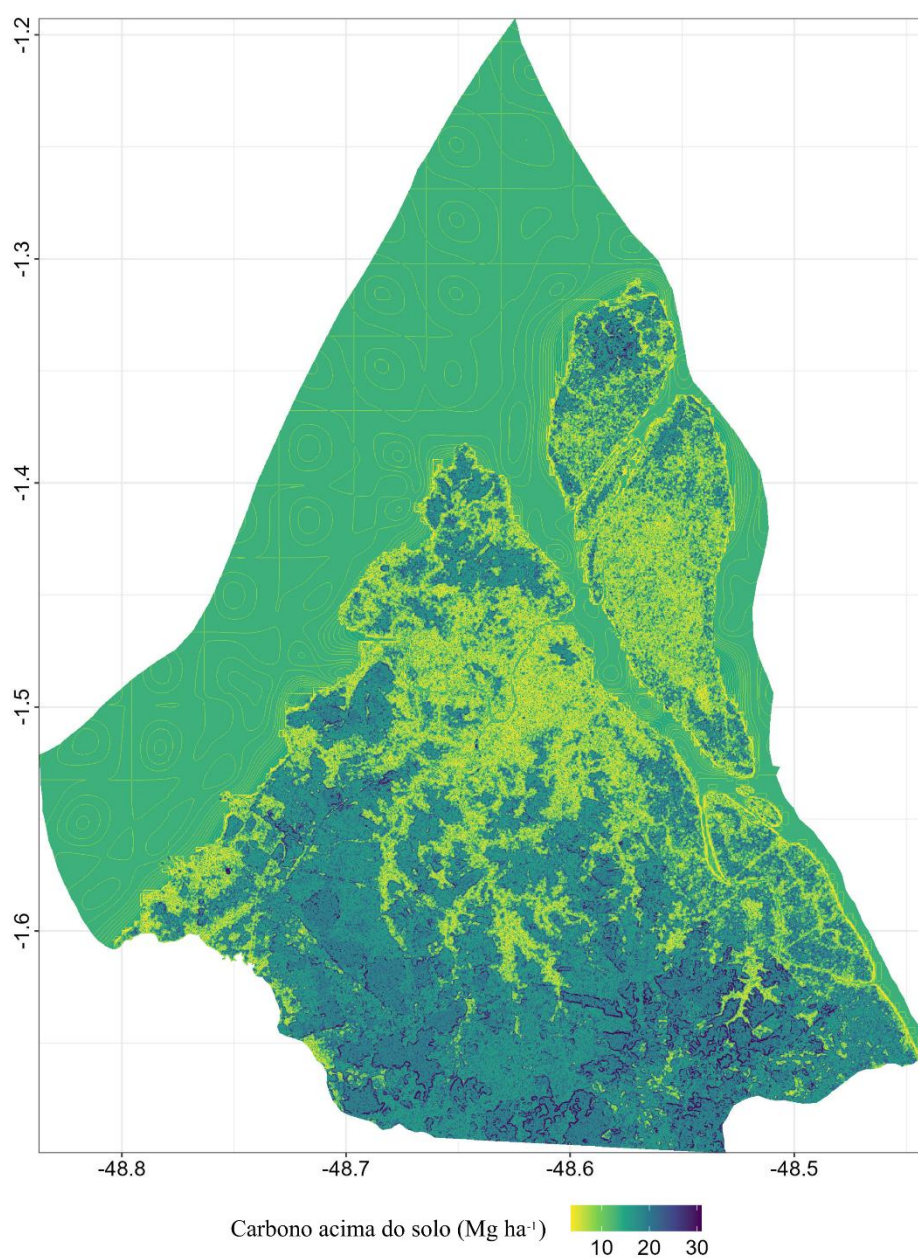


**Figura 3.** Estoque de carbono acima do solo estimado para diferentes usos do solo (A), e valores estimados versus preditos para as variáveis topográficas de elevação (B), declividade (C) e aspecto (D) para espécies arbóreas e palmeiras com potencial bioeconômico no município de Barcarena, Amazônia Oriental

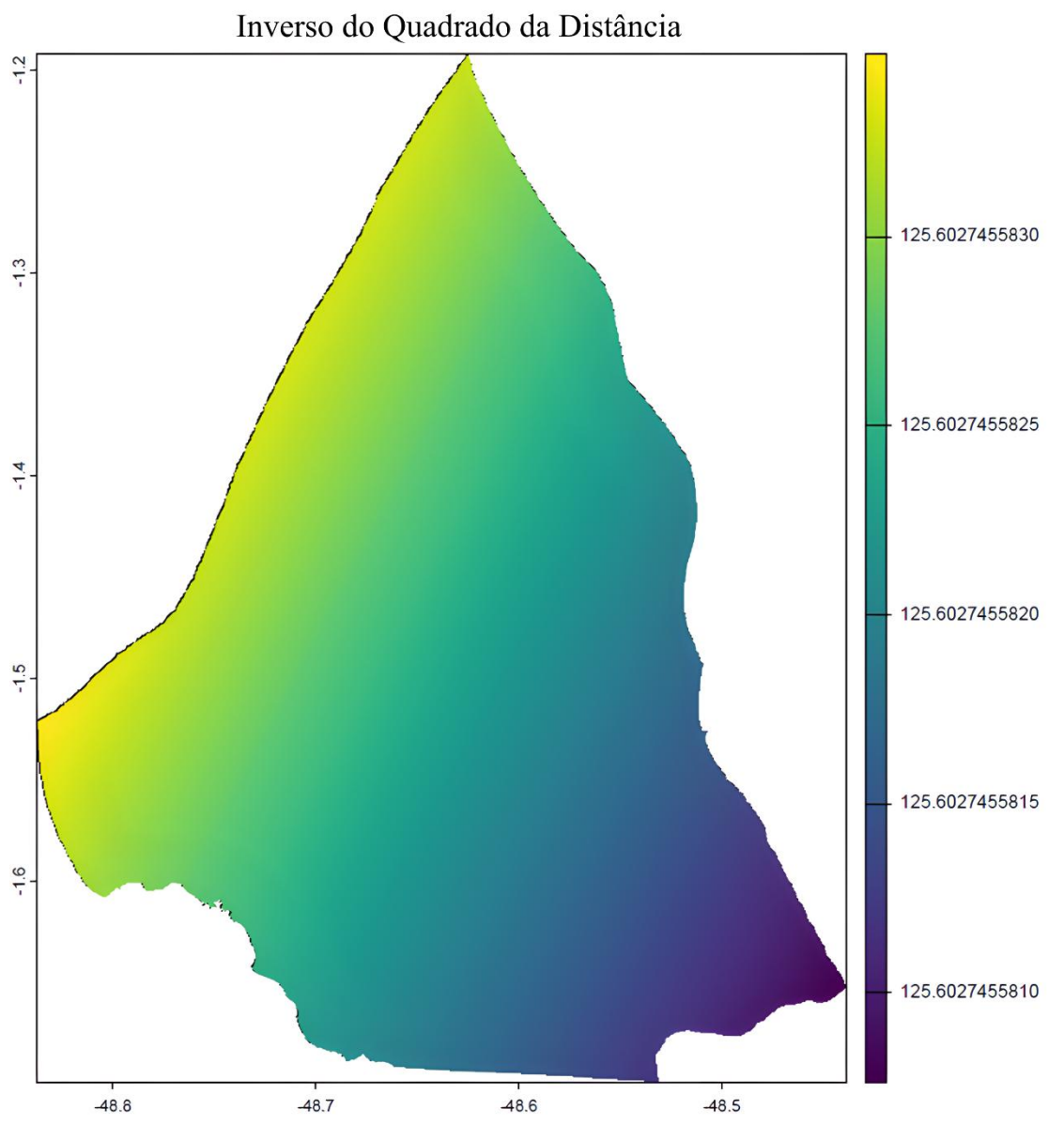
2248 Nota: uso do solo - classe 6 (Floresta alagável); uso do solo - classe 15 (Pastagem); uso do solo - classe 30  
2249 (Mineração); uso do solo - classe 33 (Rios e baías)

2250

2251 O teste global  $I$  de Moran indicou ausência de autocorrelação espacial  
2252 significativa para o carbono aéreo ( $I = 0,0247$ ;  $p = 0,3882$ ), sugerindo distribuição  
2253 espacial aleatória da variável na área de estudo. A análise exploratória por Random  
2254 Forest, aplicada às variáveis topográficas elevação e declividade, apresentou baixo  
2255 desempenho preditivo, com porcentagem de variância explicada negativa (-41,79%). No  
2256 entanto, observou-se gradientes espaciais, com valores relativamente mais elevados  
2257 concentrados em porções associadas a maiores elevações e declividades, enquanto áreas  
2258 de menor altitude tendem a apresentar estoques mais baixos (Figura 4).  
2259 Complementarmente, isso foi corroborado pela interpolação por Inverse Distance  
2260 Weighting (IDW), que evidenciou gradientes espaciais semelhantes, reforçando a  
2261 heterogeneidade espacial da variável na área de estudo (Figura 5).



**Figura 4.** Distribuição espacial do estoque de carbono da biomassa aérea estimado por meio do modelo Random Forest com variáveis topográficas (elevação e declividade) para espécies arbóreas e palmeiras com potencial bioeconômico no município de Barcarena, Amazônia Oriental



**Figura 5.** Inverso do quadrado da distância da distribuição espacial do carbono acima do solo em espécies com potencial bioeconômico no município de Barcarena, Pará, Amazônia Oriental

## Discussão

De forma pioneira, este estudo investigou como o uso do solo e variáveis topográficas modulam a distribuição espacial dos estoques de carbono da biomassa aérea associados a espécies com potencial bioeconômico em paisagens ripárias do município de Barcarena, na Amazônia Oriental. Partiu-se da hipótese de que tais estoques apresentam distribuição espacial heterogênea, com maiores valores em áreas submetidas a menor intensidade de uso antrópico, sendo regulados principalmente por gradientes ambientais e padrões de uso e cobertura do solo. No entanto, os estoques de carbono

2280 acima do solo na área de estudo apresentaram elevada variabilidade espacial e estrutural,  
2281 refletindo a interação entre a elevação topográfica, mas não em relação ao uso e cobertura  
2282 do solo. Os resultados deste estudo sugerem que, em paisagens ripárias amazônicas  
2283 caracterizadas por gradientes ambientais sutis e histórico de uso heterogêneo, o relevo  
2284 atua como um modulador indireto das condições ecológicas que controlam o acúmulo de  
2285 carbono da biomassa aérea de espécies de interesse bioeconômico, enquanto  
2286 classificações amplas de uso do solo possuem capacidade limitada para explicar a  
2287 variabilidade do carbono associada a espécies com potencial bioeconômico. Nesse  
2288 contexto, a análise integrada das variáveis topográficas permite compreender de que  
2289 forma controles ambientais contínuos se sobrepõem a categorias discretas de uso da terra,  
2290 modulando os padrões espaciais de biomassa em escalas locais (Fonsêca et al., 2024).

2291 Em ecossistemas amazônicos existe ampla variabilidade dos estoques de carbono  
2292 acima do solo, refletindo a interação entre fatores ambientais, estruturais e históricos de  
2293 uso (Mehta et al., 2025). No local de estudo, caracterizado por relevo pouco acentuado,  
2294 típico de ecossistemas amazônicos, pequenas variações altimétricas podem resultar em  
2295 diferenças ecologicamente relevantes nas condições de drenagem, na frequência e  
2296 duração do alagamento e na estabilidade física do solo (Fang et al., 2022), o que explica  
2297 a relação significativa com o estoque de carbono observada neste estudo. Em ambientes  
2298 amazônicos de planície e áreas ripárias, tais fatores são particularmente críticos para o  
2299 estabelecimento e o crescimento da vegetação arbórea, pois áreas ligeiramente mais  
2300 elevadas tendem a apresentar menor saturação hídrica prolongada (Bispo et al., 2009),  
2301 favorecendo o desenvolvimento radicular, maior produtividade primária e,  
2302 consequentemente, maiores estoques de biomassa acima do solo (Wittmann et al., 2022).

2303 No geral, a elevação é um modulador indireto do carbono da biomassa aérea, tanto  
2304 por efeitos edáficos quanto por restrições diferenciadas ao uso antrópico, padrão que  
2305 contribui para a elevada heterogeneidade espacial dos estoques de carbono observada  
2306 mesmo em áreas amazônicas relativamente conservadas (Dionizio et al., 2025). Além  
2307 disso, pequenas diferenças topográficas, ao influenciarem a profundidade do lençol  
2308 freático, alteram a disponibilidade de água e oxigênio no solo, resultando em florestas  
2309 com menor biomassa acima do solo em áreas com lençol freático raso (Costa et al., 2023).

2310 Embora a elevação tenha se destacado como o principal gradiente ambiental,  
2311 outras variáveis topográficas associadas ao relevo podem atuar de forma complementar  
2312 para predizer o estoque de carbono da biomassa, ainda que seus efeitos não se expressem  
2313 de maneira estatisticamente isolada (Tian et al., 2023). Em relevos suavemente

ondulados, a declividade pode contribuir para melhorar o escoamento superficial e diminuir a compactação do solo (Alsbach et al., 2024). No entanto, tais efeitos nem sempre se traduzem em incrementos consistentes de biomassa quando a variação topográfica é limitada (Castilho et al., 2006). Isso pode justificar a ausência de significância estatística por meio do GLM, sugerindo que a influência desta variável sobre o carbono acima do solo ocorre de forma indireta ou condicionada a variáveis não explicitamente representadas na modelagem, como atributos funcionais e estruturais das espécies bioeconômicas presentes. Resultados semelhantes foram observados em florestas tropicais de montanhas, onde a biomassa acima do solo aumentou ao longo de gradientes de elevação e declividade, embora modulada por interações com o uso da terra e a estrutura da vegetação (Uscanga et al., 2023).

Na Amazônia, o papel de variáveis topográficas influencia o hidroperíodo e, consequentemente, o estoque de biomassa (Assis et al., 2019), porém tende a ser atenuado quando inserido em contextos de baixa sazonalidade e elevada homogeneidade microclimática (Zhao et al., 2023). No caso do aspecto do terreno, representado neste estudo pela transformação trigonométrica do seno, a ausência de relação com os estoques de carbono pode estar associada à proximidade da região de estudo com a linha do Equador, onde a sazonalidade da radiação solar é reduzida e as diferenças na incidência de energia entre orientações de encosta permanecem pouco contrastantes ao longo do ano (Correa-Guamán et al., 2025).

O mapa derivado do modelo e da interpolação por IDW revelou gradientes espaciais com concentrações relativamente maiores de carbono associadas a áreas de maior elevação. No entanto, a ausência de padrões estatisticamente robustos confere a essa análise um caráter exploratório, ainda que relevante no contexto amazônico, pois o município de Barcarena abriga um dos principais polos industriais da Amazônia. A distribuição espacial próxima da aleatoriedade observada neste estudo sugere que o carbono acima do solo varia principalmente em pequenas escalas espaciais, possivelmente controladas por características intrínsecas da vegetação e do solo, incluindo atributos funcionais das espécies, mais do que por processos espaciais estruturantes em larga escala. Esse padrão é consistente com evidências de que a diversidade funcional e os traços dominantes da vegetação exercem controle mais direto sobre os estoques de carbono do que variáveis espaciais isoladas, especialmente em florestas tropicais alteradas (Silva et al., 2026).

Dessa maneira, a elevada variabilidade intra-classe observada entre os diferentes usos do solo reforça a limitação de classificações categóricas amplas para explicar estoques de carbono em paisagens altamente heterogêneas, particularmente em contextos amazônicos submetidos à intensa pressão antrópica, como o polo industrial de Barcarena. Consequentemente, áreas categorizadas na mesma classe podem abrigar estágios sucessionais contrastantes, diferenças estruturais marcantes e históricos de distúrbio distintos, resultando na ampla dispersão dos valores de biomassa observada e na sobreposição do efeito do uso do solo, conforme também evidenciado por Fonsêca et al. (2024). Portanto, de forma integrada, os resultados indicaram que o carbono acima do solo na área de estudo é regulado por gradientes ambientais sutis e por uma combinação de fatores locais não plenamente capturados pelas variáveis topográficas e de uso do solo. A significância da elevação no GLM evidenciou o papel consistente do relevo como modulador das condições ecológicas, enquanto a ausência de autocorrelação espacial e o baixo desempenho preditivo do Random Forest ressaltaram os limites da inferência baseada exclusivamente em variáveis espaciais derivadas de modelos digitais de terreno. Na prática, esses resultados reforçam a necessidade de incorporar, em abordagens futuras, informações estruturais da vegetação, atributos edáficos e histórico de distúrbios, de modo a aprimorar a compreensão dos controles ecológicos do carbono acima do solo em paisagens amazônicas complexas, conforme também indicado por Heinrich et al. (2023).

## **Conclusão**

Os estoques de carbono acima do solo, associados a espécies arbóreas e palmeiras com potencial bioeconômico em paisagens ripárias de Barcarena, apresentaram elevada variabilidade espacial, sem evidências de estruturação espacial em larga escala. Entre as variáveis avaliadas, a elevação foi o único fator significativamente associado à variação do carbono aéreo, indicando que gradientes topográficos sutis exercem papel central na modulação das condições ecológicas que favorecem o acúmulo de biomassa nesses ecossistemas. Em contraste, a declividade, o aspecto do terreno e as classes de uso e cobertura do solo não apresentaram influência estatisticamente significativa, evidenciando a limitação de classificações categóricas amplas para explicar a dinâmica do carbono em paisagens ripárias altamente heterogêneas. A ausência de autocorrelação espacial significativa e o baixo desempenho do modelo Random Forest reforçam que a variabilidade do carbono acima do solo é predominantemente controlada por fatores locais e não observados, possivelmente relacionados à estrutura da vegetação, atributos

edáficos e histórico de distúrbios. Esses resultados destacam que abordagens baseadas exclusivamente em variáveis espaciais derivadas de modelos digitais de terreno e uso do solo possuem poder explicativo limitado e que a incorporação de informações ecológicas mais detalhadas é essencial para aprimorar a quantificação e o mapeamento do carbono acima do solo em florestas ripárias amazônicas.

## Referências

- Ahmad, N., Ullah, S., Zhao, N., Mumtaz, F., Ali, Asad, Ali, Anwar, Tariq, A., Kareem, M., Imran, A.B., Khan, I.A., Shakir, M., 2023. Comparative Analysis of Remote Sensing and Geo-Statistical Techniques to Quantify Forest Biomass. *Forests* 14, 379. <https://doi.org/10.3390/f14020379>
- Alsbach, C.M.E., Seijmonsbergen, A.C., Hoorn, C., 2024. Geodiversity in the Amazon drainage basin. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 382. <https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0065>
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., De Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* 22, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Araujo, E.C.G., Silva, T.C., da Cunha Neto, E.M., Favarin, J.A.S., da Silva Gomes, J.K., das Chagas, K.P.T., Fiorelli, E.C., Sonsin, A.F., Maia, E., 2024. Bioeconomy in the Amazon: Lessons and gaps from thirty years of non-timber forest products research. *J. Environ. Manage.* 370, 122420. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122420>
- Assis, R.L., Wittmann, F., Bredin, Y.K., Schöngart, J., Nobre Quesada, C.A., Piedade, M.T.F., Haugaasen, T., 2019. Above-ground woody biomass distribution in Amazonian floodplain forests: Effects of hydroperiod and substrate properties. *For. Ecol. Manage.* 432, 365–375. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.031>
- Baskerville, M., Bazrgar, A., Reddy, N., Ofosu, E., Thevathasan, N., Gordon, A.M., Oelbermann, M., 2021. Greenhouse gas emissions from riparian zones are related to vegetation type and environmental factors. *J. Environ. Qual.* 50, 847–857. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20250>
- Bell, S.M., Raymond, S.J., Yin, H., Jiao, W., Goll, D.S., Ciais, P., Olivetti, E., Leshyk, V.O., Terrer, C., 2023. Quantifying the recarbonization of post-agricultural landscapes. *Nat. Commun.* 14, 2139. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37907-w>

- 2413 Bhan, M., Gingrich, S., Matej, S., Fritz, S., Erb, K.-H., 2021. Land Use Increases the  
2414 Correlation between Tree Cover and Biomass Carbon Stocks in the Global Tropics.  
2415 Land 10, 1217. <https://doi.org/10.3390/land10111217>
- 2416 Bispo, P. da C., Valeriano, M. de M., Kuplich, T.M., 2009. Variáveis geomorfológicas  
2417 locais e sua relação com a vegetação da região do interflúvio Madeira-Purus (AM-  
2418 RO). Acta Amaz. 39, 81–90. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672009000100008>
- 2419 Bivand, R., 2002. spdep: Spatial Dependence: Weighting Schemes, Statistics. CRAN  
2420 Contrib. Packag. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.spdep>
- 2421 Breiman, L., 2001. Random Forests. Mach. Learn. 45, 5–32.  
2422 <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- 2423 Carvalho, R., Adami, M., Amaral, S., Bezerra, F.G., de Aguiar, A.P.D., 2019. Changes in  
2424 secondary vegetation dynamics in a context of decreasing deforestation rates in Pará  
2425 Brazilian Amazon. Appl. Geogr. 106, 40–49.  
2426 <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.03.001>
- 2427 Castilho, C. V., Magnusson, W.E., Araújo, R.N.O., Luizão, R.C.C., Luizão, F.J., Lima,  
2428 A.P., Higuchi, N., 2006. Variation in aboveground tree live biomass in a central  
2429 Amazonian Forest: Effects of soil and topography. For. Ecol. Manage. 234, 85–96.  
2430 <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.06.024>
- 2431 Chang, D.Y., Jeong, S., Shin, J., 2024. Assessing the impact of urbanization on forest  
2432 carbon stocks and social costs using a machine learning approach. Sci. Total Environ.  
2433 954, 176521. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176521>
- 2434 Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S.L., Swenson, N.G., Zanne, A.E., 2009.  
2435 Towards a worldwide wood economics spectrum. Ecol. Lett. 12, 351–366.  
2436 <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x>
- 2437 Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M.S., Delitti,  
2438 W.B.C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P.M., Goodman, R.C., Henry, M., Martínez-  
2439 Yrizar, A., Mugasha, W.A., Muller-Landau, H.C., Mencuccini, M., Nelson, B.W.,  
2440 Ngomanda, A., Nogueira, E.M., Ortiz-Malavassi, E., Péliissier, R., Ploton, P., Ryan,  
2441 C.M., Saldarriaga, J.G., Vieilledent, G., 2014. Improved allometric models to  
2442 estimate the aboveground biomass of tropical trees. Glob. Chang. Biol. 20, 3177–  
2443 3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- 2444 Corenblit, D., Piégay, H., Arrignon, F., González-Sargas, E., Bonis, A., Ebengo, D.M.,  
2445 Garófano-Gómez, V., Gurnell, A.M., Henry, A.L., Hortobágyi, B., Martínez-Capel,  
2446 F., Mazal, L., Steiger, J., Tabacchi, E., Tooth, S., Vautier, F., Walcker, R., 2024.

- 2447 Interactions between vegetation and river morphodynamics. Part II: Why is a  
2448 functional trait framework important? *Earth-Science Rev.* 253, 104709.  
2449 <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104709>
- 2450 Correa-Guamán, A., Moreno-Salazar, A., Paccha-Soto, D., Jaramillo-Fierro, X., 2025.  
2451 Impact of Azimuth Angle on Photovoltaic Energy Production: Experimental  
2452 Analysis in Loja, Ecuador. *Energies* 18, 1998. <https://doi.org/10.3390/en18081998>
- 2453 Costa, F.R.C., Schietti, J., Stark, S.C., Smith, M.N., 2023. The other side of tropical forest  
2454 drought: do shallow water table regions of Amazonia act as large-scale hydrological  
2455 refugia from drought? *New Phytol.* 237, 714–733. <https://doi.org/10.1111/nph.17914>
- 2456 Delaroche, M., Dias, V.M., Massoca, P.E., 2023. The intertemporal governance  
2457 challenges of Brazil's Amazon: managing soybean expansion, deforestation rates,  
2458 and urban floods. *Sustain. Sci.* 18, 43–58. [https://doi.org/10.1007/s11625-022-](https://doi.org/10.1007/s11625-022-01149-4)  
2459 [01149-4](https://doi.org/10.1007/s11625-022-01149-4)
- 2460 Dinca, L., Murariu, G., Lupoae, M., 2025. Understanding the Ecosystem Services of  
2461 Riparian Forests: Patterns, Gaps, and Global Trends. *Forests* 16, 947.  
2462 <https://doi.org/10.3390/f16060947>
- 2463 Dionizio, E.A., Giannini, T.C., Gastauer, M., Barbosa-Silva, R.G., Souza, R.L.F. de,  
2464 Nunes, S., Ramos, S.J., Andrino, C.O., Cavalcante, R.B.L., 2025. Aboveground  
2465 carbon stocks for different forest types in eastern Amazonia. *Environ. Res. Commun.*  
2466 7, 045006. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/adc06a>
- 2467 Fang, Y., Leung, L.R., Koven, C.D., Bisht, G., Detto, M., Cheng, Y., McDowell, N.,  
2468 Muller-Landau, H., Wright, S.J., Chambers, J.Q., 2022. Modeling the topographic  
2469 influence on aboveground biomass using a coupled model of hillslope hydrology and  
2470 ecosystem dynamics. *Geosci. Model Dev.* 15, 7879–7901.  
2471 <https://doi.org/10.5194/gmd-15-7879-2022>
- 2472 Fauset, S., Johnson, M.O., Gloor, M., Baker, T.R., Monteagudo M., A., Brien, R.J.W.,  
2473 Feldpausch, T.R., Lopez-Gonzalez, G., Malhi, Y., ter Steege, H., Pitman, N.C.A.,  
2474 Baraloto, C., Engel, J., Pétronelli, P., Andrade, A., Camargo, J.L.C., Laurance,  
2475 S.G.W., Laurance, W.F., Chave, J., Allie, E., Vargas, P.N., Terborgh, J.W.,  
2476 Ruokolainen, K., Silveira, M., Aymard C., G.A., Arroyo, L., Bonal, D., Ramirez-  
2477 Angulo, H., Araujo-Murakami, A., Neill, D., Hérault, B., Dourdain, A., Torres-  
2478 Lezama, A., Marimon, B.S., Salomão, R.P., Comiskey, J.A., Réjou-Méchain, M.,  
2479 Toledo, M., Licona, J.C., Alarcón, A., Prieto, A., Rudas, A., van der Meer, P.J.,  
2480 Killeen, T.J., Marimon Junior, B.-H., Poorter, L., Boot, R.G.A., Stergios, B., Torre,

- 2481 E.V., Costa, F.R.C., Levis, C., Schietti, J., Souza, P., Groot, N., Arets, E., Moscoso,  
2482 V.C., Castro, W., Coronado, E.N.H., Peña-Claros, M., Stahl, C., Barroso, J., Talbot,  
2483 J., Vieira, I.C.G., van der Heijden, G., Thomas, R., Vos, V.A., Almeida, E.C., Davila,  
2484 E.Á., Aragão, L.E.O.C., Erwin, T.L., Morandi, P.S., de Oliveira, E.A., Valadão,  
2485 M.B.X., Zagt, R.J., van der Hout, P., Loayza, P.A., Pipoly, J.J., Wang, O., Alexiades,  
2486 M., Cerón, C.E., Huamantupa-Chuquimaco, I., Di Fiore, A., Peacock, J., Camacho,  
2487 N.C.P., Umetsu, R.K., de Camargo, P.B., Burnham, R.J., Herrera, R., Quesada, C.A.,  
2488 Stropp, J., Vieira, S.A., Steininger, M., Rodríguez, C.R., Restrepo, Z., Muelbert,  
2489 A.E., Lewis, S.L., Pickavance, G.C., Phillips, O.L., 2015. Hyperdominance in  
2490 Amazonian forest carbon cycling. *Nat. Commun.* 6, 6857.  
2491 <https://doi.org/10.1038/ncomms7857>
- 2492 Fern, K., 2025. Useful Tropical Plants Database [WWW Document]. URL  
2493 <https://tropical.theferns.info/refs.php> (accessed 5.20.25).
- 2494 Fonsêca, N.C., Cunha, J.S.A., Albuquerque, E.R.G.M. de, Lins-e-Silva, A.C., 2024.  
2495 Carbon stock in aboveground biomass and necromass in the Atlantic Forest: an  
2496 analysis of data published between 2000 and 2021. *An. Acad. Bras. Cienc.* 96.  
2497 <https://doi.org/10.1590/0001-3765202420220761>
- 2498 Gao, Y., Skutsch, M., Paneque-Gálvez, J., Ghilardi, A., 2020. Remote sensing of forest  
2499 degradation: a review. *Environ. Res. Lett.* 15, 103001. [https://doi.org/10.1088/1748-](https://doi.org/10.1088/1748-9326/abaad7)  
2500 [9326/abaad7](https://doi.org/10.1088/1748-9326/abaad7)
- 2501 Goodman, R.C., Phillips, O.L., del Castillo Torres, D., Freitas, L., Cortese, S.T.,  
2502 Monteagudo, A., Baker, T.R., 2013. Amazon palm biomass and allometry. *For. Ecol.*  
2503 *Manage.* 310, 994–1004. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.09.045>
- 2504 Heinrich, V.H.A., Vancutsem, C., Dalagnol, R., Rosan, T.M., Fawcett, D., Silva-Junior,  
2505 C.H.L., Cassol, H.L.G., Achard, F., Jucker, T., Silva, C.A., House, J., Sitch, S., Hales,  
2506 T.C., Aragão, L.E.O.C., 2023. The carbon sink of secondary and degraded humid  
2507 tropical forests. *Nature* 615, 436–442. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05679-w>
- 2508 Ho, V.H., Morita, H., Bachofer, F., Ho, T.H., 2024. Random forest regression kriging  
2509 modeling for soil organic carbon density estimation using multi-source  
2510 environmental data in central Vietnamese forests. *Model. Earth Syst. Environ.* 10,  
2511 7137–7158. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02158-1>
- 2512 Hollister, J., 2017. elevatr: Access Elevation Data from Various APIs. CRAN Contrib.  
2513 Packag. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.elevatr>

- Houghton, R.A., Hackler, J.L., 1999. Emissions of carbon from forestry and land-use change in tropical Asia. *Glob. Chang. Biol.* 5, 481–492. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1999.00244.x>
- IBGE, I.B. de G. e E., 2012. Manual técnico da vegetação brasileira, Second. ed. Rio de Janeiro.
- IPCC, I.P. on C.C., 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japan.
- IUCN, International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. (2025). The IUCN Red List of Threatened Species. Accessed in Jan 15 2025.
- Li, G., Xu, J., Tang, Y., Wang, Y., Lou, J., Xu, S., Iqbal, B., Li, Y., Du, D., 2024. Impact of Plant Community Diversity on Greenhouse Gas Emissions in Riparian Zones. *Plants* 13, 2412. <https://doi.org/10.3390/plants13172412>
- MapBiomias, 2024. Cobertura e uso da terra [WWW Document]. URL [https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura?activeBaseMap=9&layersOpacity=100&activeModule=coverage&activeModuleContent=coverage%3Acoverage\\_main&activeYear=2022&mapPosition=-12.361466%2C-49.504395%2C5&timelineLimitsRange=1985%2C2022&baseParams\[terri](https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura?activeBaseMap=9&layersOpacity=100&activeModule=coverage&activeModuleContent=coverage%3Acoverage_main&activeYear=2022&mapPosition=-12.361466%2C-49.504395%2C5&timelineLimitsRange=1985%2C2022&baseParams[terri) (accessed 2.1.24).
- Mehta, D., Righi, C.A., Kumar, C., Pereira, C.R., 2025. Systematic review on carbon and biodiversity in forest ecosystems of Amazonia. *Environ. Monit. Assess.* 197, 1307. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14751-7>
- Müeller-Dombois, D., Ellenberg, H., 1974. Aims and Methods of Vegetation Ecology. New York.
- R Development Core Team, 2025. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing v. 4.4.3.
- RADAMBRASIL, 1974. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Folha SA. 22. Rio de Janeiro.
- Silva, N., Gomes, L.P., Coelho, A.J.P., Meira-Neto, J.A.A., 2026. Anthropogenic disturbances shift carbon storage from niche complementarity to mass ratio effects in secondary tropical forests. *For. Ecol. Manage.* 602, 123403. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.123403>
- Sutfin, N.A., Wohl, E.E., Dwire, K.A., 2016. Banking carbon: a review of organic carbon storage and physical factors influencing retention in floodplains and riparian

- 2547 ecosystems. *Earth Surf. Process. Landforms* 41, 38–60.
- 2548 <https://doi.org/10.1002/esp.3857>
- 2549 Tian, L., Wu, X., Tao, Y., Li, M., Qian, C., Liao, L., Fu, W., 2023. Review of Remote
- 2550 Sensing-Based Methods for Forest Aboveground Biomass Estimation: Progress,
- 2551 Challenges, and Prospects. *Forests* 14, 1086. <https://doi.org/10.3390/f14061086>
- 2552 Uscanga, A., Bartlein, P.J., Silva, L.C.R., 2023. Local and Regional Effects of Land-Use
- 2553 Intensity on Aboveground Biomass and Tree Diversity in Tropical Montane Cloud
- 2554 Forests. *Ecosystems* 26, 1734–1752. <https://doi.org/10.1007/s10021-023-00861-1>
- 2555 Vatandaşlar, C., Abdikan, S., 2022. Carbon stock estimation by dual-polarized synthetic
- 2556 aperture radar (SAR) and forest inventory data in a Mediterranean forest landscape.
- 2557 *J. For. Res.* 33, 827–838. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01363-3>
- 2558 Wegner, R.C., Fernandes, M.P., 2023. Expansion of Investments by Chinese Companies
- 2559 in the Brazilian Amazon – the Case of Agribusiness. *Context. Int.* 45.
- 2560 <https://doi.org/10.1590/s0102-8529.20234503e20220010>
- 2561 Wittmann, F., Householder, J.E., Piedade, M.T.F., Schöngart, J., Demarchi, L.O.,
- 2562 Quaresma, A.C., Junk, W.J., 2022. A Review of the Ecological and Biogeographic
- 2563 Differences of Amazonian Floodplain Forests. *Water* 14, 3360.
- 2564 <https://doi.org/10.3390/w14213360>
- 2565 Xu, W., Cheng, Y., Luo, M., Mai, X., Wang, W., Zhang, W., Wang, Y., 2025. Progress
- 2566 and Limitations in Forest Carbon Stock Estimation Using Remote Sensing
- 2567 Technologies: A Comprehensive Review. *Forests* 16, 449.
- 2568 <https://doi.org/10.3390/f16030449>
- 2569 Yuan, C., Wu, F., Wu, Q., Fornara, D.A., Heděnc, P., Peng, Y., Zhu, G., Zhao, Z., Yue,
- 2570 K., 2023. Vegetation restoration effects on soil carbon and nutrient concentrations
- 2571 and enzymatic activities in post-mining lands are mediated by mine type, climate,
- 2572 and former soil properties. *Sci. Total Environ.* 879, 163059.
- 2573 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163059>
- 2574 Zhao, C., Liu, J., Mou, W., Zhao, W., Zhou, Z., Ta, F., Lei, L., Li, C., 2023. Topography
- 2575 shapes the carbon allocation patterns of alpine forests. *Sci. Total Environ.* 898,
- 2576 165542. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165542>
- 2577

2579 O carbono destaca-se como um elemento central na interface entre funcionamento  
2580 ecológico e bioeconomia, atuando tanto como serviço ecossistêmico quanto como ativo  
2581 estratégico em contextos de desenvolvimento sustentável. Considerando isso, a presente  
2582 tese investigou os fatores relacionados à produção científica global sobre carbono, além  
2583 de avaliar o potencial bioeconômico em florestas ripárias amazônicas inseridas em um  
2584 contexto de intensas pressões antrópicas, considerando simultaneamente aspectos  
2585 ecológicos (diversidade e estrutura da vegetação) e espaciais. Adotou-se uma abordagem  
2586 interdisciplinar e multiescalar, permitindo uma interpretação integrada sobre o papel das  
2587 florestas ripárias como sistemas-chave no contexto das mudanças climáticas e para o  
2588 fortalecimento da bioeconomia no polo industrial de Barcarena, localizado na Amazônia.

2589 Observou-se que o interesse científico global pelos estoques de carbono em  
2590 florestas ripárias é influenciado principalmente pela exposição a riscos ambientais  
2591 causados por eventos naturais extremos, além de ter relação com o Produto Interno Bruto  
2592 (PIB). Portanto, evidenciou-se que a produção de conhecimento sobre carbono responde  
2593 a pressões socioambientais globais, indicando a necessidade de fomentar pesquisas em  
2594 regiões altamente impactadas e com alta vulnerabilidade climática e econômica.  
2595 Consequentemente, isso aponta para a necessidade de incentivar pesquisas sobre o tema  
2596 na Amazônia, especialmente em regiões sob forte pressão antrópica.

2597 Em escala local, observou-se que florestas ripárias inseridas em ecossistemas  
2598 altamente antropizadas mantêm elevada diversidade florística e funcional, embora  
2599 apresentem variações estruturais e composicionais associadas ao contexto ambiental e à  
2600 intensidade de uso do solo. A presença de espécies com potencial de uso não madeireiro  
2601 evidenciou que esses ecossistemas não apenas sustentam funções ecológicas essenciais,  
2602 mas também abrigam recursos estratégicos para a sociobioeconomia amazônica. No  
2603 entanto, a influência negativa do uso do solo sobre a distribuição de espécies com  
2604 potencial bioeconômico indica que a intensificação antrópica pode comprometer tanto a  
2605 diversidade quanto a viabilidade de usos sustentáveis desses recursos.

2606 A integração entre estrutura florestal, diversidade funcional e modelagem  
2607 alométrica revelou que estimativas robustas de biomassa e carbono dependem do uso de  
2608 modelos ajustados às condições locais, especialmente em ecossistemas ripários tropicais,  
2609 cujas características estruturais diferem de florestas não inundáveis. Essa constatação tem  
2610 implicações diretas para avaliações de carbono e para a formulação de estratégias

baseadas em serviços ecossistêmicos, ao reduzir incertezas associadas a modelos generalistas.

Do ponto de vista geoespacial, os resultados demonstraram que a distribuição do carbono acima do solo para espécies com potencial bioeconômico em florestas ripárias amazônicas apresenta elevada variabilidade e é predominantemente controlada por gradientes ambientais, especialmente a elevação, enquanto classificações amplas de uso e cobertura do solo possuem capacidade limitada para explicar essa variabilidade. A ausência de autocorrelação espacial significativa sugere que processos ecológicos locais e fatores ambientais exercem maior influência sobre os estoques de carbono do que padrões espaciais, reforçando a complexidade de ecossistemas antropizados.

Em conjunto, os resultados desta tese contribuíram para atender diretamente a três objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU, sendo eles: 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e 15 (Vida Terrestre). Além disso, indicaram que a conservação e o manejo sustentável de florestas ripárias amazônicas exigem abordagens integradas que considerem simultaneamente as características ecológica, o potencial bioeconômico e o contexto de pressões antrópicas. Portanto, ao evidenciar que a produção científica mundial sobre carbono é impulsionada por riscos climáticos e fatores econômicos, este estudo justifica a urgência de avaliar e monitorar locais de intensa pressão antrópica, como o polo de Barcarena. Assim, políticas públicas e estratégias de gestão voltadas à Amazônia devem reconhecer o papel multifuncional das florestas ripárias, priorizando ações que conciliem conservação, uso sustentável dos recursos florestais e mitigação das mudanças climáticas em cenários de crescente transformação de usos do solo, causada por atividades antrópicas.