

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS E AMBIENTAIS

VALQUÍRIA CLARA FREIRE DE SOUZA

Prospecção dendrocronológica de espécies tropicais e o papel das coleções de  
madeira como infraestruturas científicas

MANAUS – AM

2026

VALQUÍRIA CLARA FREIRE DE SOUZA

**Prospecção dendrocronológica de espécies tropicais e o papel das coleções de madeira como infraestruturas científicas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais da Universidade Federal do Amazonas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais e Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Nabor da Silveira Pio

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Tarcísio Moraes Mady

MANAUS – AM

2026

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

---

S729p      Souza, Valquíria Clara Freire de  
              Prospecção dendrocronológica de espécies tropicais e o papel das  
              coleções de madeira como infraestruturas científicas / Valquíria Clara  
              Freire de Souza. - 2026.  
              76 f. : il., color. ; 31 cm.

              Orientador(a): Nabor da Silveira Pio.  
              Orientador(a): Francisco Tarcísio Moraes Mady.  
              Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa  
              de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, Manaus, 2026.

              1. anatomia da madeira. 2. cienciometria. 3. xiloteca. 4. camada de  
              crescimento. I. Pio, Nabor da Silveira. II. Mady, Francisco Tarcísio  
              Moraes. III. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-  
              Graduação em Ciências Florestais e Ambientais. IV. Título

---

VALQUÍRIA CLARA FREIRE DE SOUZA

**Prospecção dendrocronológica de espécies tropicais e o papel das coleções de madeira como infraestruturas científicas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais da Universidade Federal do Amazonas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais e Ambientais.

Aprovado em 29 de junho de 2026.

BANCA EXAMINADORA

---

Francisco Tarcísio Moraes Mady, Presidente  
Universidade Federal do Amazonas

---

Álefe Lopes Viana, Membro  
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Amazonas

---

Mario Tommasiello Filho, Membro  
Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

## **AGRADECIMENTOS**

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), pela concessão da bolsa de estudos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio e incentivo à pesquisa científica.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais (PPGCIFA) da Universidade Federal do Amazonas e a todo o seu corpo docente, pela oportunidade de crescimento acadêmico.

Ao Prof. Francisco Tarcísio Moraes Mady, por sua mentoria que transcende o âmbito acadêmico e pelas palavras que reforçaram minha confiança em meu potencial e em minha verdade nos momentos mais difíceis da pós-graduação.

À Xiloteca Dr. Valmir Souza de Oliveira e ao Laboratório de Física da Madeira da UFAM, que será para sempre a minha segunda casa. Adicionalmente, aos colegas do Grupo de Estudos em Clima e Florestas (GECLIF), pelo convívio e aprendizado.

E ao Prof. Nabor da Silveira Pio, pela generosidade ao assumir formalmente a minha orientação.

Agradeço, ainda, a todos que de alguma forma contribuíram positivamente na minha caminhada, especialmente:

À minha amiga Fernanda, pela disponibilidade em dividir comigo a mesa 01 do Central, as arquibancadas da Vila Olímpica, a pista do Largo 443, o gramado do campinho e tantos outros cantos dessa cidade.

À minha saudade diária, Savannah, pelas palavras que atravessam distâncias para manter meu coração seguro e tranquilo.

À minha avó Alzira, pelo carinho infinito e pelos cafés da tarde que dividimos.

Ao meu irmão Alexander, por traçar o meu destino e o de nossa família com o seu nascimento.

Ao meu silencioso pai Valterney, cujo suporte viabilizou minha dedicação integral aos estudos até hoje.

À minha mãe e porto-seguro, Alzenilde, por incentivar e apoiar minha jornada acadêmica desde que escrevi minhas primeiras vogais e consoantes.

Por fim, ao meu anjo da guarda, à força regeneradora da natureza e ao brilho acolhedor das estrelas, que nos momentos de incerteza me devolveram a paz e clareza necessárias para concluir esta etapa.

## RESUMO

As árvores registram o histórico das interações entre elas e o ambiente em estruturas anatômicas no lenho, as quais formam as camadas de crescimento. Nos trópicos, a grande diversidade de espécies e suas diferentes respostas ao clima fazem com que essas camadas sejam delimitadas por combinações de marcadores anatômicos com níveis variáveis de nitidez, o que dificulta sua interpretação por abordagens dendrocronológicas que não considerem essas particularidades. Diante da fração ainda restrita de espécies tropicais com potencial dendrocronológico confirmado, as xilotecas assumem importância estratégica por preservarem material lenhoso catalogado e apto a subsidiar triagens exploratórias. Esta dissertação, portanto, teve como objetivo geral explorar as coleções biológicas de madeira sob duas perspectivas: como bases materiais para a seleção de espécies com potencial dendrocronológico e como infraestruturas voltadas à produção de conhecimento. No primeiro capítulo, foram caracterizados os marcadores anatômicos associados à delimitação das camadas de crescimento em amostras de madeira de 42 espécies tropicais depositadas na Xiloteca Dr. Valmir Souza de Oliveira, entre as quais 12 não apresentavam descrição anatômica prévia na literatura consultada. A análise integrou parâmetros macro e microscópicos, como distinção e contraste das camadas, poder diagnóstico dos marcadores e intensidade de expressão no lenho, o que permitiu identificar 14 espécimes com alta aptidão anatômica preliminar para validações dendrocronológicas futuras, 17 com aptidão regular e 11 com baixa aptidão. No segundo capítulo, foram analisados metadados de 98 documentos recuperados nas bases Scopus e Web of Science por meio de cienciometria no ambiente R, para quantificar a produção científica, avaliar impactos e mapear redes de colaboração. Os resultados revelaram um campo tematicamente diversificado e marcado por assimetrias de impacto, além de demonstrar a redefinição do papel das xilotecas nas últimas décadas em resposta a mudanças regulatórias e inovações tecnológicas. Os dois capítulos convergem para a conclusão de que a relevância científica das xilotecas reside na articulação entre curadoria rigorosa e uso analítico, condição necessária para que essas coleções respondam às demandas contemporâneas da ciência.

**Palavras-chave:** anatomia da madeira, cienciometria, xilotecas.

## ABSTRACT

Trees record the history of their interactions with the environment in anatomical structures within the wood, which give rise to growth layers. In the tropics, the high diversity of species and their species-specific climatic responses result in growth layers being demarcated by combinations of anatomical markers with varying degrees of clarity, which complicates their interpretation using dendrochronological approaches that do not account for these particularities. Given that the proportion of tropical species with confirmed dendrochronological potential remains limited, xylaria play a strategic role by preserving catalogued wood specimens suitable for supporting exploratory screening efforts. This dissertation therefore aimed to examine wood collections from two complementary perspectives: as material resources for selecting species with dendrochronological potential and as scientific infrastructures for knowledge production. In the first chapter, the anatomical markers associated with the delimitation of growth layers were characterized in wood samples from 42 tropical species housed in the Dr. Valmir Souza de Oliveira Xylarium, 12 of which lacked prior anatomical description in the consulted literature. The analysis integrated macroscopic and microscopic parameters, including the distinctness and contrast of the layers, the diagnostic value of the markers, and their expression intensity in the wood. This approach enabled the identification of 14 specimens with high preliminary anatomical suitability for future dendrochronological validation, 17 with moderate suitability, and 11 with low suitability. In the second chapter, metadata from 98 documents retrieved from the Scopus and Web of Science databases were analyzed through scientometrics in the R environment to quantify scientific output, assess research impact, and map collaboration networks. The results revealed a thematically diverse field marked by asymmetries in impact and showed that the role of xylaria has been redefined in recent decades in response to regulatory changes and technological innovations. Together, both chapters support the conclusion that the scientific relevance of xylaria lies in the articulation between rigorous curation and analytical use, a necessary condition for these collections to meet the contemporary demands of science.

**Keywords:** wood anatomy, scientometrics, xylaria.

## LISTA DE FIGURAS

### ***Camadas de crescimento em espécies tropicais: marcadores anatômicos em amostras de xiloteca e implicações para prospecções dendrocronológicas***

**Figura 1.** Padrões macroscópicos das camadas de crescimento no lenho de espécies tropicais.....24

**Figura 2.** Principais marcadores anatômicos delimitadores de camadas de crescimento.....26

### ***Mapeamento cienciométrico da literatura global sobre xilotecas***

**Figura 1.** Evolução temporal da produção científica global sobre estudos da madeira e uso de xilotecas (1990-2025).....56

**Figura 2.** Distribuição geográfica da produção científica global sobre xilotecas e estudos da madeira.....57

**Figura 3.** Diagrama de Sankey, com o fluxo entre países produtores, palavras-chave e periódicos.....58

**Figura 4.** Rede de coocorrência de palavras-chave da literatura global sobre xilotecas e anatomia da madeira.....59

## LISTA DE TABELAS

### ***Camadas de crescimento em espécies tropicais: marcadores anatômicos em amostras de xiloteca e implicações para prospecções dendrocronológicas***

|                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1.</b> Aspectos anatômicos utilizados na caracterização das camadas de crescimento.....                                                                        | 22 |
| <b>Tabela 2.</b> Sistema de categorização e classificação dos marcadores anatômicos das camadas de crescimento.....                                                      | 22 |
| <b>Tabela 3.</b> Classes de aptidão anatômica dos espécimes para estudos dendrocronológicos com base em parâmetros macroscópicos e microscópicos.....                    | 23 |
| <b>Tabela 4.</b> Distribuição dos elementos anatômicos delimitadores das camadas de crescimento das 42 espécies analisadas.....                                          | 27 |
| <b>Tabela 5.</b> Descrição anatômica do lenho, marcadores delimitadores das camadas de crescimento e classe de aptidão anatômica preliminar dos espécimes avaliados..... | 27 |

### ***Mapeamento cienciométrico da literatura global sobre xilotecas***

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1.</b> Estratégia de busca e sintaxe aplicada para a obtenção dos dados brutos...                                      | 54 |
| <b>Tabela 2.</b> Documentos mais citados globalmente na literatura sobre xilotecas e estudos da madeira.....                     | 55 |
| <b>Tabela 3.</b> Fontes de publicação mais relevantes na literatura global sobre estudos de madeira e xilotecas (1990-2025)..... | 56 |

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                                            |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>                                                                                                                              | <b>12</b> |
| <i>Camadas de crescimento em espécies tropicais: marcadores anatômicos em amostras de xiloteca e implicações para prospecções dendrocronológicas .....</i> | <i>17</i> |
| <b>RESUMO .....</b>                                                                                                                                        | <b>17</b> |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                                                                  | <b>18</b> |
| <b>2 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>                                                                                                                          | <b>20</b> |
| <b>3 RESULTADOS.....</b>                                                                                                                                   | <b>24</b> |
| <b>4 DISCUSSÃO .....</b>                                                                                                                                   | <b>29</b> |
| <b>5 CONCLUSÃO .....</b>                                                                                                                                   | <b>36</b> |
| <b>6 REFERÊNCIAS .....</b>                                                                                                                                 | <b>37</b> |
| <b>MATERIAL SUPLEMENTAR.....</b>                                                                                                                           | <b>48</b> |
| <i>Mapeamento cienciométrico da literatura global sobre xilotecas .....</i>                                                                                | <i>51</i> |
| <b>RESUMO .....</b>                                                                                                                                        | <b>51</b> |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                                                                  | <b>52</b> |
| <b>2 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>                                                                                                                          | <b>53</b> |
| <b>3 RESULTADOS.....</b>                                                                                                                                   | <b>55</b> |
| <b>4 DISCUSSÃO .....</b>                                                                                                                                   | <b>60</b> |
| <b>5 CONCLUSÃO .....</b>                                                                                                                                   | <b>65</b> |
| <b>6 REFERÊNCIAS .....</b>                                                                                                                                 | <b>66</b> |
| <b>MATERIAL SUPLEMENTAR.....</b>                                                                                                                           | <b>72</b> |
| <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                                                                                                                          | <b>76</b> |

## INTRODUÇÃO GERAL

---

Há diversas definições para o que se entende por árvore (Donoghue, 2005; Niklas, 1997; Thomas, 2000). Em termos gerais, um indivíduo arbóreo pode ser descrito como uma planta perene, dotada de caule lenhoso e permanente, capaz de sustentar sua própria arquitetura, produzir ramificações e, em condições favoráveis, alcançar grande porte. No entanto, o desenvolvimento de uma árvore não se expressa apenas em atributos visíveis, como a altura, a espessura do tronco ou a dimensão da copa. Parte essencial de sua trajetória de crescimento permanece inscrita, silenciosamente, em seu interior, onde o tempo deixa os vestígios de sua passagem.

Essa história fica registrada em razão do crescimento secundário, processo inerente às árvores e controlado pela atividade do câmbio vascular (Evert, 2006). Ao longo dos ciclos de crescimento radial do lenho, variações periódicas na atividade cambial resultam na formação de células xilemáticas com diferenças anatômicas entre o início e o fim de cada período de incremento, o que delimita as camadas de crescimento (Esau, 1960). Cada uma dessas camadas conserva, em sua organização anatômica, evidências das condições, favoráveis ou não, sob as quais o indivíduo se desenvolveu, e converte a madeira em uma espécie de arquivo biológico. A leitura e a interpretação desse arquivo são possíveis por meio da dendrocronologia.

A dendrocronologia dedica-se à investigação da idade, do ritmo de incremento e das respostas das árvores às variações ambientais (Fritts, 1976; Schweingruber, 1996; Speer, 2009). O estudo das camadas de crescimento se apoia na relação estreita e sensível entre o desenvolvimento vegetal e os fatores ambientais, como a temperatura, a luminosidade, a oferta de nutrientes, as condições edáficas e os eventos climáticos extremos (Silva *et al.*, 2019). A essas forças externas, somam-se características específicas e intrínsecas da espécie ou do indivíduo, como fatores genéticos, traços ecofisiológicos, fenológicos e morfológicos (De Micco *et al.*, 2016).

A pesquisa dendrocronológica possui raízes antigas. A percepção de que as árvores produzem camadas de crescimento remonta a 322 a.C., nos relatos de Theophrastos Eresios (Schweingruber, 1996), mas foi no século XV que naturalistas europeus

reconheceram o caráter anual dessas camadas e passaram a investigar as razões de suas variações (Speer, 2009). Em regiões temperadas, a regularidade climática estabelece um ritmo periódico para o crescimento das plantas, condição que favorece a formação de camadas de crescimento nítidas e anuais (Worbes e Fichtler, 2010). Ao avançar para as zonas tropicais, entretanto, o conhecimento dendrocronológico tradicional deparou-se com uma realidade muito mais desafiadora: a diversidade da flora, seus padrões fenológicos heterogêneos e, sobretudo, a sazonalidade impulsionada não apenas pelas oscilações de temperatura, mas pelo regime hídrico, conferem à atividade cambial ritmos distintos entre espécies e ambientes. Essa variabilidade pode se manifestar em limites de crescimento descontínuos ou ambíguos, bem como na formação de falsas camadas (Tarelkin *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2019).

Em razão dessa complexidade estrutural, prevaleceu por muito tempo a concepção equivocada de que as árvores sob clima tropical não poderiam atuar como testemunhas confiáveis das dinâmicas temporais e espaciais do seu habitat (Worbes, 2002). Ainda que a formação de camadas de crescimento em espécies tropicais seja reportada desde o início do século XX (Coster, 1927), estudos dendrocronológicos com esses indivíduos só ganharam maior impulso décadas mais tarde (Mariaux, 1970; Worbes, 1985; 2002). Com o debate sobre a periodicidade do incremento cambial nessas regiões superado, o foco deslocou-se para outros desafios, entre eles compreender de que forma o crescimento se expressa no lenho dessas árvores e caracterizar os sinais anatômicos que definem as camadas formadas.

Esse reconhecimento anatômico, entretanto, exige atenção aos detalhes. O limite entre as camadas de crescimento de espécies tropicais costuma ser reconhecido pela associação entre diferentes feições anatômicas, capazes de formar padrões visuais de forte contraste ou de grande sutileza (Silva *et al.*, 2021). O valor diagnóstico de cada marcador também varia substancialmente entre os táxons, de modo que um sinal nítido e determinante em uma espécie pode aparecer de forma irregular, discreta ou apenas complementar em outra (Silva *et al.*, 2019). A anatomia da madeira permite confirmar esses limites por meio da análise de caracteres visíveis em escala macro e microscópica, mas a segurança dessa interpretação depende da experiência do observador ao identificar e ponderar, de forma simultânea, múltiplas evidências (Prendin *et al.*, 2017).

A necessidade de triagens anatômicas dessa natureza é evidente diante da diversidade arbórea tropical, da qual a dendrocronologia ainda acessa uma fração limitada (Hoffmann *et al.*, 2025). Ampliar o conjunto de espécies estudadas, no entanto, encontra entraves práticos associados à vastidão territorial, à disponibilidade de material com determinação taxonômica confiável e às exigências logísticas do trabalho de campo (Gasson *et al.*, 2021; Slik *et al.*, 2015). Nesse cenário, as coleções de madeira assumem papel estratégico, pois permitem uma avaliação exploratória da aptidão dendrocronológica de espécies já catalogadas e preservadas em acervo, sem depender exclusivamente de novas coletas. O valor científico das xilotecas reside também na possibilidade de ultrapassar a finalidade original dos materiais depositados, uma vez que um espécime incorporado há décadas para estudos taxonômicos pode ser revisitado hoje para responder a novas perguntas.

Em suma, se o lenho é a biografia de uma árvore, a xiloteca é a biblioteca em que essas crônicas de madeira repousam e permanecem disponíveis para novas leituras. A partir dessa relação, esta dissertação teve como objetivo geral explorar as coleções biológicas de madeira sob duas perspectivas complementares: como bases materiais para a prospecção de espécies com potencial dendrocronológico e como infraestruturas científicas voltadas à produção de conhecimento. Para desenvolver esses argumentos, o estudo estrutura-se em dois capítulos, redigidos em formato de artigos científicos. O **Capítulo I**, “*Camadas de crescimento em espécies tropicais: marcadores anatômicos em amostras de xiloteca e implicações para prospecções dendrocronológicas*”, caracteriza os marcadores anatômicos associados à delimitação das camadas de crescimento em espécies tropicais e estima a aptidão anatômica do conjunto amostral para estudos dendrocronológicos por meio da integração de parâmetros macro e microscópicos. O **Capítulo II**, “*Mapeamento cienciométrico da literatura global sobre xilotecas*”, examina tendências e aplicações contemporâneas da produção científica sobre xilotecas e evidencia o papel das coleções de madeira como infraestruturas de pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COSTER, C. **Zur Anatomie und Physiologie der Zuwachszonen-und Jahresring bildung in den Tropen**. Leiden: Brill, 1927. <https://doi.org/10.18174/162386>.
- DE MICCO, V. *et al.* Intra-annual density fluctuation in tree rings: how, when, where, and why? **IAWA Journal**, v. 37, n. 2, p. 232-259, 2016. <https://doi.org/10.1163/22941932-20160132>.
- DONOGHUE, M. J. Key innovations, convergence, and success: macroevolutionary lessons from plant phylogeny. **Paleobiology**, v. 31, p. 77-93, 2005. [https://doi.org/10.1666/0094-8373\(2005\)031\[0077:KICASM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1666/0094-8373(2005)031[0077:KICASM]2.0.CO;2).
- ESAU, K. **Anatomy of Seed Plants**. New York: John Wiley & Sons, 1960.
- EVERT, R. F. **Esau's Plant anatomy: meristems, cells, and tissues of the plant body: their structure, function, and development**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 607 p. <https://doi.org/10.1002/0470047380>.
- FRITTS, H. C. **Tree rings and climate**. London; New York: Academic Press, 1976.
- GASSON, P. E. *et al.* WorldForestID: Addressing the need for standardized wood reference collections to support authentication analysis technologies; a way forward for checking the origin and identity of traded timber. **Plants, People, Planet**, v. 3, n. 2, p. 130-141, 2021. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10164>.
- HOFFMANN, W. R. *et al.* Macroscopic Anatomy as a Strategy for Recognizing Commercial Wood from the Brazilian Amazon. **BioResources**, v. 20, n. 4, p. 10300-10327, 2025. <https://doi.org/10.15376/biores.20.4.10300-10327>.
- MARIAUX, A. La périodicité de formation des cernes dans le bois de L'okoume. **Bois et Forêts des Tropiques**, n. 131, p. 37-50, 1970.
- NIKLAS, K. J. **The Evolutionary Biology of Plants**. Chicago: Univ. Chicago Press, 1997.
- PRENDIN, A. L. *et al.* New research perspectives from a novel approach to quantify tracheid wall thickness. **Tree Physiology**, v. 37, p. 976-983, 2017. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpx037>.

SCHWEINGRUBER, F. H. **Tree Rings and Environment – Dendrochronology**. Bern: Haupt, 1996. 609 p.

SILVA, M. D. S. *et al.* The growth ring concept: seeking a broader and unambiguous approach covering tropical species. **Biological Reviews**, v. 94, p. 1161-1178, 2019. <https://doi.org/10.1111/brv.12495>.

SILVA, M. D. S. *et al.* A phylogenetic and functional perspective on the origin and evolutionary shifts of growth ring anatomical markers in seed plants. **Biological Reviews**, v. 96, p. 842-876, 2021. <https://doi.org/10.1111/brv.12681>.

SLIK, J. F. *et al.* An estimate of the number of tropical tree species. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 24, p. 7472-7477, 2015. <https://doi.org/10.1073/pnas.1423147112>.

SPEER, J. H. **Fundamentals of tree-ring research**. University of Arizona, 2009. 509 p.

TARELKIN, Y. *et al.* Growth-ring distinctness and boundary anatomy variability in tropical trees. **IAWA Journal**, v. 37, n. 2, p. 275-287, 2016. <https://doi.org/10.1163/22941932-20160134>.

THOMAS, P. **Trees: Their Natural History**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

WORBES, M. Structural and other adaptations to longterm flooding by trees in Central Amazonia. **Amazoniana**, v. 9, n. 3, p. 459-484, 1985.

WORBES, M. One hundred years of tree-ring research in the tropics: a brief history and an outlook to future challenges. **Dendrochronologia**, v. 20, n. 1-2, 2002. <https://doi.org/10.1078/1125-7865-00018>.

WORBES, M.; FICHTLER, E. Wood anatomy and tree-ring structure and their importance for tropical dendrochronology. In: Junk *et al.* (eds) **Amazonian Floodplain Forests**. Ecological Studies, 2010. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-8725-6\\_17](https://doi.org/10.1007/978-90-481-8725-6_17).

# 1

---

## **Camadas de crescimento em espécies tropicais: marcadores anatômicos em amostras de xiloteca e implicações para prospecções dendrocronológicas**

Manuscrito em preparação para o periódico *Bosque*.

### **RESUMO**

As camadas de crescimento registram o histórico das interações entre uma árvore e o ambiente ao seu redor. Em espécies tropicais, porém, a diversidade de respostas fenológicas e anatômicas dificulta a delimitação dessas camadas, o que exige critérios específicos de interpretação macro e microscópica. Diante disso, este estudo teve como objetivo caracterizar os marcadores anatômicos associados à delimitação das camadas de crescimento em amostras de madeira de 42 espécies tropicais depositadas na Xiloteca Dr. Valmir Souza de Oliveira (UFAM). As amostras foram analisadas em escalas macro e microscópica, com avaliação da distinção, do contraste, dos marcadores delimitadores, de seu poder diagnóstico e da intensidade de expressão no lenho. Com base nesses critérios, os espécimes foram agrupados em classes de aptidão anatômica preliminar para validações dendrocronológicas futuras. A triagem incluiu 12 táxons para os quais não foram localizadas descrições anatômicas prévias na literatura consultada. No conjunto amostral, a zona fibrosa foi o marcador mais frequente (40,5%), seguida pelo achatamento radial/espessamento da parede das fibras (35,7%) e pelo parênquima marginal (19,0%). Camadas distintas ou moderadamente distintas ocorreram em 83,3% das amostras, embora a nitidez dos limites e a intensidade dos marcadores tenham variado. A caracterização das camadas permitiu classificar 14 espécimes com alta aptidão anatômica preliminar, 17 com aptidão regular e 11 com baixa aptidão. A xiloteca mostrou-se uma fonte adequada para triagens anatômicas exploratórias, ainda que a amostragem restrita a um indivíduo por táxon e a escassez de informações sobre as amostras tenham imposto limites à generalização dos resultados para o nível específico ou populacional. A aptidão anatômica preliminar registrada deve ser interpretada, sobretudo, como ponto de partida para investigações dendrocronológicas futuras.

**Palavras-chave:** coleções biológicas, anatomia da madeira, dendrocronologia.

## 1 INTRODUÇÃO

A xilogênese decorre da atividade do câmbio vascular, cujas sucessivas divisões e expansões celulares promovem o incremento radial das plantas lenhosas (Lehnebach *et al.*, 2021). A justaposição de tecidos xilemáticos gerada por esse processo exhibe distinções anatômicas intra e intercamadas; essas diferenças, mais evidentes entre o início e o término do período de incremento radial, definem as camadas de crescimento (Evert, 2006). A atividade cambial responde a fatores ambientais que estabelecem condições favoráveis ou desfavoráveis ao desenvolvimento das plantas, como oscilações de temperatura (Ren *et al.*, 2018), padrões de precipitação (Rahman *et al.*, 2019; Rossi *et al.*, 2012), regimes hidrológicos de cheia e estiagem (Schöngart *et al.*, 2002), eventos climáticos extremos (Sánchez *et al.*, 2004) e intervenções antrópicas (Salladay e Pittermann, 2023). A sensibilidade fisiológica a esses fatores faz da madeira um registro da história de vida das plantas lenhosas e de sua relação com o ambiente. Por isso, as camadas de crescimento são a base de estudos dendrocronológicos (Speer, 2009) e subsidiam investigações climáticas, ecológicas, hidrológicas, geomorfológicas e arqueológicas, entre outras (Dierickx *et al.*, 2024; Kuitens *et al.*, 2022; Morales *et al.*, 2020; Roig, 2000; Tommasiello-Filho, 2009; Zuidema *et al.*, 2022).

Contudo, em espécies tropicais, as camadas de crescimento costumam apresentar limites menos evidentes do que os observados em muitos táxons de zonas temperadas (Islam *et al.*, 2018; Tarelkin *et al.*, 2016; Worbes e Fichtler, 2010). A ausência de sazonalidade climática fortemente contrastante (Rozendaal e Zuidema, 2011), associada à elevada diversidade florística e de habitats (Slik *et al.*, 2015), favorece um comportamento fenológico e cambial heterogêneo ao longo do crescimento arbóreo (Schöngart *et al.*, 2002), que se traduz em variações de nitidez, continuidade e contraste anatômico entre os limites das camadas (Brienen *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2019; Tarelkin *et al.*, 2016; Worbes, 1989). Por longo período, essa heterogeneidade sustentou a crença de que árvores tropicais não registravam informações cronológicas em sua estrutura lenhosa (Marcelo-Peña *et al.*, 2020; Quesada-Román *et al.*, 2020; Ortega-Rodríguez *et al.*, 2022) e, ainda hoje, a utilização de critérios de interpretação fundamentados apenas em espécies temperadas pode gerar incertezas na análise (Ranilla-Huamantuco *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2021; Silva, 2023).

A anatomia da madeira permite o reconhecimento e a validação de camadas de crescimento (Angyalossy *et al.*, 2016; Ferreira *et al.*, 2023), com base na identificação de marcadores estruturais presentes no lenho de forma isolada ou associada, ao longo do incremento radial. Em espécies tropicais, tais marcadores incluem mudanças no diâmetro, arranjo e frequência de vasos, achatamento radial/espessamento da parede das fibras, alargamento de raios, alterações na disposição do parênquima, além da presença de parênquima marginal, zonas fibrosas, canais axiais traumáticos ou floema marginal incluso (Silva *et al.*, 2019; 2021). Esses caracteres, todavia, não se manifestam de maneira uniforme entre as espécies tropicais (Belanganayi *et al.*, 2024; Ranilla-Huamantuco *et al.*, 2025) e diferem em frequência e intensidade de expressão no lenho.

Esse padrão exige investigação anatômica comparativa e criteriosa, a partir da combinação entre análise macroscópica, responsável pela detecção inicial de indícios de delimitação (Gasson *et al.*, 2021), e análise microscópica, para confirmar a natureza anatômica desses limites (Koch *et al.*, 2015). Apesar da ampla aplicabilidade dessa abordagem, o detalhamento anatômico de espécies tropicais ainda esbarra na magnitude do ecossistema. As pesquisas tendem a concentrar-se em espécies de ampla ocorrência na paisagem ou de reconhecido interesse econômico (Slik *et al.*, 2015), e um viés geográfico adicional restringe as amostragens a zonas de fácil acesso logístico (De Blaere *et al.*, 2023; Gasson *et al.*, 2021).

A utilização de coleções botânicas de madeira pode ser uma estratégia metodológica para contornar parte dessas limitações. Xilotecas funcionam como polos de convergência da diversidade, pois reúnem materiais provenientes de expedições históricas, permutas e doações de diferentes regiões (Abeelee *et al.*, 2021; De Blaere *et al.*, 2023; Esteban *et al.* 2023), além de exemplares autóctones nem sempre contemplados por inventários convencionais. Essa multiplicidade de origens mitiga a dependência de novas e onerosas coletas em campo, e favorece investigações anatômicas sob condições padronizadas (Gasson *et al.*, 2021). Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo caracterizar os marcadores anatômicos associados à delimitação das camadas de crescimento em amostras de madeira de 42 táxons tropicais depositadas em uma xiloteca, de modo a subsidiar uma avaliação preliminar da aptidão anatômica desses espécimes para futuras validações dendrocronológicas.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Procedência do material de estudo**

O estudo foi conduzido com amostras de lenho depositadas na Xiloteca Dr. Valmir Souza de Oliveira, vinculada ao Laboratório de Física da Madeira da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Amazonas (FCA/UFAM), em Manaus-AM. O material biológico do acervo é composto por amostras provenientes de coletas, doações e permutas interinstitucionais (Mady *et al.*, 2017).

### **2.2 Delineamento amostral e critérios de seleção**

Foi adotada amostragem intencional por critério (Ahmad e Wilkins, 2025), com seleção conduzida pelo curador responsável pelo acervo. Os critérios de elegibilidade compreenderam validação taxonômica em nível de espécie, comprovação documental da origem institucional e presença de secções transversais com dimensão radial suficiente para abranger ao menos três limites ou faixas anatômicas visualmente compatíveis com camadas de crescimento. A precisão nomenclatural foi assegurada pela atualização dos nomes científicos segundo a base *Plants of the World Online* (Royal Botanic Gardens, Kew, 2026), em conformidade com o sistema APG IV. Em razão das limitações do acervo histórico, adotou-se um espécime por táxon (N = 1).

### **2.3 Procedimentos laboratoriais**

#### *2.3.1 Macroscopia*

Foi efetuado o lixamento transversal das amostras com granulometria progressiva (P100 a P1000, padrão FEPA/Euro), para garantir a visualização das camadas de crescimento. A fotodocumentação do material foi realizada com câmera digital

equipada com lente macro de foco fixo, acoplada a um sistema de iluminação híbrida composto por luz halógena e LED difuso, para manter a fidelidade das cores.

### *2.3.2 Microscopia*

Foram confeccionados corpos de prova orientados, com dimensões aproximadas de 1 cm<sup>3</sup>. O material foi submetido ao abrandamento em solução aquosa de etilenodiamina a 5%, com permanência no reagente entre 24 e 72 horas, conforme a densidade específica de cada espécime. Após o abrandamento, as amostras foram lavadas em água corrente e armazenadas em solução de glicerina e álcool etílico absoluto (1:1). Secções histológicas transversais, com espessura entre 15 e 20 µm, foram obtidas em micrótomo de deslizamento. A confecção das lâminas seguiu adaptações do protocolo descrito por Johansen (1940) e incluiu as seguintes etapas: i) desidratação em série alcoólica crescente; ii) coloração com solução de safranina e azul de astra (1:1); iii) remoção do excesso de corante com álcool etílico absoluto; iv) montagem semipermanente em glicerina; e v) lutagem. A fotodocumentação das lâminas histológicas foi realizada em microscópio óptico, sob aumentos de 40x, 100x e 400x, com câmera digital adaptada à ocular do equipamento.

## **2.4 Caracterização das camadas de crescimento**

A identificação e a classificação dos parâmetros responsáveis pela delimitação das camadas de crescimento no lenho seguiram as diretrizes do Comitê da IAWA (1989) em duas escalas de observação: macroscópica e microscópica.

### *2.4.1 Parâmetros macroscópicos*

A caracterização macroscópica utilizou as imagens obtidas na etapa de fotodocumentação (Seção 2.3.1). Para compor o perfil de cada amostra, foram avaliados dois aspectos visuais: i) definição das camadas de crescimento, classificada como pouco

distinta, moderadamente distinta ou distinta; e ii) contraste cromático entre as camadas, categorizado como ausente, fraco, moderado ou forte.

#### 2.4.2 Parâmetros microscópicos

A caracterização microscópica utilizou as imagens obtidas na etapa de fotodocumentação (Seção 2.3.2). Para a composição do perfil de cada amostra foram identificados os marcadores anatômicos responsáveis pela delimitação das camadas de crescimento, com base nos critérios descritos na Tabela 1.

**Tabela 1.** Aspectos anatômicos utilizados na caracterização das camadas de crescimento.

| Elemento anatômico  | Crítérios observados                                                                                                                       |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Elementos de vasos  | Mudança no diâmetro, arranjo, agrupamento e frequência.                                                                                    |
| Fibras              | Mudança no espessamento da parede celular e no grau de achatamento radial.                                                                 |
| Zonas fibrosas      | Presença ou ausência.                                                                                                                      |
| Raios               | Mudança na distensão dos raios.                                                                                                            |
| Parênquima axial    | Mudança na espessura e no espaçamento de linhas e faixas parenquimáticas, bem como presença ou ausência de diferentes tipos de parênquima. |
| Parênquima marginal | Presença ou ausência.                                                                                                                      |

**Fonte:** Adaptado de Silva *et al.* (2019).

Em seguida, esses marcadores foram classificados em dois eixos analíticos: posição hierárquica na delimitação da camada de crescimento e intensidade de expressão. As categorias adotadas encontram-se resumidas na Tabela 2.

**Tabela 2.** Sistema de categorização e classificação dos marcadores anatômicos das camadas de crescimento.

| Eixos analíticos | Categoria             | Definição                                                                                                    |
|------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Hierarquia       | Marcador principal    | Elemento anatômico mais evidente, responsável pela delimitação da camada de crescimento.                     |
|                  | Marcador secundário   | Elemento anatômico subordinado ao principal, que reforça a delimitação da camada de crescimento.             |
|                  | Marcadores associados | Elementos anatômicos acessórios, que auxiliam na visualização dos marcadores principal e secundário.         |
| Intensidade      | Expressão forte       | Alto contraste cromático e transição celular abrupta, define o limite da camada de forma clara e inequívoca. |

| Eixos analíticos | Categoria          | Definição                                                                                                             |
|------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  | Expressão moderada | Contraste cromático intermediário ou transição mais suave, permite o reconhecimento da camada, mas com menor nitidez. |
|                  | Expressão fraca    | Baixo contraste cromático e transição gradual ou difusa.                                                              |

**Fonte:** Elaborado pela autora.

## 2.5 Classificação dos espécimes

A aptidão anatômica dos espécimes para estudos dendrocronológicos foi estimada pela integração de parâmetros macro e microscópicos das camadas de crescimento. A avaliação, de caráter qualitativo e exploratório, considerou a definição visual das camadas, o contraste cromático entre elas e a intensidade de expressão dos marcadores anatômicos principais, secundários e associados. Com base nesses critérios, as amostras foram agrupadas em três classes de aptidão (Tabela 3).

**Tabela 3.** Classes de aptidão anatômica dos espécimes para estudos dendrocronológicos com base em parâmetros macroscópicos e microscópicos.

| Classe          | Evidência macroscópica                                                    | Evidência microscópica                                                                                   | Interpretação                                                                        |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Alta aptidão    | Camadas distintas ou moderadamente distintas; contraste moderado a forte. | Marcador principal com alto contraste, reforçado por marcador secundário evidente.                       | Espécime/táxon com alta prioridade para validação dendrocronológica futura.          |
| Aptidão regular | Camadas reconhecíveis, mas com contraste limitado.                        | Marcador principal com contraste moderado ou transição mais suave; dependência de marcadores associados. | Espécime/táxon com prioridade intermediária para validação dendrocronológica futura. |
| Baixa aptidão   | Camadas pouco distintas; contraste fraco ou ausente.                      | Marcadores sutis, com baixo contraste, transição difusa ou ambíguos.                                     | Espécime/táxon com baixa prioridade para prospecção dendrocronológica imediata.      |

**Fonte:** Elaborado pela autora.

### 3 RESULTADOS

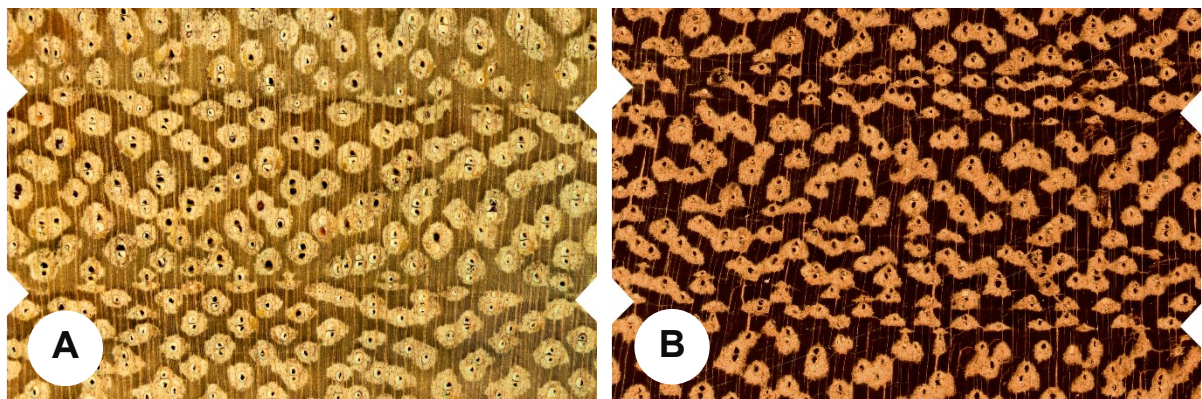
#### 3.1 Composição do conjunto amostral

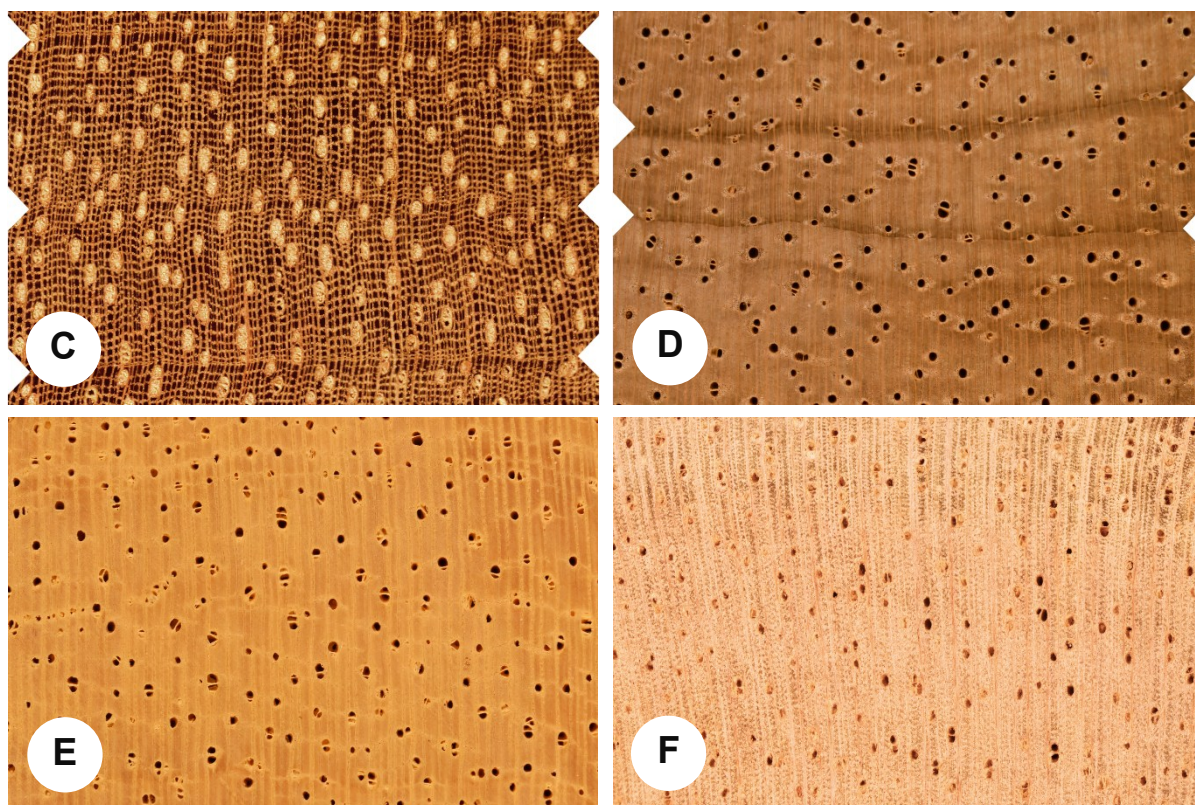
Foram analisadas 42 amostras de espécies tropicais, pertencentes a 17 famílias botânicas e 30 gêneros (Material Suplementar A). Fabaceae foi a família com maior número de táxons (9), seguida por Lecythidaceae (8) e Myristicaceae (6). Os gêneros com maior representação foram *Parkia* (5 espécies), *Virola* (5) e *Couratari* (3), que juntos responderam por 31% dos táxons avaliados.

#### 3.2 Parâmetros macroscópicos das camadas de crescimento

A análise macroscópica revelou predomínio de camadas de crescimento moderadamente distintas (59,5%), seguidas por camadas distintas (23,8%) e pouco distintas (16,7%). Em relação ao contraste cromático, prevaleceu o padrão moderado (38,1%), seguido pelos padrões fraco (28,6%), ausente (21,4%) e forte (11,9%). Exemplos representativos dessas categorias são apresentados na Figura 1.

**Figura 1.** Padrões macroscópicos das camadas de crescimento no lenho de espécies tropicais.





**Legenda:** A) *Amburana cearensis* (Allemão) A.C.Sm., camadas distintas e contraste moderado; B) *Vouacapoua americana* Aubl., camadas moderadamente distintas e sem contraste; C) *Guaiania idatimon* (Aubl.) O.M.Vargas & C.W.Dick, camadas moderadamente distintas e sem contraste; D) *Parkia multijuga* Benth., camadas moderadamente distintas e contraste moderado; E) *Simarouba amara* Aubl., camadas pouco distintas em macroscopia e sem contraste; F) *Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb., camadas pouco distintas em macroscopia e sem contraste.

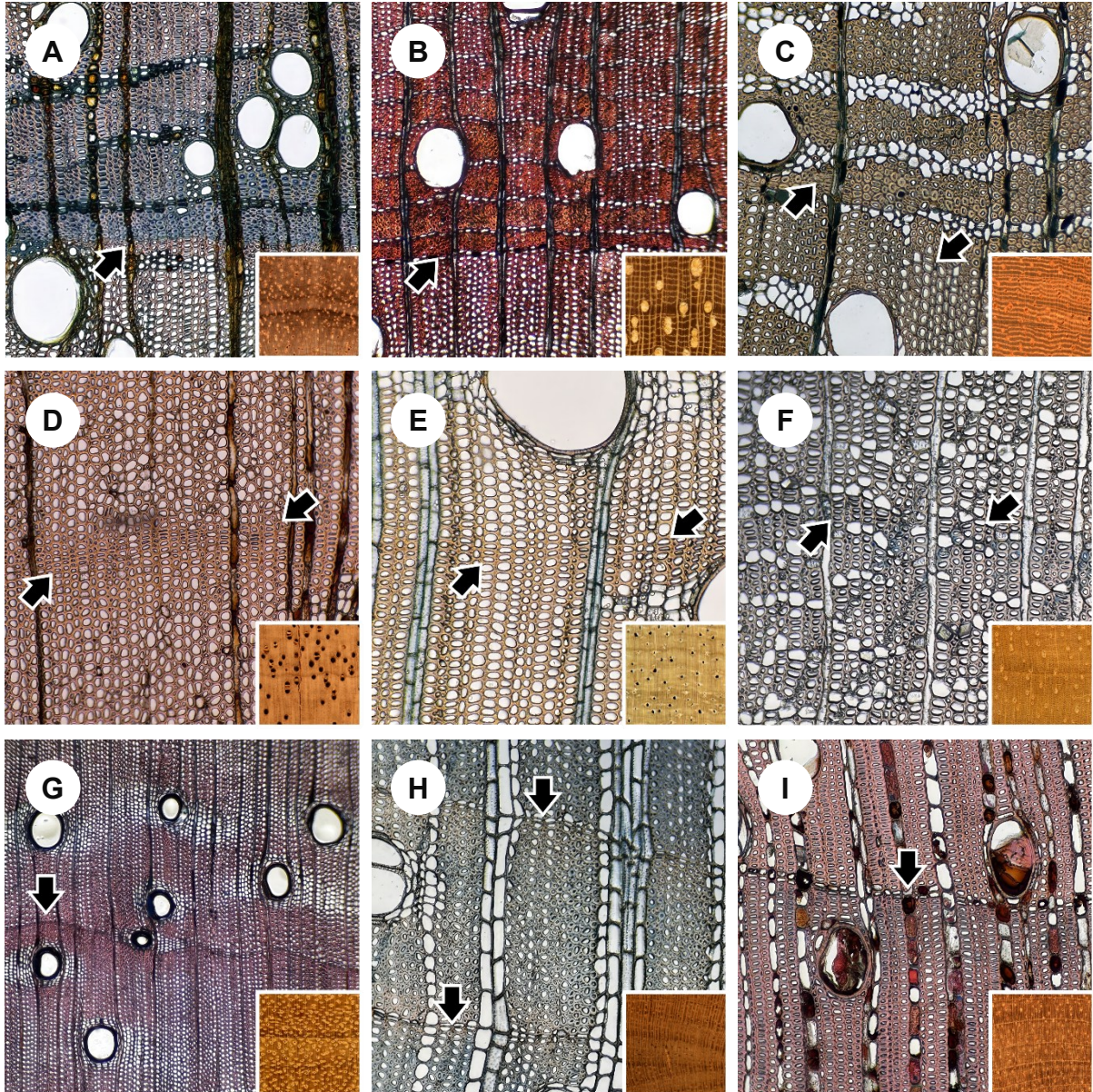
**Fonte:** Dados da pesquisa (2026).

### 3.3 Parâmetros microscópicos das camadas de crescimento

As camadas de crescimento das 42 amostras foram caracterizadas por um marcador principal e um secundário, com marcadores associados atribuídos quando necessário. A zona fibrosa foi o marcador principal mais frequente, seguida pelo achatamento radial e/ou espessamento da parede das fibras e pelo parênquima marginal (Figura 2). Como marcador secundário, predominou o achatamento radial e/ou espessamento da parede das fibras, seguido pela variação no diâmetro dos vasos. A maioria das amostras apresentou entre um e três marcadores associados (85,7%). O número total de marcadores anatômicos por amostra variou de dois a cinco, com maior

frequência de quatro marcadores (40,5%), seguida por cinco marcadores (19,0%) (Tabela 4).

**Figura 2.** Principais marcadores anatômicos delimitadores de camadas de crescimento. O conjunto ilustra a variação estrutural, desde marcadores com forte intensidade de expressão até fronteiras difusas.



**Legenda: Zona fibrosa.** A) *Vismia guianensis* (Aubl.) Pers.; B) *Couratari stellata* A.C.Sm., com o início da zona fibrosa indicado; e C) *Bertholletia excelsa* Bonpl., com zona fibrosa mais difusa, em contraste com as fibras situadas fora dessa região. **Achatamento radial/espessamento da parede das fibras.** D) *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke; E) *Jacaranda copaia* (Aubl.) D.Don; e F) *Hura crepitans* L., com área de achatamento radial/espessamento da parede das fibras sinalizada. **Parênquima marginal.** G) *Parkia velutina* Benoist; H) *Cordia sagotii* I.M.Johnst.; e I) *Iryanthera polyneura* Ducke, com ponto exato do parênquima marginal assinalado.

**Fonte:** Dados da pesquisa (2026).

**Tabela 4.** Distribuição dos elementos anatômicos delimitadores das camadas de crescimento das 42 amostras analisadas.

| Marcadores anatômicos                                | Principal |      | Secundário |      | Associados |      |
|------------------------------------------------------|-----------|------|------------|------|------------|------|
|                                                      | <i>n</i>  | %    | <i>n</i>   | %    | <i>n</i>   | %    |
| Presença de zona fibrosa                             | 17        | 40,5 | -          | -    | -          | -    |
| Achatamento radial/espessamento da parede das fibras | 15        | 35,7 | 16         | 38,1 | 2          | 4,8  |
| Presença de parênquima marginal                      | 8         | 19,0 | -          | -    | -          | -    |
| Mudança no espaçamento de linhas de parênquima       | 1         | 2,4  | 8          | 19,0 | 2          | 4,8  |
| Diferenciação de parênquima                          | 1         | 2,4  | 2          | 4,8  | 9          | 21,4 |
| Mudança no diâmetro dos vasos                        | -         | -    | 14         | 33,3 | 28         | 66,7 |
| Alargamento dos raios                                | -         | -    | 1          | 2,4  | 8          | 19,0 |
| Mudança no agrupamento de vasos                      | -         | -    | 1          | 2,4  | 7          | 16,7 |
| Mudança na espessura de linhas de parênquima         | -         | -    | -          | -    | 5          | 11,9 |
| Mudança na frequência de vasos                       | -         | -    | -          | -    | 4          | 9,5  |
| Mudança no arranjo de vasos                          | -         | -    | -          | -    | 4          | 9,5  |

**Legenda:** *n* = número de observações; % = percentagem; (-) = dado não observado.

**Fonte:** Dados da pesquisa (2026).

### 3.4 Caracterização anatômica e classificação dos espécimes

A Tabela 5 reúne a caracterização anatômica das amostras analisadas, conforme as normas padronizadas pelo Comitê da IAWA (1989). A tabela também apresenta os marcadores anatômicos utilizados na delimitação das camadas de crescimento, a intensidade de expressão dos marcadores (principal e secundário) e a classificação dos espécimes para aplicação em estudos dendrocronológicos.

**Tabela 5.** Descrição anatômica do lenho, marcadores delimitadores das camadas de crescimento e classe de aptidão anatômica preliminar dos espécimes avaliados.

| Amostra/Espécie                  | CC | Marcadores anatômicos |                      |          | Po. | Ar. | Ag.   | PA     | CAA             |
|----------------------------------|----|-----------------------|----------------------|----------|-----|-----|-------|--------|-----------------|
|                                  |    | MP                    | MS                   | MA       |     |     |       |        |                 |
| Annonaceae                       |    |                       |                      |          |     |     |       |        |                 |
| <i>Annona ambotay</i>            | MD | AEF <sup>(ii)</sup>   | ELP <sup>(iii)</sup> | EsLP, DV | 5   | 7   | 9     | 87     | Aptidão regular |
| <i>Annona foetida</i>            | MD | ZF <sup>(i)</sup>     | AEF <sup>(i)</sup>   | EsLP, DV | 4   | 7   | 9     | 88, 78 | Alta aptidão    |
| <i>Fusaea longifolia</i>         | D  | ZF <sup>(iii)</sup>   | AEF <sup>(ii)</sup>  | DV       | 5   | 7   | 9     | 88, 77 | Aptidão regular |
| Apocynaceae                      |    |                       |                      |          |     |     |       |        |                 |
| <i>Rhigospira quadrangularis</i> | PD | AEF <sup>(iii)</sup>  | DV <sup>(iii)</sup>  | AV       | 5   | 7   | 10, 9 | 76, 78 | Baixa aptidão   |

| Amostra/Espécie          | CC | Marcadores anatômicos |                      |              | Po. | Ar.                 | Ag.   | PA         | CAA             |
|--------------------------|----|-----------------------|----------------------|--------------|-----|---------------------|-------|------------|-----------------|
|                          |    | MP                    | MS                   | MA           |     |                     |       |            |                 |
| Bignoniaceae             |    |                       |                      |              |     |                     |       |            |                 |
| Jacaranda copaia         | MD | AEF <sup>(i)</sup>    | DV <sup>(iii)</sup>  | DP           | 4   | 7                   | 9     | 82, 81     | Aptidão regular |
| Boraginaceae             |    |                       |                      |              |     |                     |       |            |                 |
| Cordia sagotii           | MD | PM <sup>(ii)</sup>    | AEF <sup>(ii)</sup>  | AR, DV       | 5   | 7                   | 9     | 80, 79     | Aptidão regular |
| Burseraceae              |    |                       |                      |              |     |                     |       |            |                 |
| Protium altsonii         | MD | AEF <sup>(ii)</sup>   | DV <sup>(ii)</sup>   | –            | 5   | 7                   | 9     | 79         | Aptidão regular |
| Euphorbiaceae            |    |                       |                      |              |     |                     |       |            |                 |
| Hura crepitans           | MD | AEF <sup>(iii)</sup>  | DV <sup>(iii)</sup>  | –            | 5   | 7                   | 9     | 88, 76     | Baixa aptidão   |
| Fabaceae                 |    |                       |                      |              |     |                     |       |            |                 |
| Amburana cearensis       | D  | ZF <sup>(i)</sup>     | DV <sup>(i)</sup>    | DP, ArV, AV  | 5   | 7, 7 <sup>ob</sup>  | 9     | 83, 79     | Alta aptidão    |
| Cedrelinga cateniformis  | MD | AEF <sup>(i)</sup>    | DV <sup>(ii)</sup>   | AV           | 5   | 7                   | 9, 10 | 79         | Alta aptidão    |
| Macrolobium acaciifolium | MD | PM <sup>(i)</sup>     | AEF <sup>(i)</sup>   | DP, DV       | 5   | 7                   | 9     | 80, 83, 82 | Alta aptidão    |
| Parkia gigantocarpa      | PD | AEF <sup>(ii)</sup>   | DP <sup>(iii)</sup>  | DV, ArV      | 5   | 7, 7 <sup>ob</sup>  | 9     | 80, 83, 81 | Baixa aptidão   |
| Parkia multijuga         | MD | PM <sup>(ii)</sup>    | AEF <sup>(ii)</sup>  | DV, DP       | 4   | 7                   | 9     | 80, 83, 81 | Aptidão regular |
| Parkia nitida            | MD | PM <sup>(ii)</sup>    | AEF <sup>(ii)</sup>  | DP, DV       | 5   | 7, 7 <sup>ob</sup>  | 9     | 81, 83     | Aptidão regular |
| Parkia paraensis         | MD | PM <sup>(i)</sup>     | AEF <sup>(i)</sup>   | DV, DP, ArV  | 4   | 7, 7 <sup>ob</sup>  | 9     | 80, 83, 81 | Alta aptidão    |
| Parkia velutina          | D  | PM <sup>(i)</sup>     | AEF <sup>(i)</sup>   | DP, DV       | 4   | 7                   | 9     | 81, 82     | Alta aptidão    |
| Vouacapoua americana     | D  | ZF <sup>(i)</sup>     | AEF <sup>(i)</sup>   | DV, DP       | 5   | 7 <sup>ob</sup> , 7 | 9     | 83, 81, 82 | Alta aptidão    |
| Hypericaceae             |    |                       |                      |              |     |                     |       |            |                 |
| Vismia guianensis        | D  | ZF <sup>(i)</sup>     | AEF <sup>(ii)</sup>  | DV, FV, ELP  | 5   | 7, 7 <sup>ob</sup>  | 9     | 86, 88     | Alta aptidão    |
| Lauraceae                |    |                       |                      |              |     |                     |       |            |                 |
| Aniba rosodora           | D  | ZF <sup>(ii)</sup>    | AEF <sup>(ii)</sup>  | DV           | 5   | 7, 7 <sup>ob</sup>  | 9     | 80, 79     | Alta aptidão    |
| Nectandra amazonum       | MD | ZF <sup>(ii)</sup>    | AEF <sup>(ii)</sup>  | FV, DV       | 5   | 7                   | 9     | 79         | Aptidão regular |
| Lecythidaceae            |    |                       |                      |              |     |                     |       |            |                 |
| Bertholletia excelsa     | MD | ZF <sup>(ii)</sup>    | ELP <sup>(iii)</sup> | EsLP, DP     | 5   | 7                   | 9     | 87, 86     | Baixa aptidão   |
| Couratari guianensis     | MD | ZF <sup>(ii)</sup>    | ELP <sup>(ii)</sup>  | DV, FV       | 5   | 7                   | 9     | 87, 88     | Aptidão regular |
| Couratari oblongifolia   | MD | ZF <sup>(ii)</sup>    | ELP <sup>(iii)</sup> | DV           | 5   | 7                   | 9     | 87, 86     | Aptidão regular |
| Couratari stellata       | MD | ZF <sup>(i)</sup>     | ELP <sup>(ii)</sup>  | DV, AR       | 5   | 7                   | 9     | 87         | Aptidão regular |
| Eschweilera coriacea     | D  | ZF <sup>(i)</sup>     | ELP <sup>(i)</sup>   | EsLP, DV, AV | 5   | 7                   | 9     | 87         | Alta aptidão    |
| Eschweilera grandiflora  | D  | ZF <sup>(i)</sup>     | ELP <sup>(ii)</sup>  | EsLP, DV     | 5   | 7                   | 9     | 87         | Alta aptidão    |
| Guaianania idatimon      | D  | ZF <sup>(i)</sup>     | ELP <sup>(iii)</sup> | DV, AV, AR   | 5   | 7                   | 9, 10 | 87         | Alta aptidão    |
| Gustavia elliptica       | MD | AEF <sup>(ii)</sup>   | DP <sup>(iii)</sup>  | DV, AV, AR   | 5   | 7                   | 10, 9 | 77, 88     | Aptidão regular |
| Malpighiaceae            |    |                       |                      |              |     |                     |       |            |                 |
| Pterandra arborea        | PD | AEF <sup>(iii)</sup>  | AR <sup>(iii)</sup>  | DV           | 5   | 7                   | 9     | 76, 78     | Baixa aptidão   |
| Malvaceae                |    |                       |                      |              |     |                     |       |            |                 |
| Lueheopsis rosea         | MD | PM <sup>(ii)</sup>    | AEF <sup>(ii)</sup>  | AR, DV, AEF  | 5   | 7                   | 9, 10 | 88, 76     | Aptidão regular |
| Ochroma pyramidale       | PD | AEF <sup>(iii)</sup>  | AV <sup>(iii)</sup>  | DV, AR       | 5   | 7                   | 9     | 77, 76     | Baixa aptidão   |
| Meliaceae                |    |                       |                      |              |     |                     |       |            |                 |
| Carapa guianensis        | PD | ELP <sup>(iii)</sup>  | DV <sup>(iii)</sup>  | –            | 5   | 7                   | 9, 10 | 89, 79     | Baixa aptidão   |

| Amostra/Espécie          | CC | Marcadores anatômicos |                     |             | Po. | Ar.                 | Ag.   | PA         | CAA             |
|--------------------------|----|-----------------------|---------------------|-------------|-----|---------------------|-------|------------|-----------------|
|                          |    | MP                    | MS                  | MA          |     |                     |       |            |                 |
| Moraceae                 |    |                       |                     |             |     |                     |       |            |                 |
| Clarisia racemosa        | MD | DP <sup>(ii)</sup>    | AEF <sup>(ii)</sup> | ArV, DV     | 5   | 7 <sup>ob</sup> , 7 | 9     | 83, 81, 80 | Aptidão regular |
| Maquira coriacea         | PD | ZF <sup>(iii)</sup>   | DV <sup>(iii)</sup> | AV          | 5   | 7, 7 <sup>ob</sup>  | 10    | 80         | Baixa aptidão   |
| Myristicaceae            |    |                       |                     |             |     |                     |       |            |                 |
| Iryanthera polyneura     | MD | PM <sup>(ii)</sup>    | DV <sup>(iii)</sup> | AEF         | 5   | 7                   | 9     | 89, 78     | Baixa aptidão   |
| Virola carinata          | MD | AEF <sup>(iii)</sup>  | DV <sup>(iii)</sup> | FV          | 5   | 7                   | 9     | 79         | Baixa aptidão   |
| Virola coelhoi           | MD | AEF <sup>(i)</sup>    | DV <sup>(iii)</sup> | AR          | 5   | 7                   | 9     | 79, 78     | Alta aptidão    |
| Virola michelii          | D  | AEF <sup>(i)</sup>    | DV <sup>(ii)</sup>  | -           | 5   | 7                   | 10    | 79         | Alta aptidão    |
| Virola multicostata      | MD | ZF <sup>(ii)</sup>    | AEF <sup>(ii)</sup> | DV          | 5   | 7                   | 9     | 79         | Aptidão regular |
| Virola pavonis           | MD | AEF <sup>(ii)</sup>   | DV <sup>(ii)</sup>  | -           | 5   | 7                   | 9     | 78         | Aptidão regular |
| Simaroubaceae            |    |                       |                     |             |     |                     |       |            |                 |
| Simarouba amara          | PD | AEF <sup>(iii)</sup>  | DV <sup>(iii)</sup> | -           | 5   | 7                   | 9, 11 | 80, 81     | Baixa aptidão   |
| Solanaceae               |    |                       |                     |             |     |                     |       |            |                 |
| Duckeodendron cestroides | MD | ZF <sup>(ii)</sup>    | AEF <sup>(ii)</sup> | DV, AR, ELP | 5   | 7                   | 10, 9 | 87, 88     | Aptidão regular |

**Legenda: Colunas.** CC = Camadas de crescimento (D = distintas; MD = moderadamente distintas; PD = pouco distintas); MP = Marcador principal; MS = Marcador secundário; MA = Marcadores associados; Po. = Porosidade; Ar. = Arranjo dos vasos; Ag. = Agrupamento dos vasos; PA = Parênquima axial; CAA = Classe de aptidão anatômica. **Características anatômicas conforme IAWA (1989).** 4 = Porosidade em anel semicircular; 5 = Porosidade difusa; 7 = Arranjo radial; 7<sup>ob</sup> = Arranjo oblíquo; 9 = Vasos solitários; 10 = Múltiplos radiais (4 ou mais); 11 = Vasos em cachos; 76 = Parênquima axial difuso; 77 = Parênquima difuso em agregados; 78 = Paratraqueal escasso; 79 = Vasicêntrico; 80 = Aliforme; 81 = Aliforme losangular; 82 = Aliforme linear; 83 = Confluente; 86 = Em faixas estreitas ou linhas com até três células de largura; 87 = Reticulado; 88 = Escalariforme; 89 = Em faixas marginais ou aparentemente marginais.

**Marcadores anatômicos delimitadores das camadas de crescimento.** DV = Diâmetro dos vasos; AV = Agrupamento de vasos; ArV = Arranjo de vasos; FV = Frequência de vasos; AR = Alargamento dos raios; ELP = Espaçamento de linhas de parênquima; EsLP = Espessura de linhas de parênquima; DP = Diferenciação de parênquima; ZF = Zona fibrosa; AEF = Achatamento radial/espessamento da parede das fibras; PM = Parênquima marginal. **Intensidade de expressão dos marcadores.** <sup>(i)</sup> = Forte; <sup>(ii)</sup> = Moderada; <sup>(iii)</sup> = Fraca.

**Fonte:** Dados da pesquisa (2026).

## 4 DISCUSSÃO

### 4.1 Escalas de observação em diálogo para uma leitura da madeira tropical

Macroscopia e microscopia operam de modo complementar na análise anatômica de camadas de crescimento, especialmente em espécies tropicais. Elementos estruturais

sutis associados à delimitação das camadas podem não ser detectados em escala macroscópica, o que favorece a classificação equivocada de táxons como pouco promissores para abordagens dendrocronológicas (Blagitiz *et al.*, 2019; Gasson *et al.*, 2021; Tarelkin *et al.*, 2016). Em sentido inverso, contrastes visuais acentuados, resultantes do acúmulo de compostos fenólicos, extrativos ou resinas, podem simular fronteiras de crescimento sem correspondência com eventos cambiais reais (Gärtner e Schweingruber, 2013; Wiernann e Williamson, 1988). A integração das duas escalas de observação neste estudo favoreceu uma avaliação mais criteriosa das 42 amostras, ao considerar a complexidade anatômica própria do lenho tropical.

Ainda assim, a inspeção macroscópica isolada foi capaz de identificar camadas de crescimento distintas ou moderadamente distintas em 83,3% do conjunto amostral (Seção 3.2). Essa elevada taxa de detecção reforça a premissa de que parte das limitações historicamente atribuídas à dendrocronologia tropical decorre de abordagens metodológicas pouco ajustadas às espécies, e não da ausência generalizada de limites anatômicos reconhecíveis no lenho (Brienen *et al.*, 2016; Worbes, 2002). Resultados como este indicam que a avaliação de espécies tropicais exige critérios analíticos ajustados às particularidades anatômicas e ecológicas das florestas que as abrigam, em vez da reprodução de modelos concebidos para outros contextos bioclimáticos. Tal adequação amplia o alcance das investigações anatômicas e dendrocronológicas sobre a biodiversidade tropical e fortalece a produção de conhecimento sobre esses ecossistemas.

#### **4.2 Marcadores anatômicos predominantes e possíveis implicações funcionais**

A zona fibrosa e o achatamento radial/espessamento da parede das fibras foram os principais marcadores anatômicos do conjunto amostral analisado, com ocorrência em 40,5% e 35,7% das amostras, respectivamente. A predominância observada desses marcadores acompanha o padrão descrito em levantamentos realizados para espécies neotropicais (Marcelo-Peña *et al.*, 2020; Ranilla-Huamantuco *et al.*, 2025; Shimamoto *et al.*, 2016). Em escala global, Silva *et al.* (2021) e Silva (2023) identificaram o

espessamento da parede/achatamento radial das fibras como o sinal anatômico mais amplamente distribuído entre angiospermas com camadas de crescimento.

Os dois marcadores anatômicos descritos costumam surgir como consequência da redução da atividade do câmbio vascular em condições ambientais desfavoráveis (Callado *et al.*, 2013; Gao *et al.*, 2021). Em tais períodos, a atividade de divisão celular no câmbio declina e as células formadas passam a contar com menor tempo para expansão radial e maior tempo relativo para a deposição da parede celular secundária (Callado *et al.*, 2013; Pumijumnong *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2021). Esse balanço histológico resulta na formação de zonas com fibras de paredes espessas, diâmetro radial reduzido e lúmen estreito (Almeida *et al.*, 2022; Callado *et al.*, 2013; Quesada-Román *et al.*, 2022). O processo culmina na formação de uma faixa de baixa condutividade hídrica, a qual marca o término do crescimento arbóreo naquele período (Carlquist, 1988; Duran *et al.*, 2025).

De acordo com Worbes (1989, 1995), a dormência cambial pode ocorrer como resposta tanto a estações secas quanto a pulsos de inundação. Todavia, na região tropical, a restrição hídrica não necessita ser extrema para que esse processo ocorra, pois pequenas variações na disponibilidade de água, como precipitações abaixo de 60 mm mensais (Quesada-Román *et al.*, 2022), já bastam para induzir o achatamento radial/espessamento da parede das fibras (Fichtler *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 2021). Esse padrão fisiológico é análogo ao das zonas temperadas, onde o câmbio vascular reduz sua atividade em resposta a geadas e baixas temperaturas (Di Filippo *et al.*, 2021; Ferrero *et al.*, 2014), no entanto, em espécies tropicais e subtropicais, esse fenômeno anatômico tende a apresentar expressão mais discreta (Figura 2F) (Nath *et al.*, 2016; Pumijumnong *et al.*, 2023). Dada essa descrição, os marcadores costumam atuar em associação com outras características para melhor delimitar as fronteiras das camadas de crescimento (Blagitz *et al.*, 2019; Shimamoto *et al.*, 2016; Tarelkin *et al.*, 2016). Neste estudo, o achatamento radial/espessamento da parede das fibras apresentou maior valor diagnóstico quando utilizado como critério secundário na avaliação da aptidão anatômica das amostras para estudos dendrocronológicos, em associação à identificação prévia da zona fibrosa. Quando interpretado como marcador principal isolado, mostrou maior dependência do contexto anatômico geral da amostra.

A variação diamétrica dos vasos atuou como marcador associado em 66,7% das amostras avaliadas e como secundário na fração restante da amostragem, sem exercer a função de indicador anatômico principal (Tabela 4). Essa variação é, comumente, uma resposta fisiológica às oscilações hídricas sazonais (Ferrero *et al.*, 2014; Olson *et al.*, 2023). No estágio inicial da estação de crescimento, a alta disponibilidade de água e a elevada pressão de turgor maximizam a expansão celular, com a consequente formação de vasos mais largos; à medida que a umidade edáfica diminui, a pressão de turgor declina, o que inverte essa dinâmica e leva à formação de elementos de vasos mais estreitos e resistentes ao embolismo (Fichtler e Worbes 2012; Sperry *et al.*, 2005). A ausência desse parâmetro como marcador principal é coerente com o argumento de Silva *et al.* (2021) de que mudanças no diâmetro dos vasos não delimitam uma camada de crescimento de forma autossuficiente, mas reforçam e refinam os limites delineados por outros marcadores.

A zona fibrosa e o parênquima marginal apresentaram forte capacidade diagnóstica para a avaliação da aptidão anatômica em estudos dendrocronológicos quando atuaram como marcadores principais. Esse desempenho convergente evidencia a capacidade desses elementos de gerar transições visualmente bem definidas no tecido xilemático. A diferença entre os dois residiu na frequência: o parênquima marginal foi marcador principal em apenas 19% das amostras, ante 40,5% da zona fibrosa (Tabela 4). Essa assimetria pode estar relacionada à própria natureza funcional desses marcadores. A zona fibrosa representa um padrão mais amplo de variação cambial, associado a mudanças na disponibilidade hídrica e na temperatura (Silva *et al.*, 2021). O parênquima marginal, por sua vez, pode representar uma estratégia de armazenamento, na qual o acúmulo de amido e sua posterior hidrólise elevam o potencial osmótico nos vasos adjacentes e disponibilizam substrato energético para a retomada do crescimento no início da estação favorável (Carlquist, 1988; Fichtler e Worbes, 2012). Sua menor ocorrência nas amostras analisadas pode estar relacionada ao caráter mais específico desse marcador, associado a determinados grupos taxonômicos e contextos ecológicos. (Silva *et al.*, 2021).

### 4.3 Aptidão anatômica e padrões observados entre táxons

Entre os grupos taxonômicos avaliados (Tabela 5), Fabaceae concentrou o maior número de espécimes com alta aptidão anatômica preliminar ( $n = 6$ ), resultado compatível com sua ampla representatividade em pesquisas dendrocronológicas e com o elevado número de gêneros que apresentam camadas de crescimento anuais bem definidas (Brienen *et al.*, 2016; Giraldo *et al.*, 2023; Portal-Cahuana *et al.*, 2023b; Schöngart *et al.*, 2017). *Amburana cearensis* figura entre os táxons tropicais mais referenciados na construção de cronologias (Baker *et al.*, 2015; Paredes-Villanueva *et al.*, 2015; López e Villalba, 2016; Godoy-Veiga *et al.*, 2021; Portal-Cahuana *et al.*, 2023b; López *et al.*, 2022) e, neste estudo, exibiu camadas de crescimento fortemente delimitadas por zona fibrosa e mudança no diâmetro dos vasos. *Cedrelinga cateniformis* (Figura 2D), também classificada com características favoráveis para aplicações dendrocronológicas na avaliação realizada, possui desenvolvimento arbóreo sensível à sazonalidade climática, conforme demonstrado em levantamentos realizados em florestas tropicais (Chambi-Legoas *et al.*, 2026; Ortega-Rodríguez, 2023; Soliz-Gamboa *et al.*, 2011). A concordância entre as observações anatômicas deste estudo e os registros bibliográficos reforça a adequação da triagem macro e microscópica como etapa inicial para elencar espécies prioritárias em prospecções dendrocronológicas.

Entre os representantes de Lauraceae, família que possui um vasto histórico de aplicações em reconstruções climáticas (Reis-Avila e Oliveira, 2017; Spathelf *et al.*, 2000), a amostra de *Aniba rosodora* apresentou alta aptidão anatômica preliminar. Esse resultado é coerente com Botosso e Vetter (1991), que descreveram padrão sazonal no crescimento secundário da espécie associado a períodos de maior estresse hídrico. A amostra de *Vismia guianensis* (Hypericaceae) também apresentou alta aptidão anatômica preliminar, com limites bem definidos por zona fibrosa e reforçados pelo achatamento radial/espessamento da parede das fibras (Figura 2A). Esse resultado, entretanto, diverge de Ortiz *et al.* (2017), que registraram baixa nitidez das camadas de crescimento para a espécie e apontaram tal característica como obstáculo à precisão das medições dendrocronológicas. A discrepância reforça que a expressão dos limites de crescimento pode variar entre indivíduos, possivelmente em resposta a condições

microambientais, histórico de crescimento ou características locais do sítio (Brienen *et al.*, 2006; Schöngart *et al.*, 2015).

Em Lecythidaceae, a aptidão anatômica preliminar esteve associada sobretudo à recorrência de zonas fibrosas e a mudanças no espaçamento ou na espessura das linhas de parênquima próximas aos limites das camadas. Espécies dessa família já apresentam uso consolidado tanto em estudos dendrocronológicos e reconstruções climáticas quanto na determinação prática de ciclos de corte no manejo florestal (Caetano Andrade *et al.*, 2024; Duran *et al.*, 2025; Schöngart *et al.*, 2015). Contudo, o desempenho favorável de algumas espécies não assegura padrão semelhante para todo o grupo. A variação registrada entre as amostras avaliadas (alta aptidão = 4; aptidão regular = 3; baixa aptidão = 1) indica a necessidade de validação específica por táxon.

A heterogeneidade anatômica dentro de um mesmo gênero foi um padrão transversal ao conjunto amostral, registrado em múltiplos grupos taxonômicos. Em *Virola*, as espécies avaliadas diferiram quanto à nitidez das camadas de crescimento e à intensidade de expressão do achatamento radial/espessamento da parede das fibras, padrão compatível com a variabilidade estrutural já documentada para o gênero e para Myristicaceae (Giraldo *et al.*, 2022; Mariño-Tello *et al.*, 2025; Tanaka *et al.*, 2022; Trevizor, 2011). Em *Parkia*, observou-se contraste semelhante: *P. velutina* apresentou camadas distintas neste estudo e também foi descrita dessa forma por Nicolini *et al.* (2012), enquanto *P. gigantocarpa* exibiu camadas pouco distintas, em concordância com Trevizor (2011). Variação análoga foi registrada em *Annona*, cujas espécies diferiram quanto à clareza dos marcadores delimitadores, em consonância com a heterogeneidade intragenérica já descrita para o grupo (Devall *et al.*, 1995; Marcati *et al.*, 2006). Esses resultados indicam que generalizações em escalas taxonômicas amplas devem ser evitadas, pois a variação anatômica interespecífica limita abordagens baseadas no parentesco genérico.

Por fim, a triagem caracterizou anatomicamente as camadas de crescimento de 12 táxons sem descrição prévia localizada na literatura consultada, dos quais alguns exemplos macro e microscópicos são apresentados no Material Suplementar B. Entre eles, *Parkia paraensis*, *Annona foetida* e *Virola coelhoi* exibiram alta aptidão anatômica preliminar, em razão da presença de marcadores bem definidos. *Cordia sagotii*, *Virola multicostata* e *Annona ambotay* foram enquadrados como de aptidão regular, enquanto

*Gustavia elliptica*, *Iryanthera polyneura*, *Maquira coriacea*, *Pterandra arborea*, *Rhigospira quadrangularis* e *Virola carinata* apresentaram viabilidade imediata reduzida. Mesmo nesses casos, as descrições anatômicas obtidas constituem referências morfológicas iniciais para avaliações subsequentes.

#### 4.4 Limitações metodológicas e perspectivas futuras

Recorrer a xilotecas é uma alternativa metodológica diante dos desafios associados à coleta em florestas tropicais. Esses acervos reúnem amostras de diferentes procedências, o que amplia a representatividade taxonômica e geográfica sem a necessidade de novas incursões a campo (Abeele *et al.*, 2021; De Blaere *et al.*, 2023). A disponibilidade imediata do material também favorece a padronização das análises anatômicas em laboratório (Gasson *et al.*, 2021). Todavia, a adoção de uma única amostra por táxon, imposta pela estrutura do acervo deste estudo, impediu a estimativa da variabilidade intraespecífica. Assim, a aptidão anatômica atribuída a cada espécie expressa apenas a condição morfológica do espécime analisado, sem inferência direta sobre sua representatividade populacional. A escassez de metadados ambientais, como características edáficas e topográficas do sítio de coleta, regime hídrico, posição da árvore no dossel e dinâmica de competição local, também limitou a interpretação funcional dos marcadores anatômicos, pois não permitiu relacioná-los de forma direta a possíveis indutores climáticos.

Amostras de espécies consagradas na literatura, como *Bertholletia excelsa* (Araújo *et al.*, 2026; Baker *et al.*, 2015; Brien e Zuidema, 2005; Caetano-Andrade *et al.*, 2019; Camargo *et al.*, 1994; Fortes *et al.*, 2023; Schöngart *et al.*, 2015) e *Carapa guianensis* (Callado *et al.*, 2013; Granato-Souza *et al.*, 2019), não apresentaram o padrão claro de camadas de crescimento esperado para esses táxons. Como a literatura já demonstra a aplicabilidade dendrocronológica dessas espécies, esse desempenho reforça que um corpo de prova retrata estritamente o histórico de crescimento do indivíduo amostrado. Além dessa restrição amostral, os resultados evidenciam os limites técnicos de uma avaliação estritamente anatômica. Embora *Hura crepitans* tenha uso dendrocronológico

comprovado (Portal-Cahuana *et al.*, 2023a), a amostra analisada neste estudo apresentou baixa aptidão preliminar (Figura 2F). Segundo López *et al.* (2012), a delimitação das camadas de crescimento nessa espécie exige medições radiais múltiplas e densitometria de raios X, devido à irregularidade dos marcadores e à presença de anéis em cunha, desafios que a anatomia convencional, quando aplicada de forma isolada, não permite solucionar.

Diante disso, as perspectivas para trabalhos futuros organizam-se em duas frentes, voltadas a responder diretamente às limitações do presente estudo. A primeira abrange a validação *in loco*, por meio de amostragens populacionais das espécies inéditas que apresentaram alta aptidão anatômica preliminar, o que permitirá quantificar a variabilidade intraespecífica e extrapolar a triagem para o nível de sítio. A segunda concentra-se na confirmação da periodicidade das camadas de crescimento dessas espécies, com abordagens integradas que combinem *crossdating*, datação por radiocarbono e análises de isótopos estáveis. A aplicação combinada dessas técnicas poderá validar a anualidade cambial e consolidar o potencial dendrocronológico dos táxons identificados como promissores.

## 5 CONCLUSÃO

A integração das escalas macro e microscópica ofereceu base consistente para a triagem anatômica de amostras de 42 espécies tropicais. Ao aplicar essa abordagem a uma xiloteca, o estudo demonstra o valor das coleções de madeira como fontes prospectivas para reconhecer espécies promissoras e orientar novas investigações dendrocronológicas, ainda que a amostragem restrita a um indivíduo por táxon e a escassez de informações ambientais sobre as amostras tenham imposto limites à interpretação e extrapolação dos resultados para as espécies. A aptidão anatômica preliminar identificada representa, portanto, ponto de partida para validações futuras que poderão, quando confirmada a periodicidade das camadas, subsidiar a construção de cronologias capazes de ampliar a interpretação ecológica e climática das florestas tropicais.

**Agradecimentos:** À Xiloteca Dr. Valmir Souza de Oliveira, ao Laboratório de Física da Madeira e ao Grupo de Estudos em Clima e Florestas (GECLIF) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), pelo apoio institucional. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), pela concessão de bolsa no âmbito do Programa de Apoio à Pós-Graduação Stricto Sensu (POSGRAD/FAPEAM 2024-2025; Resolução n.º 002/2024, UFAM).

## 6 REFERÊNCIAS

- AHMAD, M.; WILKINS, S. Purposive sampling in qualitative research: a framework for the entire journey. **Quality & Quantity**, v. 59, p. 1461–1479, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11135-024-02022-5>.
- ALENCAR, J. C.; FERNANDES, N. P. Desenvolvimento de árvores nativas em ensaios de espécies. I. Pau-rosa (*Aniba duckei* Kostermans). **Acta Amazonica**, v. 8, p. 523–541, 1978. <https://doi.org/10.1590/1809-43921978084523>.
- ALMEIDA, M. N. F. *et al.* Differences in wood anatomy and chemistry of a *Eucalyptus urophylla* clone explained by site climate conditions. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 52, n. 5, p. 834–844, 2022. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0261>.
- ANGYALOSSY, V. *et al.* IAWA List of Microscopic Bark Features. **IAWA Journal**, v. 37, n. 4, p. 517–615, 2016. <https://doi.org/10.1163/22941932-20160151>.
- ARAÚJO, A. J. C. *et al.* Dendrochronology of the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) in the amazon: Water memory and vulnerability of radial growth to precipitation deficit. **Revista de Geopolítica**, v. 17, n. 4, p. e2280, 2026. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5772223>.
- BAKER, J. C. A. *et al.* Oxygen isotopes in tree rings show good coherence between species and sites in Bolivia. **Global and Planetary Change**, v. 133, p. 298–308, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.09.008>.
- BELANGANAYI, B. L. *et al.* Growth periodicity in semi-deciduous tropical tree species from the Congo Basin. **Plant-Environment Interactions**, v. 5, n. 3, p. e10144, 2024. <https://doi.org/10.1002/pei3.10144>.

- BLAGITZ, M. *et al.* Tree rings in tree species of a seasonal semi-deciduous forest in southern Brazil: wood anatomical markers, annual formation and radial growth dynamic. **Dendrochronologia**, v. 55, p. 93-104, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.04.006>.
- BOTOSO, P. C.; VETTER, R. E. Alguns aspectos sobre a periodicidade e taxa de crescimento em 8 espécies arbóreas tropicais de floresta de Terra Firme (Amazônia). **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 3, n. 2, p. 163-180, 1991. <https://doi.org/10.24278/2178-5031.199132208>.
- BRIENEN, R. *et al.* Tree Rings in the Tropics: Insights into the Ecology and Climate Sensitivity of Tropical Trees. In: GOLDSTEIN, E. G.; SANTIAGO, L. S. **Tropical Tree Physiology**. Springer International Publishing, 2016. p. 439-461. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5_20).
- BRIENEN, R. J. W. *et al.* Climate-growth analysis for a Mexican dry forest tree shows strong impact of sea surface temperatures and predicts future growth declines. **Global Change Biology**, v. 16, n. 7, p. 2001-2012, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02059.x>.
- BRIENEN, R. J. W. *et al.* The Potential of Tree Rings for the Study of Forest Succession in Southern Mexico. **Biotropica**, v. 41, n. 2, p. 186-195, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2008.00462.x>.
- BRIENEN, R. J. W.; ZUIDEMA, P. A. Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forests: A test for six species using tree ring analysis. **Oecologia**, v. 146, n. 1, p. 1-12, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0160-y>.
- BRIENEN, R. J. W. *et al.* Autocorrelated growth of tropical forest trees: unraveling patterns and quantifying consequences. **Forest Ecology and Management**, v. 237, n. 1-3, p. 179-190, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.09.042>.
- CAETANO ANDRADE, V. L. *et al.* Growth rings of Brazil nut trees (*Bertholletia excelsa*) as a living record of historical human disturbance in Central Amazonia. **PLOS ONE**, v. 14, n. 4, p. e0214128, 2019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214128>.
- CAETANO ANDRADE, V. L. *et al.* Insights into Growth, Ring Formation and Maximum Ages of Brazil Nut Trees (*Bertholletia excelsa*) Using <sup>14</sup>C Dating and Tree-Ring Analysis. **Radiocarbon**, v. 66, n. 2, p. 306-325, 2024. <https://doi.org/10.1017/rdc.2024.39>.

- CALLADO, C. H. *et al.* Cambial growth periodicity studies of South American woody species – A review. **IAWA Journal**, v. 34, n. 3, p. 213–230, 2013.  
<https://doi.org/10.1163/22941932-00000019>.
- CAMARGO, P. B. *et al.* How old are large Brazil-nut trees (*Bertholletia excelsa*) in the Amazon? **Scientia Agricola**, v. 51, n. 2, p. 389–391, 1994.  
<https://doi.org/10.1590/s0103-90161994000200028>.
- CARLQUIST, S. **Comparative Wood Anatomy**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1988. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04578-7>.
- CHAMBI-LEGOAS, R. *et al.* Evaluación del crecimiento de *Cedrelinga cateniformis* mediante la dendrocronología, en bosques naturales de Madre de Dios, Perú. In: **Avanços em Ciências Agrárias: Pesquisas em Educação, Produção e Sustentabilidade**. 1. ed. [S.l.]: Editora Científica Digital, 2026. p. 39–64.  
<https://doi.org/10.37885/251120630>.
- DE BLAERE, R. *et al.* SmartWoodID—an image collection of large end-grain surfaces to support wood identification systems. **Database**, v. 2023, p. baad034, 2023.  
<https://doi.org/10.1093/database/baad034>.
- DEVALL, M. S. *et al.* Dendroecological Analysis of *Cordia alliodora*, *Pseudobombax septenatum* and *Annona spraguei* in Central Panama. **IAWA Journal**, v. 16, n. 4, p. 411–424, 1995. <https://doi.org/10.1163/22941932-90001430>.
- DI FILIPPO, A. *et al.* Long-Term Tree-Ring Response to Drought and Frost in Two *Pinus halepensis* Populations Growing under Contrasting Environmental Conditions in Peninsular Italy. **Forests**, v. 12, n. 3, p. 305, 2021.  
<https://doi.org/10.3390/f12030305>.
- DIERICKX, S. *et al.* Non-destructive wood identification using X-ray  $\mu$ CT scanning: which resolution do we need? **Plant Methods**, v. 20, n. 98, 2024.  
<https://doi.org/10.1186/s13007-024-01216-0>.
- DURAN, Y. *et al.* **Annual and Differentiated Growth Rings in Northern Andes: From Dry to Humid Tropical Forests**. SSRN, 2025. Disponível em:  
<https://www.ssrn.com/abstract=5381137>. Acesso em: 19 maio 2026.
- ESTEBAN, L. G. *et al.* Softwood Anatomy: A Review. **Forests**, v. 14, n. 2, p. 323, 2023.  
<https://doi.org/10.3390/f14020323>.

- EVERT, R. F. **Esau's Plant anatomy: meristems, cells, and tissues of the plant body: their structure, function, and development**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 607 p. <https://doi.org/10.1002/0470047380>.
- FERREIRA, C. A. *et al.* Identification of 20 species from the Peruvian Amazon tropical forest by the wood macroscopic features. **CERNE**, v. 29, e-013134, 2023. <https://doi.org/10.1590/01047760202329013134>.
- FERRERO, M. E. *et al.* An assessment of growth ring identification in subtropical forests from northwestern Argentina. **Dendrochronologia**, v. 32, n. 2, p. 113–119, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2014.01.003>.
- FICHTLER, E. *et al.* Age and Long-term Growth of Trees in an Old-growth Tropical Rain Forest, Based on Analyses of Tree Rings and  $^{14}\text{C}$ . **Biotropica**, v. 35, n. 3, p. 306–317, 2003. <https://doi.org/10.1646/03027>.
- FICHTLER, E.; WORBES, M. Wood anatomical variables in tropical trees and their relation to site conditions and individual tree morphology. **IAWA Journal**, v. 33, n. 2, p. 119–140, 2012. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000084>.
- FORTES, S. L. K. *et al.* Growth and functional leaf traits of coppice regrowth of *Bertholletia excelsa* during an El Niño event in the central Amazon. **Acta Amazonica**, v. 53, n. 1, p. 9–19, 2023. <https://doi.org/10.1590/1809-4392202103653>.
- GAO, J. *et al.* Origin of Intra-annual Density Fluctuations in a Semi-arid Area of Northwestern China. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 777753, 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.777753>.
- GÄRTNER, H.; SCHWEINGRUBER, F. H. **Microscopic Preparation Techniques for Plant Stem Analysis**. Remagen: Kessel Publishing House, 2013.
- GASSON, P. E. *et al.* WorldForestID: Addressing the need for standardized wood reference collections to support authentication analysis technologies. **Plants, People, Planet**, v. 3, n. 2, p. 130–141, 2021. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10164>.
- GIRALDO, J. A. *et al.* Intra-annual isotope variations in tree rings reveal growth rhythms within the least rainy season of an ever-wet tropical forest. **Trees**, v. 36, n. 3, p. 1039–1052, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00468-022-02271-7>.

- GIRALDO, J. A. *et al.* Tree growth periodicity in the ever-wet tropical forest of the Americas. **Journal of Ecology**, v. 111, n. 4, p. 889–902, 2023. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14069>.
- GODOY-VEIGA, M. *et al.* The value of climate responses of individual trees to detect areas of climate-change refugia, a tree-ring study in the Brazilian seasonally dry tropical forests. **Forest Ecology and Management**, v. 488, p. 118971, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118971>.
- GRANATO-SOUZA, D. *et al.* Tree rings and rainfall in the equatorial Amazon. **Climate Dynamics**, v. 52, n. 3-4, p. 1857–1869, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4227-y>.
- HOFFMANN, W. R. *et al.* Macroscopic Anatomy as a Strategy for Recognizing Commercial Wood from the Brazilian Amazon. **BioResources**, v. 20, n. 4, p. 10300–10327, 2025. <https://doi.org/10.15376/biores.20.4.10300-10327>.
- IAWA Committee. IAWA List of Microscopic Features for Hardwood Identification. **IAWA Bulletin**, v. 10, n. 3, p. 219–332, 1989. <https://doi.org/10.2307/4110625>.
- ISLAM, M. *et al.* Growth-ring boundary anatomy and dendrochronological potential in a moist tropical forest in northeastern Bangladesh. **Tree-Ring Research**, v. 74, p. 76–93, 2018. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-74.1.76>.
- JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique**. New York: McGraw-Hill Book Company Inc, 1940.
- KOCH, G. *et al.* Control of Internationally Traded Timber – The Role of Macroscopic and Microscopic Wood Identification against Illegal Logging. **Journal of Forensic Research**, v. 6, p. 317, 2015. <http://dx.doi.org/10.4172/2157-7145.1000317>.
- KUITEMS, M. *et al.* Evidence for European presence in the Americas in AD 1021. **Nature**, v. 601, p. 388–391, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03972-8>.
- LEHNEBACH, R. *et al.* High-Resolution X-Ray Computed Tomography: A New Workflow for the Analysis of Xylogenesis and Intra-Seasonal Wood Biomass Production. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 698640, 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.698640>.
- LÓPEZ, L. *et al.* Determining the annual periodicity of growth rings in seven tree species of a tropical moist forest in Santa Cruz, Bolivia. **Forest Systems**, v. 21, n. 3, p. 508–514, 2012. <https://doi.org/10.5424/fs/2012213-02966>.

- LÓPEZ, L.; VILLALBA, R. An assessment of *Schinopsis brasiliensis* Engler (Anacardiaceae) for dendroclimatological applications in the tropical Cerrado and Chaco forests, Bolivia. **Dendrochronologia**, v. 40, p. 85–92, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.07.002>.
- LÓPEZ, L. *et al.* High-fidelity representation of climate variations by *Amburana cearensis* tree-ring chronologies across a tropical forest transition in South America. **Dendrochronologia**, v. 72, p. 125932, 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125932>.
- MADY, F. T. M. **Xiloteca da Universidade Federal do Amazonas - Coleção Dr. Valmir Souza de Oliveira**. Eco & Companhia, 2017.
- MARCATI, C. R. *et al.* Growth rings in cerrado woody species: occurrence and anatomical markers. **Biota Neotropica**, v. 6, n. 3, 2006.  
<https://doi.org/10.1590/s1676-06032006000300001>.
- MARCELO-PEÑA, J. L. *et al.* Characterizing growth rings in the trees of Perú: A wood anatomical overview for potential applications in dendroecological-related fields. **Dendrochronologia**, v. 62, 251142, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125728>.
- MARIÑO-TELLO, E. N. *et al.* Identificación de ocho especies con potencial dendrocronológico en bosques de arena blanca de Jenaro Herrera, Loreto, Perú. **Folia Amazónica**, v. 34, n. 1, p. e34806, 2025.  
<https://doi.org/10.24841/fa.v34i1.806>.
- MAY, P. H.; BARATA, L. E. S. Rosewood exploitation in the Brazilian Amazon: Options for sustainable production. **Economic Botany**, v. 58, p. 257–265, 2004.  
[https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2004\)058\[0257:reitba\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2004)058[0257:reitba]2.0.co;2).
- MORALES, M. S. *et al.* Six hundred years of South American tree rings reveal an increase in severe hydroclimatic events since mid-20th century. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, p. 16816–16823, 2020.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.2002411117>.
- NATH, C. D. *et al.* Growth rings in tropical trees: role of functional traits, environment, and phylogeny. **Trees**, v. 30, n. 6, p. 2153–2175, 2016.  
<https://doi.org/10.1007/s00468-016-1442-1>.

- NICOLINI, E. *et al.* Dating branch growth units in a tropical tree using morphological and anatomical markers: the case of *Parkia velutina* Benoist (Mimosoideae). **Annals of Forest Science**, v. 69, n. 5, p. 543–555, 2012.  
<https://doi.org/10.1007/s13595-011-0172-1>.
- OLSON, M. E. *et al.* The vulnerability to drought-induced embolism-conduit diameter link: breaching the anatomy-physiology divide. **IAWA Journal**, v. 44, n. 3–4, p. 335–354, 2023. <https://doi.org/10.1163/22941932-bja10123>.
- ORTEGA-RODRÍGUEZ, D. R. **Climate change in the southern Amazonian Tropical Forest assessed by dendrochronological multiproxy**. 2023. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2023.  
<https://doi.org/10.11606/t.11.2023.tde-18052023-101230>.
- ORTEGA-RODRÍGUEZ, D. R. *et al.* Exploring wood anatomy, density and chemistry profiles to understand the tree-ring formation in Amazonian tree species. **Dendrochronologia**, v. 71, p. 1, 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125915>.
- ORTIZ, J. *et al.* Crecimiento y rasgos funcionales de especies arbóreas en un bosque nublado tropical al sudeste de Venezuela. **Acta Botanica Venezuelica**, v. 40, n. 2, p. 175–210, 2017.
- PAREDES-VILLANUEVA, K. *et al.* Rainfall and temperature variability in Bolivia derived from the tree-ring width of *Amburana cearensis* (Fr. Allem.) A.C. Smith. **Dendrochronologia**, v. 35, p. 80–86, 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.04.003>.
- PORTAL-CAHUANA, L. A. *et al.* Radial variation of wood density and fiber morphology of two commercial species in a tropical humid forest in southeastern Peru. **Cerne**, v. 29, e-103143, 2023a. <https://doi.org/10.1590/01047760202329013143>.
- PORTAL-CAHUANA, L. A. *et al.* Thirty-four years of dendrochronological studies in Perú: A review of advances and challenges. **Dendrochronologia**, v. 78, 2023b.  
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2023.126058>.
- PUMIJUMNONG, N. *et al.* Factors Affecting Cambial Growth Periodicity and Wood Formation in Tropical Forest Trees: A Review. **Forests**, v. 14, n. 5, 2023.  
<https://doi.org/10.3390/f14051025>.

- QUESADA-ROMÁN, A. *et al.* Dendrogeomorphic reconstruction of floods in a dynamic tropical river. **Geomorphology**, v. 359, 107133, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107133>.
- QUESADA-ROMÁN, A. *et al.* Tropical and subtropical dendrochronology: Approaches, applications, and prospects. **Ecological Indicators**, v. 144, 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109506>.
- RAHMAN, M. H. *et al.* Changes in cambial activity are related to precipitation patterns in four tropical hardwood species grown in Indonesia. **American Journal of Botany**, v. 106, p. 760–771, 2019. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1297>.
- RANILLA-HUAMANTUCO, M. A. *et al.* Dendrochronological potential of tropical species in the Peruvian Amazon: An analysis in flooded forests of the southeast. **BioResources**, v. 20, n. 1, p. 1482–1503, 17 dez. 2025.  
<https://doi.org/10.15376/biores.20.1.1482-1503>.
- REIS-AVILA, G.; OLIVEIRA, J. M. Lauraceae: A promising family for the advance of neotropical dendrochronology. *Dendrochronologia*, v. 44, p. 103–116, 2017.  
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.04.002>.
- REN, P. *et al.* Critical temperature and precipitation thresholds for the onset of xylogenesis of *Juniperus przewalskii* in a semi-arid area of the north-eastern Tibetan Plateau. **Annals of Botany**, v. 121, p. 617–624, 2018.  
<https://doi.org/10.1093/aob/mcx188>.
- ROIG, F. A. Dendrocronología en los bosques del Neotrópico: revisión y prospección futura. In: ROIG, F. A. (ed.). **Dendrocronología en América Latina**. Mendoza: EDIUNC, 2000. p. 307–355.
- ROSA, L. S. *et al.* Crescimento e sobrevivência de mudas de pau-rosa (*Aniba rosaeodora* Ducke) oriundas de três procedências, em função de diferentes níveis de sombreamento, em condições de viveiro. **Boletim Faculdade de Ciências Agrárias do Pará**, n. 28, p. 37–62, 1997. Disponível em:  
<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/978877/>. Acesso em: 20 mar. 2026.
- ROSSI, S. *et al.* Causes and Correlations in Cambium Phenology: Towards an Integrated Framework of Xylogenesis. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, p. 2117–2126, 2012. <https://doi.org/10.1093/jxb/err423>.

- ROYAL BOTANIC GARDENS, KEW. **Plants of the World Online**. Kew: Royal Botanic Gardens, 2026. Disponível em: <https://powo.science.kew.org/>. Acesso em: 1 fev. 2026.
- ROZENDAAL, D. M. A.; ZUIDEMA, P. A. Dendroecology in the tropics: a review. **Trees**, v. 25, n. 1, p. 3-16, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0480-3>.
- SALLADAY, R. A.; PITTERMANN, J. Using heat plumes to simulate post-fire effects on cambial viability and hydraulic performance in *Sequoia sempervirens* stems. **Tree Physiology**, v. 43, n. 5, p. 769-780, 2023. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpad006>.
- SÁNCHEZ, E. *et al.* Future climate extreme events in the Mediterranean simulated by a regional climate model: A first approach. **Global and Planetary Change**, v. 44, p. 163-180, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.06.010>.
- SCHÖNGART, J. *et al.* Age and Growth Patterns of Brazil Nut Trees (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) in Amazonia, Brazil. **Biotropica**, v. 47, n. 5, p. 550-558, 2015. <https://doi.org/10.1111/btp.12243>.
- SCHÖNGART, J. *et al.* Dendroecological Studies in the Neotropics: History, Status and Future Challenges. **Dendroecology**, p. 35-73, 2017. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-61669-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-61669-8_3).
- SCHÖNGART, J. *et al.* Phenology and stem-growth periodicity of tree species in Amazonian floodplain forests. **Journal of Tropical Ecology**, v. 18, n. 4, p. 581-597, 2002. <https://doi.org/10.1017/S0266467402002389>.
- SHIMAMOTO, C. Y. *et al.* Stem growth rhythms in trees of a tropical rainforest in Southern Brazil. **Trees**, v. 30, n. 1, p. 99-111, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1279-z>.
- SILVA, M. D. S. Carlquist's growth ring classification: a functional approach that reinforces porous and annual rings. **IAWA Journal**, v. 44, n. 3-4, p. 539-556, 2023. <https://doi.org/10.1163/22941932-bja10128>.
- SILVA, M. D. S. *et al.* A phylogenetic and functional perspective on the origin and evolutionary shifts of growth ring anatomical markers in seed plants. **Biological Reviews**, v. 96, p. 842-876, 2021. <https://doi.org/10.1111/brv.12681>.

- SILVA, M. D. S. *et al.* The growth ring concept: seeking a broader and unambiguous approach covering tropical species. **Biological Reviews**, v. 94, p. 1161-1178, 2019. <https://doi.org/10.1111/brv.12495>.
- SLIK, J. F. *et al.* An estimate of the number of tropical tree species. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 24, p. 7472-7477, 2015. <https://doi.org/10.1073/pnas.1423147112>.
- SOLIZ-GAMBOA, C. C. *et al.* Evaluating the annual nature of juvenile rings in Bolivian tropical rainforest trees. **Trees**, v. 25, n. 1, p. 17-27, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0468-z>.
- SPATHELF, P. *et al.* Análise dendroecológica de *Ocotea pulchella* Nees et Mart. ex Nees (CANELA LAGEANA) na Serra Geral de Santa Maria, RS, Brasil. **Ciência Florestal**, v. 10, n. 1, p. 95-108, 2000. <https://doi.org/10.5902/19805098398>.
- SPEER, J. H. **Fundamentals of tree-ring research**. University of Arizona, 2009. 509 p.
- SPERRY, J. S. *et al.* Comparative analysis of end wall resistivity in xylem conduits. **Plant, Cell and Environment**, v. 38, p. 456-465, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01287.x>.
- TANAKA, A. *et al.* Short-term responses of tree growth rings in natural gaps for forest management. In: ROMERO, F. M. B.; CASTRO, R. B.; TELLO, J. C. R. (Eds.) **Estudos Dendrológicos e Ecológicos na Amazônia: oportunidades e experiências**. 1. ed. [S.l.]: Editora Científica Digital, 2022. p. 66-86. <https://doi.org/10.37885/220207865>.
- TARELKIN, Y. *et al.* Growth-ring distinctness and boundary anatomy variability in tropical trees. **IAWA Journal**, v. 37, n. 2, p. 275-287, 2016. <https://doi.org/10.1163/22941932-20160134>.
- TOMMASIELLO-FILHO, M. *et al.* Dendrocronología y dendroecología tropical: Marco histórico y experiencias exitosas en los países de América Latina. **Ecología en Bolivia**, v. 44, n. 2, p. 1-6, 2009.
- TREVIZOR, T. **Anatomia comparada do lenho de 64 espécies arbóreas de ocorrência natural na floresta tropical amazônica no estado do Pará**. 2011. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011. <https://doi.org/10.11606/d.11.2011.tde-02082011-132019>.

ABEELE, S. V. *et al.* When xylarium and herbarium meet: linking Tervuren xylarium wood samples with their herbarium specimens at Meise Botanic Garden.

**Biodiversity Data Journal**, v. 9, p. e62329, 2021.

<https://doi.org/10.3897/BDJ.9.e62329>.

WIERNANN, M.; WILLIAMSON, G. Extreme radial changes in wood specific gravity in some tropical pioneers. **Wood and Fiber Science**, v. 20, n. 3, p. 344-349, 1988.

<https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2009.00618.x>.

WORBES, M. Growth rings, increment and age of trees in inundation forests, savannas and a mountain forest in the neotropics. **IAWA Bulletin**, v. 10, n. 2, p. 109-122, 1989.

<https://doi.org/10.1163/22941932-90000479>.

WORBES, M. How to measure growth dynamics in tropical trees: a review. **IAWA**

**Journal**, v. 16, p. 337-351, 1995. <https://doi.org/10.1163/22941932-90001424>.

WORBES, M. One hundred years of tree-ring research in the tropics: a brief history and an outlook to future challenges. **Dendrochronologia**, v. 20, n. 1-2, 2002.

<https://doi.org/10.1078/1125-7865-00018>.

WORBES, M.; FICHTLER, E. Wood anatomy and tree-ring structure and their importance for tropical dendrochronology. *In*: Junk *et al.* (eds) **Amazonian**

**Floodplain Forests**. Ecological Studies, 2010. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-8725-6\\_17](https://doi.org/10.1007/978-90-481-8725-6_17).

ZUIDEMA, P. A. *et al.* Tropical tree growth driven by dryseason climate variability.

**Nature Geoscience**, v. 15, n. 4, p. 269-276, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00911-8>.

## MATERIAL SUPLEMENTAR

**Material Suplementar A.** Composição taxonômica das amostras de madeira selecionadas para o estudo.

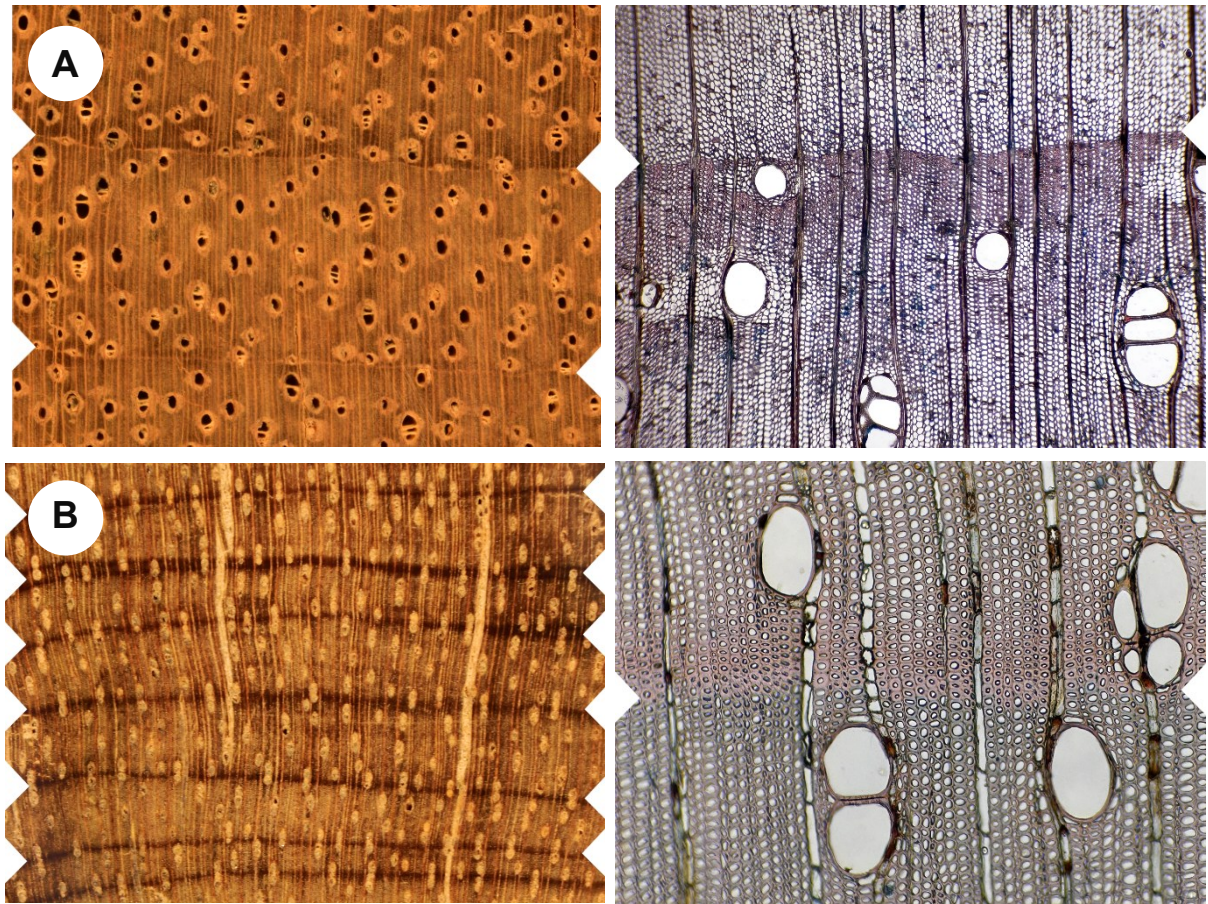
| Família       | Nome científico                                       | Código | Origem      |
|---------------|-------------------------------------------------------|--------|-------------|
| Annonaceae    | <i>Annona ambotay</i> Aubl.                           | 0353   | INPAw:1187  |
|               | <i>Annona foetida</i> Mart.                           | 0486   | INPAw:2871  |
|               | <i>Fusaea longifolia</i> (Aubl.) Saff.                | 0643   | Local       |
| Apocynaceae   | <i>Rhigospira quadrangularis</i> (Müll.Arg.) Miers    | 0467   | INPAw:2744  |
| Bignoniaceae  | <i>Jacaranda copaia</i> (Aubl.) D.Don                 | 0269   | FPBw        |
| Boraginaceae  | <i>Cordia sagotii</i> I.M.Johnst.                     | 0487   | INPAw:2911  |
| Burseraceae   | <i>Protium altsonii</i> Sandwith                      | 0208   | Local       |
| Euphorbiaceae | <i>Hura crepitans</i> L.                              | 0459   | Local       |
| Fabaceae      | <i>Amburana cearensis</i> (Allemão) A.C.Sm.           | 010    | Local       |
|               | <i>Cedrelinga cateniformis</i> (Ducke) Ducke          | 0276   | INPAw       |
|               | <i>Maclobium acaciifolium</i> (Benth.) Benth.         | 0367   | INPAw:81975 |
|               | <i>Parkia gigantocarpa</i> Ducke                      | 0265   | FPBw        |
|               | <i>Parkia multijuga</i> Benth.                        | 0266   | FPBw        |
|               | <i>Parkia nitida</i> Miq.                             | 0264   | FPBw        |
|               | <i>Parkia paraensis</i> Ducke                         | 0267   | FPBw        |
|               | <i>Parkia velutina</i> Benoist                        | 0263   | FPBw        |
|               | <i>Vouacapoua americana</i> Aubl.                     | 0314   | BCTw        |
| Hypericaceae  | <i>Vismia guianensis</i> (Aubl.) Pers.                | 0644   | Local       |
| Lauraceae     | <i>Aniba rosodora</i> Ducke                           | 0569   | Local       |
|               | <i>Nectandra amazonum</i> Nees                        | 0366   | INPAw:81425 |
| Lecythidaceae | <i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.                    | 0250   | FPBw        |
|               | <i>Couratari guianensis</i> Aubl.                     | 0252   | FPBw        |
|               | <i>Couratari oblongifolia</i> Ducke & R.Knuth         | 0249   | FPBw        |
|               | <i>Couratari stellata</i> A.C.Sm.                     | 0248   | FPBw        |
|               | <i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) S.A.Mori            | 0246   | FPBw        |
|               | <i>Eschweilera grandiflora</i> (Aubl.) Sandwith       | 0247   | FPBw        |
|               | <i>Guaiana idatimon</i> (Aubl.) O.M.Vargas & C.W.Dick | 0242   | FPBw        |
|               | <i>Gustavia elliptica</i> S.A.Mori                    | 0474   | INPAw:4763  |
| Malpighiaceae | <i>Pterandra arborea</i> Ducke                        | 0482   | INPAw:2917  |
| Malvaceae     | <i>Lueheopsis rosea</i> (Ducke) Burret                | 0490   | INPAw:2974  |
|               | <i>Ochroma pyramidale</i> (Cav. ex Lam.) Urb.         | 0356   | INPAw:3194  |
| Meliaceae     | <i>Carapa guianensis</i> Aubl.                        | 0272   | FPBw        |
| Moraceae      | <i>Clarisia racemosa</i> Ruiz & Pav.                  | 0368   | INPAw:81952 |
|               | <i>Maquira coriacea</i> (H.Karst.) C.C.Berg           | 077    | Local       |

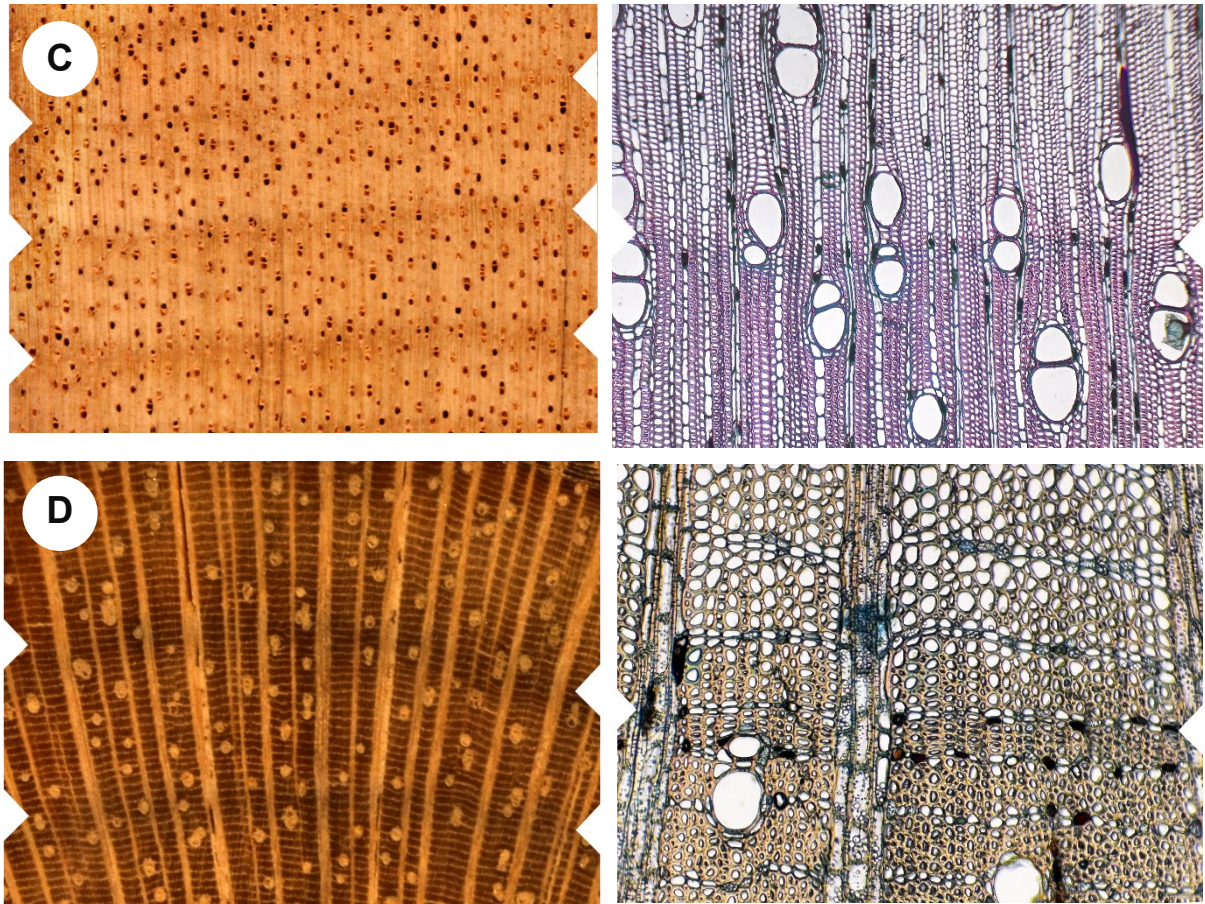
| Família       | Nome científico                                 | Código | Origem      |
|---------------|-------------------------------------------------|--------|-------------|
| Myristicaceae | <i>Iryanthera polyneura</i> Ducke               | 0360   | INPAw:63886 |
|               | <i>Virola carinata</i> (Spruce ex Benth.) Warb. | 0274   | FPBw        |
|               | <i>Virola coelhoi</i> W.A.Rodrigues             | 0371   | INPAw:84256 |
|               | <i>Virola michelii</i> Heckel                   | 0270   | FPBw        |
|               | <i>Virola multicostata</i> Ducke                | 0271   | FPBw        |
|               | <i>Virola pavonis</i> (A.DC.) A.C.Sm.           | 0351   | INPAw:217   |
| Simaroubaceae | <i>Simarouba amara</i> Aubl.                    | 0262   | FPBw        |
| Solanaceae    | <i>Duckeodendron cestroides</i> Kuhlman         | 0595   | Local       |

**Legenda:** FPBw = Xiloteca Dr. Harry van der Slooten, Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro, Brasília, Brasil; BCTw = Xiloteca Dr. Calvino Mainieri, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, Brasil; INPAw = Xiloteca do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Brasil.

**Fonte:** Dados da pesquisa (2026).

**Material Suplementar B.** Aspectos macro e microscópicos de táxons sem descrição anatômica prévia localizada e com aptidão anatômica preliminar alta ou regular.





**Legenda: Alta aptidão anatômica preliminar.** A) *Parkia paraensis* Ducke, camadas de crescimento distintas a moderadamente distintas, delimitadas por parênquima marginal, achatamento radial/espessamento da parede das fibras, variação no diâmetro dos vasos, mudança no arranjo dos vasos e diferenciação do parênquima axial, com transição de parênquima aliforme a confluyente para parênquima aliforme losangular próximo ao limite da camada de crescimento; B) *Virola coelhoi* W.A.Rodrigues, camadas distintas, delimitadas pelo achatamento radial/espessamento da parede das fibras, variação no diâmetro dos vasos e alargamento dos raios próximo ao limite da camada de crescimento. **Aptidão anatômica preliminar regular.** C) *Virola multicostata* Ducke, camadas moderadamente distintas, delimitadas por zona fibrosa, achatamento radial/espessamento da parede das fibras e variação no diâmetro dos vasos; D) *Annona ambotay* Aubl., camadas moderadamente distintas, delimitadas pelo achatamento radial/espessamento da parede das fibras e variações no espaçamento e na espessura das linhas de parênquima.

**Fonte:** Dados da pesquisa (2026).

## 2

---

### Mapeamento cienciométrico da literatura global sobre xilotecas

Manuscrito em preparação para o periódico *Forests*.

#### RESUMO

As xilotecas ampliaram seu escopo de atuação ao longo do tempo e consolidaram-se como infraestruturas de referência em diversas aplicações científicas contemporâneas. Como consequência, a literatura sobre essas coleções biológicas passou a apresentar dispersão e fragmentação, o que justifica o mapeamento da produção acadêmica global sobre xilotecas realizado neste estudo. Até onde foi possível verificar na literatura consultada, trata-se de um dos primeiros estudos cienciométricos dedicados ao tema. A pesquisa utilizou metadados das bases *Scopus* e *Web of Science*, os quais, após triagem, foram processados pelo pacote *bibliometrix* do *software* R para quantificar publicações, avaliar o impacto por citações e mapear redes de colaboração e conexões conceituais. O conjunto analisado reuniu 98 documentos, cujas datas de publicação se distribuíram entre 1990 e 2025, com predominância de artigos originais. O *IAWA Journal* destacou-se como principal periódico, com média de 12,83 citações por publicação. Brasil e Estados Unidos apresentaram o mesmo volume de publicações; contudo, o impacto desses documentos mostrou-se desigual, com liderança dos Estados Unidos (290 citações) e da China (278 citações). A literatura sobre xilotecas revela um campo tematicamente diversificado, marcado por assimetrias e por uma trajetória que reflete as pressões regulatórias e tecnológicas responsáveis pela redefinição do papel dessas coleções na ciência da madeira. O estudo reforça, por fim, que o rigor curatorial das xilotecas constitui condição indispensável para a confiabilidade e a precisão de suas aplicações.

**Palavras-chave:** coleções biológicas, bibliometria, identificação de madeiras.

## 1 INTRODUÇÃO

A madeira é o recurso renovável mais abundante na natureza viva (Beeckman, 2016; Deklerck *et al.*, 2019; Domínguez-Delmás *et al.*, 2023), corresponde à maior parcela da biomassa florestal e funciona como um dos principais reservatórios de carbono orgânico global (Malhi *et al.*, 2011), com estimativas superiores a 400 Pg (Chave *et al.*, 2009). Sua utilidade atravessa milênios e civilizações: da fabricação de ferramentas e utensílios (Baas *et al.*, 2021) à produção de papel; da construção civil às esferas da arte, cultura e religião (Herrera-Castro *et al.*, 2019); da medicina e da farmacologia à geração de energia para o preparo de alimentos (Bermeo *et al.*, 2021), entre outros incontáveis usos (Melo-Júnior, 2024). Biologicamente, quimicamente e estruturalmente diversa, a madeira é um material complexo e anisotrópico (Anggara *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2024; Shmulsky e Jones, 2019), cujo conhecimento aprofundado depende de amostras de referência bem documentadas e de métodos analíticos capazes de revelar, com precisão, a amplitude dessa diversidade (Carlquist, 1988; Gasson *et al.*, 2021; Somal e Mishra, 2025).

Coleções biológicas sistematizadas de madeira, denominadas xilotecas (do grego *xylon*, madeira, e *thēkē*, coleção), são acervos de história natural dedicados à preservação e ao estudo da diversidade lenhosa, sob padrões rigorosos de curadoria (Dagnino e Mariotti, 2021; Lamb e Curtis, 2005; Langbour *et al.*, 2019). Em escala global, totalizam cerca de 183 coleções registradas, responsáveis pela salvaguarda de mais de 1,7 milhão de exemplares (Lynch e Gasson, 2025) representativos de diversas espécies e ecossistemas. Sustentadas por documentação criteriosa, essas xilotecas oferecem suporte metodológico sólido a estudos de anatomia e identificação da madeira, bem como a outras frentes de investigação associadas à diversidade lenhosa.

Ao longo do tempo, o papel dessas coleções evoluiu significativamente. Se antes estavam majoritariamente associadas à taxonomia clássica, as xilotecas transcenderam essa função primária para atuar como infraestruturas de referência em uma ampla gama de disciplinas aplicadas e abordagens metodológicas inovadoras (Jiao *et al.*, 2018; Somal e Mishra, 2025; Abeele *et al.*, 2021). Essa expansão interdisciplinar impulsionou a produção científica e gerou, progressivamente, publicações distribuídas por múltiplos

domínios do conhecimento (Melo-Júnior, 2024). Entretanto, embora tal ramificação ateste a relevância desses acervos, ela também produziu um corpo bibliográfico disperso e fragmentado.

A organização de um corpo bibliográfico dessa natureza exige técnicas de gestão do conhecimento capazes de reunir informações dispersas em evidências estruturadas (Chen *et al.*, 2023). Essa tarefa, no âmbito acadêmico, demanda rigor quantitativo e métodos analíticos robustos (De Oliveira *et al.*, 2019; Gaviria-Marin *et al.*, 2019). A cienciometria, como abordagem analítica, oferece um panorama do estado da arte, rastreia padrões de publicação, aponta lacunas do conhecimento, conecta frentes de estudo e mapeia tendências ao longo dos anos (Caputo *et al.*, 2021; Donthu *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2021); revela-se, assim, o método mais adequado para sistematizar, com objetividade, a literatura científica acumulada em torno das coleções biológicas de madeira.

Com base nesse referencial, o presente trabalho investigou a produção acadêmica global sobre xilotecas a partir de metadados indexados. Até onde foi possível verificar na literatura consultada, trata-se de um dos primeiros estudos cienciométricos dedicados ao tema. O objetivo foi examinar a estrutura do conhecimento consolidado, os padrões de interação entre os campos que recorreram a essas coleções como suporte metodológico e as tendências que projetam o desenvolvimento da área.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Delineamento e estratégia de busca**

O delineamento adotado consistiu em um mapeamento cienciométrico estruturado com base na análise de redes de literatura. A coleta de dados ocorreu em 15 de março de 2026, por meio de consultas às bases Scopus e Web of Science (Core Collection). A estratégia de busca concentrou-se na interseção entre xilotecas e suas múltiplas aplicações metodológicas, com o emprego de operadores booleanos e

marcadores de truncamento (Tabela 1). A sintaxe resultante foi aplicada aos campos de título, resumo e palavras-chave.

**Tabela 1.** Estratégia de busca e sintaxe aplicada para a obtenção dos dados brutos.

| Base de dados                    | Sintaxe de busca                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Scopus                           | TITLE-ABS-KEY (("xylarium" OR "xylotheque*" OR "xylotheca*" OR "timber collection*" OR "wood collection*" OR "wood librar*" OR "xylaria" OR "reference wood collection*" OR "wood anatomy collection*") AND ("dendrochronolog*" OR "dendroecolog*" OR "dendroclimatolog*" OR "tree-ring*" OR "tree ring*" OR "growth ring*" OR "annual ring*" OR "wood anatom*" OR "xylogenesis" OR "radial growth" OR "ring width" OR "wood density" OR "increment core*" OR "growth ring width" OR "wood identification" OR "anatomical identification" OR "x-ray densitometry" OR "carbon isotopes" OR "stable isotopes")) |
| Web of Science (Core Collection) | TS= (("xylarium" OR "xylotheque*" OR "xylotheca*" OR "timber collection*" OR "wood collection*" OR "wood librar*" OR "xylaria" OR "reference wood collection*" OR "wood anatomy collection*") AND ("dendrochronolog*" OR "dendroecolog*" OR "dendroclimatolog*" OR "tree-ring*" OR "tree ring*" OR "growth ring*" OR "annual ring*" OR "wood anatom*" OR "xylogenesis" OR "radial growth" OR "ring width" OR "wood density" OR "increment core*" OR "growth ring width" OR "wood identification" OR "anatomical identification" OR "x-ray densitometry" OR "carbon isotopes" OR "stable isotopes"))           |

**Fonte:** Elaborado pela autora.

## 2.2 Critérios de elegibilidade e triagem de dados

A triagem seguiu critérios de elegibilidade a fim de assegurar a comparabilidade e a qualidade dos registros recuperados. Nas bases consultadas, a seleção foi restrita a artigos científicos, trabalhos originais e revisões de literatura, sem delimitação temporal. Os registros exportados foram então unificados e submetidos à remoção de duplicatas por meio de rotinas computacionais no ambiente R (R Core Team, 2026).

## 2.3 Processamento cienciométrico e análise de redes

O processamento dos dados ocorreu no ambiente R (R Core Team, 2026), com o pacote *bibliometrix* e sua interface *Biblioshiny* (Aria e Cuccurullo, 2017). Os metadados correspondentes à amostra validada foram importados de forma unificada em formato XLSX. A partir desse conjunto, foram conduzidas análises de caracterização geral da produção, como volume documental, tipologia, idade média e impacto por citações, seguidas da análise da dinâmica temporal de publicação e da identificação dos

principais veículos de disseminação científica. A estrutura de colaboração foi examinada por meio de redes de coautoria, com atenção à distribuição geográfica da produção e ao impacto por país. Para investigar os fluxos entre origem geográfica, orientação temática e periódicos de publicação, foi construído um Diagrama de Sankey. A estrutura conceitual do campo foi mapeada por meio de rede de coocorrência de palavras-chave, com detecção de agrupamentos temáticos pelo algoritmo de Louvain (Blondel *et al.*, 2008), o que permitiu identificar as frentes de pesquisa consolidadas e as conexões entre os principais nós da rede.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Caracterização geral

O levantamento de dados reuniu 98 documentos, oriundos de 60 diferentes fontes editoriais, cujas datas de publicação abrangeram o período de 1990 a 2025. O conjunto analisado é formado principalmente por artigos científicos originais (82 documentos), além de revisões de literatura (4) e trabalhos completos em anais de congressos (4). Em termos de temporalidade e impacto, os registros apresentam idade média de 9,47 anos e um índice de 12,83 citações por publicação. O manuscrito mais citado da base pertence a Stahle, D. W. (1999), publicado no IAWA Journal, e destaca-se na métrica de prestígio global, com 113 citações acumuladas (Tabela 2).

**Tabela 2.** Documentos mais citados globalmente na literatura sobre xilotecas e estudos da madeira.

| Primeiro autor | Título                                                                                                                                                | Ano  | Fonte              | Total de citações |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|--------------------|-------------------|
| Stahle, D. W.  | Useful strategies for the development of tropical tree-ring chronologies                                                                              | 1999 | IAWA Journal       | 113               |
| Jiao, L.       | DNA barcoding for identification of the endangered species <i>Aquilaria sinensis</i> : comparison of data from heated or aged wood samples            | 2014 | Holzforschung      | 70                |
| Wheeler, E. A. | Late cretaceous woody dicots from the Aguja and Javelina formations, Big Bend National Park, Texas, USA                                               | 2000 | IAWA Journal       | 68                |
| Jiao, L.       | DNA barcode authentication and library development for the wood of six commercial <i>pterocarpus</i> species: the critical role of xylarium specimens | 2018 | Scientific Reports | 65                |

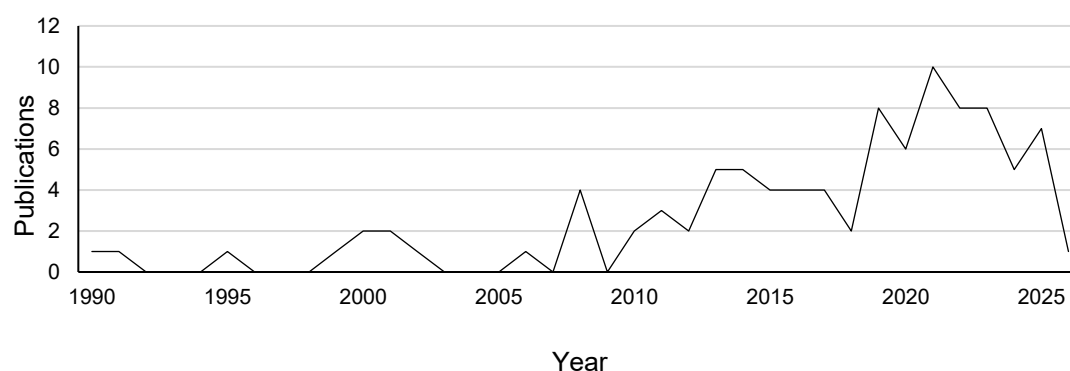
| Primeiro autor | Título                                                                                                                                                                                              | Ano  | Fonte                   | Total de citações |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------|-------------------|
| Yu, M.         | DNA barcoding of vouchered xylarium wood specimens of nine endangered <i>Dalbergia</i> species                                                                                                      | 2017 | Planta                  | 55                |
| Gasson, P.     | Wood anatomy of cites-listed tree species                                                                                                                                                           | 2011 | IAWA Journal            | 50                |
| Gasson, P. E.  | WorldForestID: Addressing the need for standardized wood reference collections to support authentication analysis technologies; a way forward for checking the origin and identity of traded timber | 2021 | Plants, People, Planet  | 41                |
| Jiao, L.       | DNA barcoding for wood identification: global review of the last decade and future perspective                                                                                                      | 2020 | IAWA Journal            | 41                |
| Horikawa, Y.   | Near-infrared spectroscopy as a potential method for identification of anatomically similar Japanese diploxylons                                                                                    | 2015 | Journal of Wood Science | 40                |

**Fonte:** Dados da pesquisa (2026).

### 3.2 Dinâmica de publicação

O registro inicial no banco de dados é de 1990, e o auge das publicações ocorreu em 2021, com 10 documentos (Figura 1). O panorama da disseminação científica revela o IAWA Journal como o principal veículo da área, responsável por 19 documentos, em contraste com os demais periódicos, que desempenham papel periférico (Tabela 3).

**Figura 1.** Evolução temporal da produção científica global sobre estudos da madeira e uso de xilotecas (1990-2025).



**Fonte:** Dados da pesquisa (2026).

**Tabela 3.** Fontes de publicação mais relevantes na literatura global sobre estudos de madeira e xilotecas (1990-2026).

| Fontes        | Publicações |
|---------------|-------------|
| IAWA Journal  | 19          |
| Holzforschung | 4           |

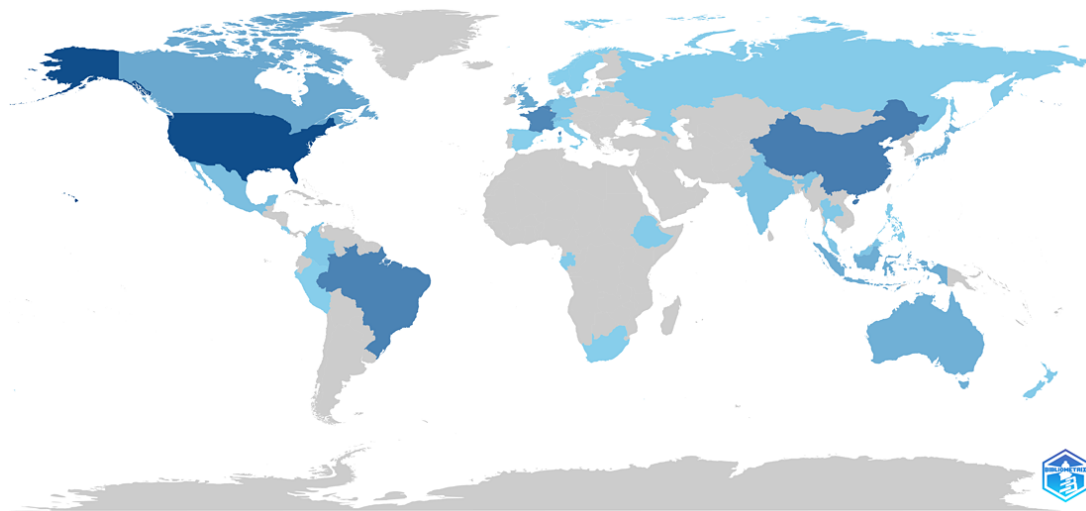
| Fontes                      | Publicações |
|-----------------------------|-------------|
| Colombia Forestal           | 4           |
| Frontiers in Plant Science  | 3           |
| Quaternary International    | 3           |
| Wood Science and Technology | 3           |

**Fonte:** Dados da pesquisa (2026).

### 3.3 Estrutura de colaboração e distribuição geográfica

A rede de pesquisa reúne 370 pesquisadores e funciona em regime colaborativo, com média de 5,18 coautores por manuscrito e taxa de coautoria internacional de 31,63%. A análise da distribuição geográfica vinculada à autoria correspondente revela empate na liderança da produção científica bruta entre Estados Unidos e Brasil, com 10 publicações cada, seguidos por China e França, com 9 artigos cada. Apesar do alinhamento quantitativo inicial, o impacto global das pesquisas distribui-se de forma assimétrica no Hemisfério Norte. Estados Unidos e China lideram a rede de influência, com 290 e 278 citações, respectivamente, enquanto a produção brasileira soma 60 citações, empatada com a Bélgica e atrás do Reino Unido (157) e da França (75), o que evidencia as disparidades de alcance entre os países (Figura 2).

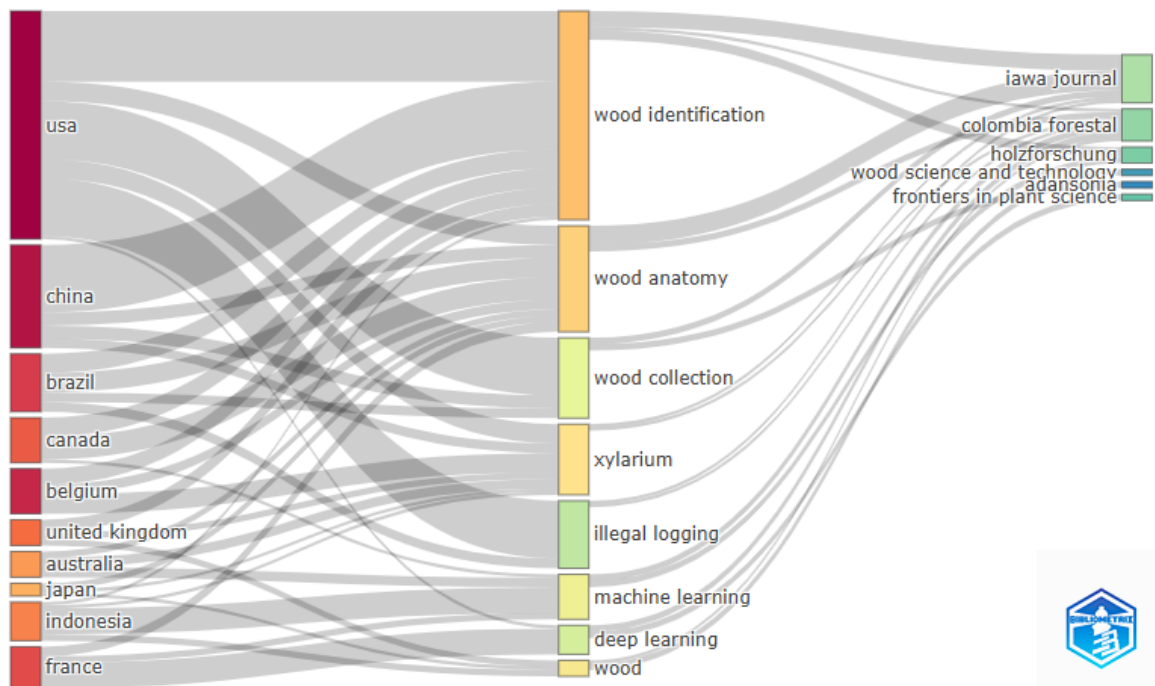
**Figura 2.** Distribuição geográfica da produção científica global sobre xilotecas e estudos da madeira.



**Fonte:** Dados da pesquisa (2026) via pacote *bibliometrix* (interface *Biblioshiny*) com informações disponíveis no Material Suplementar A. A intensidade da cor azul reflete o volume total de publicações por país.

Para explorar padrões associados a essa assimetria, a dinâmica de influência entre a origem geográfica dos autores, focos temáticos e os veículos de publicação científica foi mapeada por meio de um Diagrama de Sankey. O eixo temático das xilotecas é sustentado por uma base produtiva geograficamente heterogênea, cujas palavras-chave são ditadas por autores vinculados aos Estados Unidos, China, Brasil, Canadá e Bélgica. No entanto, o destino dessa produção científica converge majoritariamente para o periódico IAWA Journal. (Figura 3).

**Figura 3.** Diagrama de Sankey, com o fluxo entre países produtores, palavras-chave e periódicos.



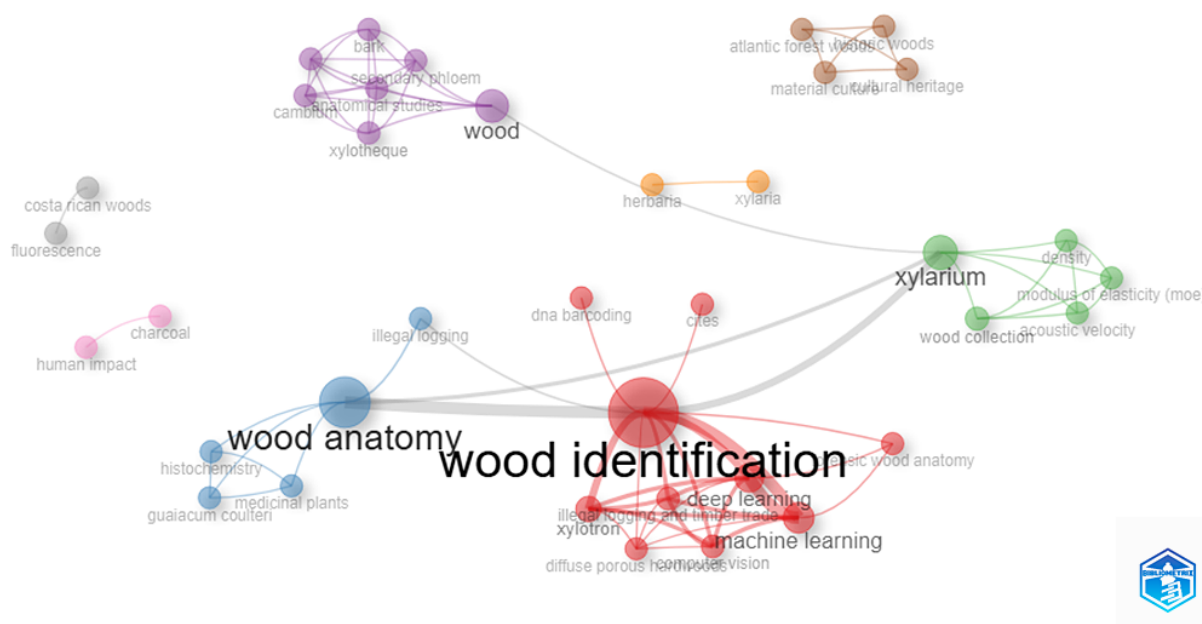
**Fonte:** Dados da pesquisa (2026) via pacote *bibliometrix* (interface *Biblioshiny*). A espessura das conexões reflete o volume de produção científica transferido entre a origem geográfica dos autores, os focos temáticos e os veículos de validação.

### 3.4 Estrutura conceitual

As palavras-chave fornecidas pelos autores revelam a orientação analítica do conjunto de literatura analisado. “*Wood identification*” constitui o termo mais recorrente (24 registros), seguido por “*wood anatomy*” (19). O descritor “*xylarium*” aparece padronizado em apenas 9 documentos. Para aprofundar a compreensão

topológica do campo, a estrutura conceitual da literatura foi mapeada por meio de uma rede de coocorrência de palavras-chave (Figura 4).

**Figura 4.** Rede de coocorrência de palavras-chave da literatura global sobre xilotecas e anatomia da madeira.



Fonte: Dados da pesquisa (2026) via pacote *bibliometrix* (interface *Biblioshiny*). O tamanho dos nós reflete a frequência de aparição do termo, e a espessura das linhas indica a força de associação entre as palavras.

O nó de interesse analítico denominado “*xylarium*” encontra-se em um *cluster* estrutural próprio (representado pela cor verde), circundado por termos relacionados a acervos e propriedades mecânicas, como “*wood collection*”, “*density*” e “*modulus of elasticity*”. Apesar dessa segregação modular, a espessura das arestas (linhas de conexão) evidencia que o “*xylarium*” não opera de forma isolada na literatura. O referido nó apresenta forte coocorrência com os agrupamentos adjacentes. Observa-se uma conexão direta com o termo “*wood anatomy*” (*cluster* azul) e uma ligação ainda mais expressiva com “*wood identification*” (*cluster* vermelho), o qual detém a maior centralidade e o maior volume de toda a rede. Além disso, o agrupamento vermelho, estruturado pela identificação anatômica, concentra termos associados à automação tecnológica e à rastreabilidade forense. Esse nó estabelece conexões diretas com metodologias de inteligência artificial, como “*machine learning*”, “*deep learning*”,

“*computer vision*” e “*xylotron*”, além de marcadores regulatórios, como “CITES” e “*illegal logging and timber trade*”.

## 4 DISCUSSÃO

### 4.1 A xiloteca como infraestrutura estratégica

As publicações reunidas neste estudo convergem para um eixo central tradicional na ciência da madeira: a identificação de espécies lenhosas. A caracterização anatômica, em níveis macro e microscópico, constitui o fundamento dessas investigações (Bodin *et al.*, 2024; Siam *et al.*, 2022). Paralelamente, a adoção gradual de novas ferramentas ao longo de três décadas ampliou o uso da anatomia em estudos arqueológicos e patrimoniais e possibilitou a elucidação das estratégias de uso de recursos madeireiros por civilizações antigas (Booi *et al.*, 2014; Herrera-Castro *et al.*, 2019; Melo Júnior e Barros, 2018) e a reconstrução de cenários ambientais do passado (Albuquerque *et al.*, 2016).

No entanto, é a urgência da forense ambiental que parece ditar o ritmo atual do campo. O aumento expressivo de publicações sobre xilotecas em 2021 (Figura 1) sugere uma inflexão metodológica, associada a demandas recentes ligadas à rastreabilidade da madeira comercializada no mundo. Estudos mais citados historicamente concentravam-se na anatomia da madeira, com aplicações em paleobotânica (Wheeler e Lehman, 2000) e dendrocronologia (Stahle, 1999); a produção recente, porém, desloca o foco para ferramentas que permitem verificar a identidade taxonômica em conjunto com a procedência geográfica (Arévalo *et al.*, 2021; Gasson *et al.*, 2021; Ravindran *et al.*, 2021). Esse deslocamento reflete cadeias comerciais de produtos florestais cada vez mais extensas e regimes regulatórios que exigem comprovação rigorosa de origem (Jiao *et al.*, 2018).

A validação taxonômica sustenta o cumprimento de normas internacionais, como a CITES, a Lei Lacey dos Estados Unidos, o Regulamento da União Europeia para

Produtos Livres de Desmatamento (EUDR) e as exigências do Sistema de Controle da Origem dos Produtos Florestais (Sinaflor) do Brasil, pois contribui para determinar a identidade da espécie explorada e a procedência do material. Dessa forma, as xilotecas passam a operar como bases de referência que sustentam tanto a identificação anatômica da madeira quanto abordagens integradas, que combinam dados genéticos (Yu *et al.*, 2017), químicos (Price *et al.*, 2022) e isotópicos (Gori *et al.*, 2013).

O pico de publicações observado em 2021 coincide temporalmente com o período de restrições sanitárias associadas à pandemia de Covid-19, que limitaram drasticamente as atividades de campo (Bates *et al.*, 2020). Embora o desenho cienciométrico adotado não permita atestar uma relação direta de causalidade, levanta-se a hipótese de que esse cenário restritivo tenha ampliado o protagonismo dos acervos históricos. Nesse contexto, é plausível supor que as xilotecas tenham se consolidado como uma das principais alternativas empíricas viáveis, o que ajudaria a explicar um possível redirecionamento dos esforços de pesquisa para coleções já estabelecidas.

#### **4.2 Inovações tecnológicas e o gargalo curatorial na identificação da madeira**

A associação entre o termo *xylarium* e os campos de identificação de madeiras e *machine learning* (Figura 4) confirma uma tendência nas publicações recentes, que articulam coleções biológicas a ferramentas computacionais voltadas ao reconhecimento automatizado de espécies comerciais (Arifin *et al.*, 2020; Arévalo *et al.*, 2021; De Blaere *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024; Ravindran *et al.*, 2021). Esse movimento se insere em um esforço mais amplo de integração entre acervos taxonômicos consolidados e métodos de classificação baseados em dados, do qual o XyloTron é exemplo representativo. Essa plataforma de código aberto foi concebida para triagem e identificação macroscópica de madeira a partir de amostras polidas e documentadas em arquivos de imagem (Arévalo *et al.*, 2021; Ravindran *et al.*, 2021). Ainda assim, o desempenho do sistema depende diretamente da qualidade taxonômica das amostras e da consistência dos protocolos de preparação e aquisição de imagens (Gasson *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2025). Esse aspecto estabelece um limite estrutural à autonomia dessas

abordagens: a acurácia dos algoritmos é diretamente proporcional à confiabilidade do material biológico empregado no treinamento (Jiao *et al.*, 2020). Isto é, a precisão das tecnologias emergentes depende, em última instância, do rigor curatorial das coleções que as sustentam.

A incorporação da inteligência artificial, portanto, não reduz a relevância da anatomia clássica da madeira; pelo contrário, amplifica a demanda por amostras bem documentadas e por procedimentos curatoriais mais rigorosos (De Blaere *et al.*, 2023; Price *et al.*, 2022). Iniciativas como o *WorldForestID*, uma proposta que orienta padrões internacionais para dados de referência florestal, estabelecem critérios de qualidade para xilotecas, cujas amostras devem ser preservadas e curadas, não contaminadas, identificadas de forma confiável e com procedência geográfica precisa (Gasson *et al.*, 2021). A ausência de conformidade com esses critérios compromete a estabilidade dos modelos automatizados de identificação, sobretudo quando aplicados a conjuntos de dados heterogêneos.

#### **4.3 Disparidades de impacto e vieses de indexação**

O gráfico de distribuição geográfica das publicações sobre xilotecas e estudos da madeira (Figura 2) evidencia uma discrepância entre a produção científica e o impacto bibliométrico. Embora países com alta diversidade biológica, como o Brasil, apresentem volume de publicações indexadas semelhante ao dos Estados Unidos, a rede de influência é dominada por nações do Hemisfério Norte, com os Estados Unidos acumulando quase cinco vezes mais citações (Seção 3.3). Esse cenário sugere que mecanismos de legitimação editorial contribuem para a disparidade observada, embora o desenho do estudo não permita estabelecer causalidade direta. A distribuição das publicações, conforme a Tabela 3 e o diagrama de Sankey (Figura 3), corrobora essa hipótese ao indicar a concentração da produção em um grupo reduzido de periódicos. O padrão persiste mesmo diante de uma base produtiva geograficamente distribuída e de níveis expressivos de coautoria internacional (31,63%). Em outras palavras, mesmo em países com elevada produção, publicações fora dos periódicos dominantes tendem

a ter menor impacto, e o acesso a esses fóruns de alto impacto, quando ocorre, costuma assumir caráter subsidiário (Mongeon e Paul-Hus, 2016).

Somado a isso, o predomínio da língua inglesa nas bases de indexação atua como outro filtro de visibilidade. Produções técnicas de alta relevância local, como catálogos taxonômicos, relatórios institucionais e boletins especializados, tendem a ficar subrepresentadas quando publicadas em línguas não inglesas (Chavarro *et al.*, 2018). Segundo Amano *et al.* (2016), em estudo sobre o impacto das barreiras linguísticas na ciência da conservação da biodiversidade, trabalhos regionais publicados em idiomas nativos costumam ser classificados como literatura cinzenta, o que dificulta o uso desse conhecimento por pesquisadores, gestores e formuladores de políticas. Em contrapartida, trabalhos inseridos em periódicos internacionais em inglês apresentam maior probabilidade de circulação e de citação, o que reforça padrões já consolidados na comunidade científica. Assim, a ciência produzida regionalmente corre o risco de permanecer invisibilizada na medida em que sua validação depende de periódicos cuja centralidade na estrutura editorial internacional é historicamente assimétrica. As consequências desse viés ultrapassam os indicadores bibliométricos, pois comprometem diretamente o protagonismo acadêmico, a viabilidade de financiamentos internacionais e a sustentabilidade das infraestruturas de pesquisa (Mongeon e Paul-Hus, 2016).

#### **4.4 Fragmentação terminológica**

A análise da estrutura conceitual (Seção 3.4) revela uma pluralidade no uso de descritores para designar xilotecas. Embora o termo *xylarium* seja amplamente documentado e reconhecido como padrão institucional da área, conforme o *Index Xylariorum*, a literatura frequentemente o alterna com variantes como *wood collection* e *reference wood collection*, o que dificulta a identificação unificada dessas coleções e fragmenta a rede conceitual resultante das análises bibliométricas (Figura 4). Conforme alertam Donthu *et al.* (2021), a falta de padronização trata termos equivalentes como entidades distintas, o que compromete a recuperação dos dados, desagrega a rede de

conexões e distorce a representatividade do campo de pesquisa. A adoção de vocabulários controlados e diretrizes padronizadas de indexação pode favorecer a integração entre estudos e ampliar a visibilidade das xilotecas em bases de dados. Conforme Wilkinson *et al.* (2016), a padronização semântica é pré-requisito para a interoperabilidade, a qual torna os dados legíveis e processáveis não apenas por pesquisadores, mas por agentes computacionais.

#### **4.5 Limitações do estudo e perspectivas para pesquisas futuras**

As limitações deste estudo decorrem do recorte metodológico adotado, com destaque para o duplo viés de indexação e de idioma. A restrição às bases Scopus e Web of Science, bem como o uso de uma estratégia de busca limitada à língua inglesa, favorece uma produção científica de caráter globalizado e exclui bases regionais e publicações em outros idiomas. Nesse sentido, o próprio delineamento da pesquisa reflete, em parte, o viés de visibilidade identificado nos resultados. Além disso, o recorte estritamente cienciométrico desta investigação constitui outra limitação metodológica. Embora as métricas bibliométricas sejam eficazes para delinear o fluxo de publicações e o impacto das citações, elas não permitem, por exemplo, mensurar a realidade física e administrativa das xilotecas. A ampla visibilidade acadêmica dos acervos de madeira não garante, por si só, a efetiva valorização dessas coleções.

Como desdobramento das limitações apresentadas, o avanço da área depende da construção de novas agendas de pesquisa que articulem métricas de impacto com as condições reais das coleções de madeira. A inclusão de bases regionais, a exemplo das ibero-americanas SciELO, Redalyc e Latindex, da africana AJOL e das asiáticas CNKI, J-STAGE e KoreaScience, pode atenuar o viés das grandes plataformas e recuperar a literatura técnica local subrepresentada. Adicionalmente, para superar a limitação estritamente cienciométrica, investigações futuras devem avaliar a realidade física das xilotecas. A coleta de dados primários junto a curadores pode fornecer um diagnóstico mais preciso da infraestrutura, do financiamento e da capacidade operacional das

xilotecas, que são elementos essenciais para embasar qualquer política efetiva de preservação desses acervos.

Além disso, pesquisas futuras devem articular a curadoria à precisão tecnológica. A quantificação das falhas de modelos de inteligência artificial treinados com bases de dados sem validação rigorosa permitiria demonstrar, de forma objetiva, em que medida amostras mal identificadas comprometem o desempenho dos algoritmos e, por extensão, qualquer esforço de rastreabilidade madeireira apoiado nessas tecnologias.

## 5 CONCLUSÃO

A literatura científica sobre xilotecas revela um campo geograficamente distribuído e tematicamente diversificado, ainda marcado por assimetrias de impacto e por uma fragmentação terminológica que compromete sua visibilidade nas bases de dados. A trajetória das publicações ao longo dos anos reflete pressões externas concretas, regulatórias e tecnológicas, que redefiniram o papel dessas coleções na ciência da madeira. Os resultados indicam que métodos computacionais e analíticos emergentes não tornam as xilotecas dispensáveis; ao contrário, ampliam sua relevância e o nível de exigência sobre elas. A confiabilidade de qualquer sistema de identificação baseado em inteligência artificial começa, necessariamente, na qualidade das amostras físicas e no rigor de sua conservação, o que torna o investimento ativo na curadoria científica dessas instituições condição indispensável para qualquer avanço tecnológico consistente no setor.

**Agradecimentos:** À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), pela concessão de bolsa no âmbito do Programa de Apoio à Pós-Graduação Stricto Sensu (POSGRAD/FAPEAM 2024-2025; Resolução n.º 002/2024, UFAM).

**Disponibilidade de dados:** Todos os dados e scripts em R utilizados neste estudo estão disponíveis no Zenodo (<https://doi.org/10.5281/zenodo.19683857>).

## 6 REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. R. *et al.* Comparative analysis of anatomy and micro-densitometry of the growth rings of hardwoods and conifers, with emphasis on dendrochronology. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 111, p. 595-610, 2016. <https://dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n111.06>.
- AMANO, T. *et al.* Languages Are Still a Major Barrier to Global Science. **PLOS Biology**, v. 14, n. 12, p. e2000933, 2016. <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pbio.2000933>.
- ANGGARA, R. *et al.* Anatomical and Fiber Quality Characterization of the Least-Known Wood Species of Icacinaceae, Cardiopteraceae and Stemonuraceae. **Lecture Notes in Civil Engineering**, v. 255, p. 233-242, 2025. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-1422-5\\_19](https://doi.org/10.1007/978-981-19-1422-5_19).
- ARÉVALO, R. *et al.* Imaged based identification of colombian timbers using the xylotron: a proof of concept international partnership. **Colombia Forestal**, v. 24, n. 1, p. 5-16, 2021. <https://doi.org/10.14483/2256201X.16700>.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. *bibliometrix*: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>.
- ARIFIN, M. R. *et al.* Development of mobile-based application for practical wood identification. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 572, n. 1, p. 012040, 2020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/572/1/012040>.
- BAAS, P. *et al.* Mogami Tokunai's wood collection from Hokkaido, Japan: an early record of Ainu wood culture. **IAWA Journal**, v. 42, n. 4, p. 349-364, 2021. <https://doi.org/10.1163/22941932-bja10057>.
- BATES, A. E. *et al.* COVID-19 pandemic and associated lockdown as a “Global Human Confinement Experiment” to investigate biodiversity conservation. **Biological Conservation**, v. 248, p. 108665, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108665>.
- BEECKMAN, H. Wood anatomy and trait-based ecology. **IAWA Journal**, v. 37, p. 127-151, 2016. <https://doi.org/10.1163/22941932-20160127>.
- BERMEO, N. *et al.* First Contributions of Charcoal Analysis to the Study of the Specialised Fishing Site of Bayovar-01 (5th–8th Centuries AD), Extreme Northern

- Coast of Peru. **Environmental Archaeology**, v. 26, n. 2, p. 146-158, 2021.  
<https://doi.org/10.1080/14614103.2018.1563981>.
- BLONDEL, V. D. *et al.* Fast unfolding of communities in large networks. **Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment**, v. 2008, n. 10, p. P10008, 2008.  
<https://doi.org/10.1088/1742-5468/2008/10/P10008>.
- BODIN, S. C. *et al.* A database and interactive identification key for the anatomy of woods of the Ethiopian Afromontane Forest. **IAWA Journal**, v. 46, n. 3, p. 297-315, 2024. <https://doi.org/10.1163/22941932-bja10175>.
- BOOI, M. *et al.* Wood anatomical variability in Early Permian 'araucarioids'. **IAWA Journal**, v. 35, n. 3, p. 307-331, 2014. <https://doi.org/10.1163/22941932-00000068>.
- CAPUTO, A. *et al.* Digitalization and business models: Where are we going? A science map of the field. **Journal of Business Research**, v. 123, p. 489-501, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.09.053>.
- CARLQUIST, S. **Comparative Wood Anatomy**. Springer Berlin Heidelberg, 1988.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-21714-6>.
- CHAVARRO, D. *et al.* To what extent is inclusion in the Web of Science an indicator of journal 'quality'? **Research Evaluation**, v. 27, n. 2, p. 106-118, 2018.  
<https://doi.org/10.1093/reseval/rvy001>.
- CHAVE, J. *et al.* Toward a worldwide wood economic spectrum. **Ecology Letters**, v. 12, p. 277-367, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x>.
- CHEN, H. *et al.* When text mining meets science mapping in the bibliometric analysis: A review and future opportunities. **International Journal of Engineering Business Management**, v. 15, p. 18479790231222349, 2023.  
<https://doi.org/10.1177/18479790231222349>.
- DAGNINO, D.; MARIOTTI, M. G. The Historical Wood Collection of The University of Genoa: Revision and Economic Value Estimation. **Bulletin of Environmental and Life Sciences**, v. 3, p. 45-56, 2021. <https://doi.org/10.15167/2612-2960/BELS2021.3.1.1280>.
- DE BLAERE, R. *et al.* SmartWoodID—an image collection of large end-grain surfaces to support wood identification systems. **Database**, v. 2023, p. baad034, 2023.  
<https://doi.org/10.1093/database/baad034>.

- DE OLIVEIRA, O. J. *et al.* Bibliometric Method for Mapping the State-of-the-Art and Identifying Research Gaps and Trends in Literature: An Essential Instrument to Support the Development of Scientific Projects. **Scientometrics Recent Advances**, 2019. <https://doi.org/10.5772/intechopen.85856>.
- DEKLERCK, V. *et al.* Sleeping beauties in materials science: unlocking the value of xylarium specimens in the search for timbers of the future. **Holzforschung**, v. 73, n. 10, p. 889-897, 2019. <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0269>.
- DOMÍNGUEZ-DELMÁS, M. *et al.* From Forests to Heritage: Unravelling the Journey of Historical Timbers and Wooden Cultural Heritage. **International Journal of Wood Culture**, v. 3, p. 1-7, 2023. <https://doi.org/10.1163/27723194-bja10024>.
- DONTHU, N. *et al.* How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 133, p. 285-296, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>.
- GASSON, P. E. *et al.* WorldForestID: Addressing the need for standardized wood reference collections to support authentication analysis technologies; a way forward for checking the origin and identity of traded timber. **Plants, People, Planet**, v. 3, n. 2, p. 130-141, 2021. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10164>.
- GASSON, P.; BAAS, P.; WHEELER, E. Wood Anatomy of CITES-Listed tree species. **IAWA Journal**, v. 32, n. 2, p. 155-198, 2011. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000050>.
- GAVIRIA-MARIN, M. *et al.* Knowledge management: a global examination based on bibliometric analysis. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 140, p. 194-220, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.07.006>.
- GORI, Y. *et al.* Carbon, hydrogen and oxygen stable isotope ratios of whole wood, cellulose and lignin methoxyl groups of *Picea abies* as climate proxies. **Rapid Communications in Mass Spectrometry**, v. 27, p. 265-275, 2013. <https://doi.org/10.1002/rcm.6446>.
- HERRERA-CASTRO, M. *et al.* Wood identification and acoustic analysis of three original Aztec teponaztli musical instruments. **Madera y Bosques**, v. 25, n. 1, 2019. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511690>.
- HORIKAWA, Y. *et al.* Near-infrared spectroscopy as a potential method for identification of anatomically similar Japanese diploxylons. **Journal of Wood Science**, v. 61, n. 3, p. 251-261, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1462-2>.

- JIAO, L. *et al.* DNA Barcode Authentication and Library Development for the Wood of Six Commercial Pterocarpus Species: the Critical Role of Xylarium Specimens. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 1945, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20381-6>.
- JIAO, L. *et al.* DNA barcoding for identification of the endangered species *Aquilaria sinensis*: comparison of data from heated or aged wood samples. **Holzforschung**, v. 68, n. 4, p. 487-494, 2014. <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0129>.
- JIAO, L. *et al.* DNA barcoding for wood identification: global review of the last decade and future perspective. **IAWA Journal**, v. 41, n. 4, p. 620-643, 2020. <https://doi.org/10.1163/22941932-bja10041>.
- LAMB, H.; CURTIS, A. **A Guide for Developing a Wood Collection**. Forest Products Society for the International Wood Collectors Society, 2005.
- LANGBOUR, P. *et al.* Description of the Cirad wood collection in Montpellier, France, representing eight thousand identified species. **Bois et Forêts des Tropiques**, v. 339, p. 7-16, 2019. <https://doi.org/10.19182/bft2019.339.a31709>.
- LIU, S. *et al.* Automated species discrimination and feature visualization of closely related Pterocarpus wood species using deep learning models: comparison of four convolutional neural networks. **Wood Science and Technology**, v. 59, n. 5, p. 86, 2025. <https://doi.org/10.1007/s00226-025-01690-2>.
- LIU, S. *et al.* How to discriminate wood of CITES-listed tree species from their look-alikes: using an attention mechanism with the ResNet model on an enhanced macroscopic image dataset. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1368885, 2024. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1368885>.
- LYNCH, A. H.; GASSON, P. E. (Comp.). **Index Xylariorum 4.2**. IAWA, 2025. Disponível em: <https://globaltimbertrackingnetwork.org/products/iawa-index-xylariorum/>. Acesso em: 15 mar. 2026.
- MALHI, Y. *et al.* The allocation of ecosystem net primary productivity in tropical forests. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 366, n. 1582, p. 3225-3245, 2011. <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0062>.
- MELO JÚNIOR, J. C. F. de; BARROS, C. F. de. Madeiras históricas em embarcações tradicionais do baixo rio São Francisco. **Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia**, n. 28, 2018. <https://doi.org/10.11606/issn.2448-1750.revmae.2017.125770>.

- MELO-JÚNIOR, J. C. F. de. Historical anatomy: concept and approaches. **Rodriguésia**, v. 75, p. e01882023, 2024. <https://doi.org/10.1590/2175-7860202475046>.
- MONGEON, P.; PAUL-HUS, A. The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. **Scientometrics**, v. 106, n. 1, p. 213-228, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5>.
- PRICE, E. R. *et al.* Reliability of wood identification using DART-TOFMS and the ForeST© database: A validation study. **Forensic Science International: Animals and Environments**, v. 2, p. 100045, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fsiae.2022.100045>.
- R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria, 2026. <https://www.R-project.org/>.
- RAVINDRAN, P. *et al.* Field-Deployable Computer Vision Wood Identification of Peruvian Timbers. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 647515, 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.647515>.
- SHMULSKY, R.; JONES, P. D. Tree Growth and Production of Woody Tissue. **The Forest Products and Wood Science**, p. 1-20, 2019. <https://doi.org/10.1002/9781119426400.ch1>.
- SIAM, N. A. *et al.* Wood anatomical features of Anacardiaceae from Malaysia. **BioResources**, v. 18, n. 1, p. 1232-1250, 2022. <https://doi.org/10.15376/biores.18.1.1232-1250>.
- SOMAL, M.; MISHRA, K. Xylarium: The Wood Library. **Resonance**, v. 30, n. 4, p. 505-512, 2025. <https://doi.org/10.1007/s12045-025-1776-3>.
- STAHL, D. W. Useful Strategies for the Development of Tropical Tree-Ring Chronologies. **IAWA Journal**, v. 20, n. 3, p. 249-253, 1999. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000688>.
- ABEELE, S. V. *et al.* When xylarium and herbarium meet: linking Tervuren xylarium wood samples with their herbarium specimens at Meise Botanic Garden. **Biodiversity Data Journal**, v. 9, p. e62329, 2021. <https://doi.org/10.3897/BDJ.9.e62329>.

- WANG, Y.; ZHANG, R.; ZHOU, Z. Radial variation of wood anatomical properties determines the demarcation of juvenile-mature wood in *Schima superba*. **Forests**, v. 12, p. 512, 2021. <https://doi.org/10.3390/f12040512>.
- WHEELER, E. A.; LEHMAN, T. M. Late Cretaceous woody dicots from the Aguja and Javelina Formations, Big Bend National Park, Texas, USA. **IAWA Journal**, v. 21, n. 1, p. 83-120, 2000. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000239>.
- WILKINSON, M. D. *et al.* The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. **Scientific Data**, v. 3, n. 1, p. 160018, 2016. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>.
- YU, M. *et al.* DNA barcoding of vouchered xylarium wood specimens of nine endangered *Dalbergia* species. **Planta**, v. 246, n. 6, p. 1165-1176, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00425-017-2758-9>.

## MATERIAL SUPPLEMENTAR

### Material Suplementar A. Principais instituições por volume de publicações.

| Affiliation                                                             | Articles |
|-------------------------------------------------------------------------|----------|
| Chinese Academy of Forestry (incl. Research Institute of Wood Industry) | 33       |
| United States Department of Agriculture (USDA / US Forest Service)      | 20       |
| Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)                     | 16       |
| University of Wisconsin-Madison (incl. UW System)                       | 14       |
| Ghent University                                                        | 13       |
| Purdue University (incl. Purdue System)                                 | 11       |
| Natural Resources Canada (incl. Canadian Forest Service)                | 8        |
| Royal Museum for Central Africa                                         | 8        |
| Swiss Federal Institutes of Technology Domain (incl. EMPA)              | 8        |
| Royal Botanic Gardens, Kew                                              | 7        |
| Universidade de São Paulo (USP)                                         | 7        |
| Université de Toulouse (incl. Paul Sabatier e Jean Jaurès)              | 7        |
| Australian National University                                          | 6        |
| CIRAD                                                                   | 6        |
| Leiden University                                                       | 6        |
| Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)                          | 6        |
| Universidade Estadual Paulista (UNESP)                                  | 6        |
| Naturalis Biodiversity Center                                           | 5        |
| Universidad Distrital Francisco José de Caldas                          | 5        |
| Université de Montpellier                                               | 5        |
| National Research and Innovation Agency of Indonesia (BRIN / LIPI)      | 4        |
| Forestry and Forest Products Research Institute                         | 4        |
| Cornell University                                                      | 3        |
| Khon Kaen University                                                    | 3        |
| Laval University                                                        | 3        |
| Leibniz Association (incl. ZALF)                                        | 3        |
| Mississippi State University                                            | 3        |
| United States Department of the Interior (incl. US Fish and Wildlife)   | 3        |
| University of British Columbia                                          | 3        |
| University of Oxford                                                    | 3        |
| Arizona State University                                                | 2        |
| Beijing Forestry University                                             | 2        |
| Boston University                                                       | 2        |
| Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)                  | 2        |
| Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)                   | 2        |
| Forest Products Research and Development Institute                      | 2        |
| Indian Council of Forestry Research and Education (ICFRE)               | 2        |
| Indian Institute of Technology (IIT)                                    | 2        |
| Moscow State University                                                 | 2        |
| Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN)                             | 2        |
| North Carolina State University                                         | 2        |
| Parul University                                                        | 2        |
| Russian Academy of Sciences (incl. Komarov Botanical Institute)         | 2        |
| State University of New York (SUNY)                                     | 2        |

| Affiliation                                 | Articles |
|---------------------------------------------|----------|
| Tottori University                          | 2        |
| Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) | 2        |
| Université de Rennes                        | 2        |
| University of Adelaide                      | 2        |
| University of Arkansas                      | 2        |
| University of Canterbury                    | 2        |
| University of Kisangani                     | 2        |
| University of Liège                         | 2        |
| University of Melbourne                     | 2        |
| University of Torino                        | 2        |

**Fonte:** Dados da pesquisa (2026).

## Material Suplementar B: Parâmetros de Configuração de Redes (*Biblioshiny*)

### Diagrama de Sankey (Three-fields plot - Figura 3)

O fluxo de produção científica foi estruturado a partir do relacionamento trilateral entre as seguintes variáveis de metadados extraídas da coleção principal:

- Campo esquerdo (Origem): AU\_CO (Countries)
- Campo central (Temática): DE (Author keywords)
- Campo direito (Destino): SO (Sources/Journals)

Limite de itens exibidos: Foram selecionados os 10 itens mais relevantes por coluna para otimização da visualização das correntes de maior impacto.

### Rede de coocorrência de palavras-chave (Figura 4)

A estrutura conceitual da literatura foi mapeada utilizando a análise de coocorrência de palavras-chave, baseada nos seguintes parâmetros matemáticos e de layout:

Campo analisado: Author keywords (DE)

Layout de visualização da rede: Layout automático

Algoritmo de *clusterização*: Método de Louvain para detecção de comunidades.

Método de normalização: Associação.

Total de nós plotados: Limite de 50 nós da rede.

Filtros de topologia: Remoção de nós isolados ativada, com exigência de no mínimo 2 arestas para validação das conexões.

Parâmetros gráficos estruturais: Força de repulsão ajustada em 0,5; opacidade visual em 0,7; nós em formato circular (Dot) com sombra ativada; espessura das arestas definida em 5; e dimensionamento proporcional de rótulos configurado no tamanho 3.

**Material Suplementar C.** Composição estrutural dos agrupamentos temáticos (*clusters*) da rede de coocorrência de palavras-chave.

| Node                             | Cluster | Betweenness | Closeness | PageRank |
|----------------------------------|---------|-------------|-----------|----------|
| wood identification              | 1       | 176,257     | 0,022     | 0,076    |
| machine learning                 | 1       | 1,3         | 0,015     | 0,041    |
| deep learning                    | 1       | 1,3         | 0,015     | 0,039    |
| xylotron                         | 1       | 0           | 0,015     | 0,032    |
| cites                            | 1       | 0           | 0,014     | 0,007    |
| computer vision                  | 1       | 0           | 0,015     | 0,031    |
| forensic wood anatomy            | 1       | 0           | 0,014     | 0,014    |
| illegal logging and timber trade | 1       | 0           | 0,015     | 0,031    |
| diffuse porous hardwoods         | 1       | 0           | 0,015     | 0,023    |
| dna barcoding                    | 1       | 0           | 0,014     | 0,007    |
| wood anatomy                     | 2       | 74,143      | 0,019     | 0,04     |
| illegal logging                  | 2       | 0           | 0,015     | 0,012    |
| guaiacum coulteri                | 2       | 0           | 0,013     | 0,019    |
| histochemistry                   | 2       | 0           | 0,013     | 0,019    |
| medicinal plants                 | 2       | 0           | 0,013     | 0,019    |
| xylarium                         | 3       | 193         | 0,022     | 0,04     |
| wood collection                  | 3       | 0           | 0,015     | 0,022    |
| density                          | 3       | 0           | 0,015     | 0,022    |
| acoustic velocity                | 3       | 0           | 0,015     | 0,022    |
| modulus of elasticity (moe)      | 3       | 0           | 0,015     | 0,022    |
| wood                             | 4       | 120         | 0,017     | 0,031    |
| xylotheque                       | 4       | 0           | 0,013     | 0,027    |
| bark                             | 4       | 0           | 0,013     | 0,027    |
| anatomical studies               | 4       | 0           | 0,013     | 0,027    |
| cambium                          | 4       | 0           | 0,013     | 0,027    |
| sampling                         | 4       | 0           | 0,013     | 0,027    |
| secondary phloem                 | 4       | 0           | 0,013     | 0,027    |
| xylaria                          | 5       | 0           | 1         | 0,027    |
| herbaria                         | 5       | 0           | 1         | 0,027    |
| atlantic forest woods            | 6       | 0           | 0,333     | 0,027    |
| cultural heritage                | 6       | 0           | 0,333     | 0,027    |
| historic woods                   | 6       | 0           | 0,333     | 0,027    |

| Node              | Cluster | Betweenness | Closeness | PageRank |
|-------------------|---------|-------------|-----------|----------|
| material culture  | 6       | 0           | 0,333     | 0,027    |
| charcoal          | 7       | 0           | 1         | 0,027    |
| human impact      | 7       | 0           | 1         | 0,027    |
| costa rican woods | 8       | 0           | 1         | 0,027    |
| fluorescence      | 8       | 0           | 1         | 0,027    |

**Fonte:** Dados da pesquisa (2026). Agrupamentos definidos automaticamente via pacote *bibliometrix*.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

---

A madeira tropical guarda em silêncio seu testemunho do tempo, mas fala com clareza quando examinada por olhos atentos à sua anatomia. A interpretação da história registrada no interior de amostras lenhosas, no entanto, depende da sua integridade física, da precisão dos dados de sua origem biológica, da representatividade do material coletado em relação ao indivíduo arbóreo e das abordagens metodológicas aplicadas à análise de suas estruturas anatômicas. Esses fatores são determinantes para a qualidade dos dados extraídos e para a confiabilidade das conclusões científicas produzidas a partir deles.

Em conjunto, os capítulos desta dissertação demonstraram que as triagens anatômicas conduzidas a partir de material depositado em xilotecas, quando orientadas à ampliação do número de espécies tropicais com potencial dendrocronológico, devem apoiar-se em métodos analíticos adaptados e em coleções capazes de assegurar a integridade física e documental das amostras estudadas. Os resultados alcançados devem ser ponderados à luz de algumas limitações, entre as quais se destacam a amostragem restrita a um indivíduo por táxon e a ausência de informações sobre as amostras utilizadas (Capítulo I) e o escopo estritamente cienciométrico aplicado no Capítulo II.

Como desdobramento, recomenda-se que investigações futuras avaliem a anualidade das camadas de crescimento das espécies selecionadas, com apoio de técnicas complementares à anatomia da madeira. Sugere-se, ainda, a realização de diagnósticos sobre a infraestrutura e a operação de xilotecas institucionais, a fim de avaliar o estado curatorial do material lenhoso disponível para triagens semelhantes à desenvolvida nesta pesquisa. Aliar esse rigor curatorial à precisão metodológica deve fortalecer o papel das xilotecas como bases estratégicas e confiáveis para o avanço da dendrocronologia tropical.