



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO FACULDADE
DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS E
AMBIENTAIS**

WALDELAINÉ RODRIGUES HOFFMANN

Magister Scientiae

**INFLUÊNCIA DO SÍTIO NA QUALIDADE DO LENHO DE ÁRVORES DE *Tectona
grandis* DE PLANTACÕES DE RÁPIDO CRESCIMENTO**

CUIABÁ, MT

2025

WALDELAINÉ RODRIGUES HOFFMANN

INFLUÊNCIA DO SÍTIO NA QUALIDADE DO LENHO DE ÁRVORES DE *Tectona grandis* DE PLANTACÕES DE RÁPIDO CRESCIMENTO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais da Faculdade de Engenharia Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Prof^ª Dr^ª. Bárbara Luísa Corradi Pereira

Coorientadora: Prof^ª Dr^ª. Elaine Cristina Lengowski

CUIABÁ, MT
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

H711i Hoffmann, Waldelaine Rodrigues.

Influência do sítio na qualidade do lenho de árvores de *Tectona grandis* de plantações de rápido crescimento. [recurso eletrônico] / Waldelaine Rodrigues Hoffmann. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 89 f., il. color., pdf). -- 2025.

Orientadora: Bárbara Luísa Corradi Pereira.

Coorientadora: Elaine Cristina Lengowski.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Engenharia Florestal, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, Cuiabá, 2025.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. Anéis de crescimento. 2. Densidade do lenho. 3. Condições de crescimento. 4. Variação radial e longitudinal. I. Pereira, Bárbara Luísa Corradi, *orientador*. II. Lengowski, Elaine Cristina, *coorientador*. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS E AMBIENTAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "INFLUÊNCIA DO SÍTIO NA QUALIDADE DO LENHO DE ÁRVORES DE *Tectona grandis* DE PLANTACIONES DE RÁPIDO CRESCIMENTO"

AUTORA: MESTRANDA WALDELAINÉ RODRIGUES HOFFMANN

Dissertação defendida e aprovada em **04** de **JULHO** de **2025**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. DOUTORA BÁRBARA LUÍSA CORRADI PEREIRA (PRESIDENTE BANCA)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

2. DOUTORA ELAINE CRISTINA LENGOWSKI (COORIENTADORA)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

3. DOUTOR AYLSON COSTA OLIVEIRA (EXAMINADOR INTERNO)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

5. DOUTOR MARIO TOMMASIELLO FILHO (EXAMINADOR EXTERNO)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO/ESALQ

CUIABÁ, 04/07/2025.



Documento assinado eletronicamente por **BARBARA LUISA CORRADI PEREIRA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 04/07/2025, às 16:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **AYLSON COSTA OLIVEIRA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 04/07/2025, às 16:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **ELAINE CRISTINA LENGOWSKI, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 04/07/2025, às 17:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARIO TOMMASIELLO FILHO, Usuário Externo**, em 07/07/2025, às 22:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **8117643** e o código CRC **EF276CD4**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por me sustentar, guardar e confortar durante toda a minha caminhada.

À minha família, Helena Rodrigues de Almeida Hoffmann, Waldemar Hoffmann (*in memoriam*), Diego Rodrigues Bonifácio e Marcos Antônio dos Santos. Vocês são suporte, apoio e conforto. Ao meu companheiro, parceiro e amor João Vitor Fabris, que me apoia incondicionalmente, até nos dias mais difíceis. Amo vocês imensamente.

À professora Bárbara Luísa Corradi Pereira, que foi mais que uma orientadora: foi uma grande incentivadora e parceira de pesquisa incrível. Obrigada por todos esses anos, pelos direcionamentos e ensinamento, eu os guardo com muito carinho. Você é parte significativa da minha trajetória na UFMT.

Aos professores Aylson Costa Oliveira e Elaine Cristina Lengowski, obrigada por contribuírem como banca examinadora. Obrigada, ainda, pelo apoio, prontidão em ajudar, conversas e amizade.

Um agradecimento especial à Camila Mendes Campos, por caminhar ao meu lado durante todos os altos e baixos do mestrado. Obrigada por todo o companheirismo, por ouvir minhas queixas e euforias, por partilhar comigo desde coleta de campo até cerâmica fria no parque.

À Beatryz Aparecida Pessoa dos Santos, por ser minha melhor amiga. Sua amizade é boa demais de se viver.

Aos amigos Ana Rafaelly, Carleandro, Isabelly, Jackeline, Leandro, Mariana e Yuri. À Maria Eduarda Aguillar, pelo auxílio durante a coleta de dados. À Francyele Correia, que além de técnica, também é uma ouvinte e conselheira sensacional. Obrigada a todos pelas conversas, cafés e amizade.

Ao Drº João Paulo Sardo Madi, por todo empenho e auxílio para aprimorar a estatística desse trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

À Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais (PPGCFA). Obrigada, ainda, à Coordenação do PPGCFA e à técnica administrativa Nathália Vasconcelos, por me ajudar sempre que possível.

Ao Laboratório de Tecnologia da Madeira da UFMT e a toda a equipe, por ser um lugar feliz de se trabalhar.

À TRC (Teak Resources Company), pelo projeto colaborativo, parceria, financiamento e concessão dos materiais. Especialmente à Dr^a Cátia Silva, de Pesquisa e Desenvolvimento da TRC, que enfrentou o campo comigo, e me deu bons direcionamentos da indústria.

Ao professor Dr^o Mário Tommasiello Filho, por me receber na ESALQ/USP, pelos conselhos, por compor minha banca examinadora e contribuir imensamente com este trabalho.

Ao Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeiras (LAIM), da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP) pela estrutura, equipamento e suporte. Ao técnico Aparecido Siqueira e ao Dr^o Gabriel de Assis Pereira, por todo o auxílio prestado. Aos amigos que fiz no LAIM, Nathália Cardoso, Cecília Lemes, Gabriela Olmedo, Maycon Silva, Victor César e Davi Lemos, obrigada por me receberem, por me ensinarem tantas coisas, pelas partidas de Uno e almoços divertidos.

Agradeço, com apreço e reconhecimento, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para esta trajetória.

Sou, de coração, profundamente grata.

RESUMO

HOFFMANN, Waldelaine Rodrigues. *M. Sc.* Universidade Federal de Mato Grosso, julho de 2025. **Influência do sítio na qualidade do lenho de árvores de *Tectona grandis* de plantações de rápido crescimento.** Orientadora: Bárbara Luísa Corradi Pereira. Coorientadora: Elaine Cristina Lengowski.

As plantações comerciais correspondem a cerca de 80% da oferta de madeira de teca no mercado internacional, e grande parte desse fornecimento provém de florestas de rápido crescimento. Porém, a teca com altas taxas de crescimento ainda é comumente associada à madeira de menor qualidade. Em paralelo, fatores como sítio, idade e posição ao longo do fuste afetam a densidade do lenho, tornando necessário avaliar como esses fatores influenciam a variação radial e longitudinal da densidade aparente e da largura dos anéis de crescimento. O objetivo do estudo foi avaliar a influência do local de plantio no perfil de densidade aparente do lenho de *Tectona grandis* aos 15-16 anos, proveniente de plantações de rápido crescimento, por meio da técnica de microdensitometria de raios-x. Foi avaliado ainda a variação radial e longitudinal da largura dos anéis de crescimento, densidade aparente do lenho, largura e densidade do lenho inicial e lenho tardio nas três primeiras toras comerciais. O estudo amostrou 18 árvores de plantações comerciais de teca localizadas nos estados de Mato Grosso e Pará, Brasil, com idade de 15-16 anos. Foram retirados discos ao longo de quatro alturas que correspondem a base (0,1 m) até o topo das três primeiras toras comerciais (2,7 m, 5,4 m e 8,1 m). O perfil de densidade do lenho demonstrou que o material de Mato Grosso apresentou maior variação radial na densidade. Independente do sítio, a largura dos anéis diminuiu na direção radial e foi maior na base das árvores, reduzindo da base (0,1 m) até a altura de 8,1 m em 36,4% em Mato Grosso e 22,4% no Pará. Nos dois sítios, a largura do lenho inicial diminuiu longitudinalmente, com média de 10 mm de largura no sítio do Pará e 9,19 mm no Mato Grosso, enquanto a do lenho tardio se manteve constante, independentemente da altura. As árvores do Pará apresentaram largura média de lenho tardio de 0,37 mm, valor superior ao observado na teca em Mato Grosso (0,33 mm). A densidade do lenho das árvores de teca do sítio de Mato Grosso foi inferior ($0,571 \text{ g/cm}^3$) às do sítio do Pará, que alcançou $0,628 \text{ g/cm}^3$. A densidade ainda aumentou na direção radial e reduziu com menor intensidade na direção longitudinal. Não houve relação significativa entre a largura do anel de crescimento e a densidade. Conclui-se que as condições edafoclimáticas influenciaram o desenvolvimento das árvores, refletindo em variações radiais e longitudinais nas características de largura dos anéis de crescimento, largura e densidade de lenho inicial e tardio e densidade do lenho de *Tectona grandis*. As árvores provenientes do sítio do Pará apresentaram maior densidade e homogeneidade radial, enquanto as árvores de teca de Mato Grosso apresentaram menor variação longitudinalmente. Os dois sítios apresentaram árvores com densidade do lenho de teca satisfatória e compatível com padrões comerciais, demonstrando que o rápido crescimento das árvores não comprometeu a qualidade do material.

Palavras-chave: Anéis de crescimento. Densidade do lenho. Condições de crescimento. Variação radial e longitudinal.

ABSTRACT

HOFFMANN, Waldelaine Rodrigues. *M. Sc.* Universidade Federal de Mato Grosso, July, 2025.
Site influence on wood quality of *Tectona grandis* trees from fast-growing plantations.
Advisor: Bárbara Luísa Corradi Pereira. Co-advisor: Elaine Cristina Lengowski.

Teak plantations account for approximately 80% of the wood supply on the market, with a significant portion originating from fast-growing forests. However, fast-growing teak is still commonly associated with lower-quality wood. Furthermore, factors such as site, age, and position along the stem affect wood density, making it necessary to assess how these factors influence the radial and longitudinal variation of basic density and growth ring width. The objective of this study was to evaluate the influence of planting site on the apparent wood density profile of 15–16-year-old *Tectona grandis* from fast-growing plantations, using X-ray microdensitometry. The radial and longitudinal variation of growth ring width, basic wood density, and the width and density of earlywood and latewood were also evaluated in the first three commercial logs. The study sampled 18 trees from 15- to 16-year-old commercial teak plantations located in the states of Mato Grosso and Pará, Brazil. Discs were collected at four heights, corresponding to the base (0.1 m) and up to the top of the first three commercial logs (2.7 m, 5.4 m, and 8.1 m). The wood density profile demonstrated that the material from Mato Grosso presented greater radial variation in density. Regardless of the site, the ring width decreased in the radial direction and was larger at the tree base, reducing from the base (0.1 m) to a height of 8.1 m by 36.4% in Mato Grosso and 22.4% in Pará. In both sites, the earlywood width decreased longitudinally, averaging 10 mm in the Pará site and 9.19 mm in Mato Grosso, while the latewood width remained constant regardless of height. Trees from Pará showed an average latewood width of 0.37 mm, a value higher than that observed in the teak from Mato Grosso (0.33 mm). The wood density of teak trees from the Mato Grosso site was lower (0.571 g/cm³) than that from the Pará site, which reached 0.628 g/cm³. The density also increased in the radial direction and decreased with less intensity in the longitudinal direction. There was no significant relationship between growth ring width and density. It is concluded that edaphoclimatic conditions influenced tree development, reflecting in radial and longitudinal variations in the characteristics of growth ring width, earlywood and latewood width and density, and the wood density of *Tectona grandis*. Trees from the Pará site presented higher density and radial homogeneity, whereas teak trees from Mato Grosso showed less longitudinal variation. Both sites presented trees with satisfactory teak wood density compatible with commercial standards, demonstrating that the fast growth of the trees did not compromise the material's quality.

Keywords: Growth rings. Wood density. Growth conditions. Radial and longitudinal variation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo geral	13
2.2 Objetivos específicos	13
3 REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1. Produção comercial da madeira de <i>Tectona grandis</i> de rápido crescimento	14
3.2 Fatores que influenciam nas variações do lenho de <i>Tectona grandis</i>	16
3.3 Avaliação da qualidade da madeira de <i>Tectona grandis</i> por microdensitometria de raios-x no Brasil	21
4 MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1 Caracterização dos sítios de estudo	24
4.1.1 <i>Condições climáticas dos sítios</i>	25
4.1.2 <i>Condições edáficas dos sítios</i>	28
4.1.3 <i>Condições de crescimento, intervenções silviculturais e seleção das árvores</i>	29
4.2 Preparo de amostras e microdensitometria de raios x	31
4.3 Análise estatística	34
4.3.1 <i>Análise da largura dos anéis de crescimento</i>	34
4.3.2 <i>Análise dos lenhos inicial e tardio</i>	35
4.3.3 <i>Análise da densidade aparente do lenho</i>	36
4.3.4 <i>Análise da relação entre largura do anel e densidade do lenho</i>	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1 Caracterização macroscópica do lenho de <i>Tectona grandis</i>	38
5.2 Perfil de densidade aparente do lenho de <i>Tectona grandis</i>	39
5.3 Variação da largura dos anéis de crescimento de <i>Tectona grandis</i>	44
5.4 Características do lenho inicial e lenho tardio de <i>Tectona grandis</i>	51
5.5 Influência do sítio na variação radial e longitudinal da densidade do lenho de <i>Tectona grandis</i>	59
5.5.1 <i>Avaliação da variação radial da densidade do lenho ao longo da altura</i>	59
5.5.2 <i>Variação da densidade do lenho em relação ao sítio, idade cambial e altura</i>	61
5.5.3 <i>Variação da densidade do lenho ao longo da altura</i>	66
5.6 Relação da largura dos anéis de crescimento e densidade do lenho de <i>Tectona grandis</i>	69
6 CONCLUSÕES	73
REFERÊNCIAS	74
APÊNDICE I	86
APÊNDICE II	88

1 INTRODUÇÃO

As florestas naturais e plantações florestais em regiões tropicais se mostram como ferramentas importantes para mitigar o efeito das mudanças climáticas, através da captura de dióxido de carbono da atmosfera e estocagem em biomassa florestal (Nölte et al. 2018; Kumi et al., 2021; Ruslim et al., 2021; Joshi et al., 2024). Nesse contexto, aquelas com finalidade de produção de madeira sólida atuam como potenciais sumidouros de carbono, devido aos produtos finais armazenarem biomassa por um período mais extenso (Locosselli et al., 2017; Evans et al., 2022; Aryapratama e Pauliuk, 2022), uma vez que sua aplicação está associada a usos que mantêm a estrutura do lenho.

Dentre as espécies utilizadas nas plantações comerciais que o principal produto é a madeira sólida, destaca-se a *Tectona grandis* L.f., Lamiaceae, popularmente conhecida como teca, nativa das florestas tropicais do sudeste asiático (Moreira et al., 2021). A teca está entre as principais madeiras tropicais do comércio global (Gaitan-Alvarez et al., 2019). O conjunto de propriedades como densidade e estabilidade dimensional compatíveis com exigências do mercado, elevada durabilidade natural, fácil trabalhabilidade e estética atrativa devido à expressão de desenhos e cores, valorizam a madeira e resultam em produtos de maior valor agregado (Ribeiro et al., 2019; Souza et al., 2021).

Sabe-se que as propriedades da madeira são afetadas por fatores como sítio, idade, taxa de crescimento, características genéticas e manejo silvicultural (Moulin et al., 2020; Souza et al., 2024), e nas plantações de rápido crescimento de teca pode-se destacar as condições edafoclimáticas do sítio (Kollert e Kleine, 2017; Berrocal et al., 2020; Lima et al., 2021). Esses fatores refletem em variações no lenho que são observadas de forma acentuada na teca, com alterações na largura dos anéis de crescimento e proporções de lenho inicial e tardio (Rodríguez-Anda et al. 2018; Souza et al., 2019), bem como na densidade e resistência mecânica (Amoah e Inyong, 2019; Souza et al., 2024). Dessa forma, considerando que são observadas diferenças relevantes na qualidade da madeira de teca, principalmente para as propriedades anatômicas (Nocetti et al., 2011; Rodríguez-Anda et al., 2018; Souza et al., 2019), densidade do lenho (Indira e Bhat, 1998; Anish et al., 2015) e características morfológicas do tronco (Souza et al., 2024), é importante compreender os efeitos do crescimento acelerado das árvores na qualidade da madeira em plantações clonais de teca em diferentes sítios, principalmente em relação à densidade e largura de anéis.

A densidade é considerada o principal parâmetro para avaliar a qualidade da madeira, e influência na destinação do produto. Estudos sobre o lenho de teca têm se concentrado em determinar a densidade do lenho e avaliar a variação dos vasos e fibras na anatomia do lenho, observando comumente variações radiais e longitudinais (Adutwum et al., 2023; Curvo et al., 2024; Souza et al., 2024), em diferentes procedências genéticas, idade, espaçamento de plantio e condições edafoclimáticas. Outras pesquisas observaram variações de densidade, largura dos anéis e anatomia do lenho em situações de desenvolvimento diversas (Carmo et al., 2024; Amodei et al., 2021). Contudo, essas variações ainda não são amplamente avaliadas, e ainda são limitados os conhecimentos quanto ao comportamento de plantações clonais de teca de rápido crescimento e suas interações com fatores externos, como as condições de crescimento e disponibilidade de recursos para as árvores.

Por meio da microdensitometria de raio-x, com observações micrométricas da densidade do material, é possível estabelecer padrões de desenvolvimento dos anéis de crescimento e avaliar as variações na densidade (Tomazello Filho et al., 2008; Cahuana et al., 2023; Moraes et al., 2023). Isso permite obter as informações do ciclo de crescimento, bem como avaliar as variações inter e intra-anuais a partir do estabelecimento de perfis de densidade (Amodei et al., 2021; Curvo et al., 2024; Carmo et al., 2024). Além disso, variações relacionadas ao sítio, como condições climáticas incluindo temperatura e regime hídrico, características do solo e disponibilidade de recursos, são variáveis importantes que interferem na qualidade da madeira e nas decisões de manejo (Berrocal et al., 2020; Mohapatra et al., 2020; Souza et al., 2024). Desse modo, os resultados possibilitam a tomada de decisões como a determinação de idade de corte, efeitos dos tratamentos silviculturais na qualidade da madeira e ainda interpretação para seleção precoce de material genético (Boschetti et al., 2020; Tomazello Filho et al., 2008; Figueiredo, 2021; Curvo et al., 2024). E ainda, contribui com a verificação do potencial de utilização e comercialização da teca em idades intermediárias.

Estudos com *Tectona grandis* indicam variações na densidade do lenho e anéis de crescimento, com padrões de acordo com a genética do material, idade, manejo silvicultural e as condições ambientais (Figueiredo, 2021; Adutwum et al., 2023). Além disso, as condições edafoclimáticas do sítio demonstram ser determinantes nas propriedades do lenho e na qualidade tecnológica da espécie (Boschetti et al., 2020; Mohapatra et al., 2020). Embora alguns autores discutam a hipótese de que altas taxas de crescimento influenciam a densidade do lenho em árvores mais jovens (Zahabu et al., 2015), os resultados ainda não estão consolidados na

literatura para espécies tropicais e subtropicais (Mohapatra et al., 2020; Putro et al., 2020; Adutwum et al., 2023), especialmente em relação à teca.

Dessa forma, estudos que avaliam a densidade do lenho e avançam para caracterização de padrões de variação radial e longitudinal, especialmente para *Tectona grandis*, ainda representam uma lacuna do conhecimento a ser preenchida com estudos futuros. Assim, construir o perfil de densidade do lenho permite entender as variações de densidade decorrentes do sítio, e a sua influência sob o lenho. Essa necessidade se reforça ao considerar as áreas de estudo, Mato Grosso e Pará, Brasil, que possuem relevância socioeconômica e ambiental ampliada por estarem localizados na região do arco do desmatamento, zona crítica no debate sobre desenvolvimento sustentável na Amazônia. Além disso, os dois estados reúnem a maior proporção de plantações comerciais de teca no Brasil (Tomaselli e Hirakuri, 2023; Behling e Wruck, 2023), sendo regiões com elevado potencial para avanços significativos no cultivo comercial de teca.

O presente trabalho busca suprir parte da lacuna existente no conhecimento sobre as variações da densidade do lenho de *Tectona grandis* cultivada em diferentes sítios no Brasil, considerando plantações de rápido crescimento. Embora técnicas tradicionais sejam usadas para avaliar o lenho, as variações intra e interanuais na largura dos anéis e densidade, assim como as propriedades do lenho inicial e tardio em árvores de rápido crescimento, ainda são pouco investigadas. A microdensitometria de raios-x surge como uma ferramenta promissora para caracterizar essas variações de forma precisa e não destrutiva (Tomazello-Filho et al., 2008; Gaitan-Alvarez et al., 2019).

Este estudo partiu da hipótese de que as condições de crescimento influenciam a qualidade do lenho de *Tectona grandis* em plantações de rápido crescimento, com variações radiais e longitudinais. Compreender o impacto das condições ambientais na qualidade do lenho, especialmente em materiais genéticos adaptados de teca, pode contribuir para o aprimoramento das práticas de manejo e para o direcionamento de estratégias de seleção genética voltadas ao melhor desempenho silvicultural. Sob essa perspectiva, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência de dois sítios de plantio no perfil de densidade aparente do lenho de *Tectona grandis* aos 15-16 anos, localizados em Mato Grosso e Pará. Buscou-se ainda, avaliar a variação radial e longitudinal de largura dos anéis de crescimento, densidade aparente, larguras e densidades do lenho inicial e tardio.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência de dois sítios de plantio no perfil de densidade aparente do lenho de *Tectona grandis* aos 15-16 anos, localizados em Mato Grosso e Pará.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar os anéis de crescimento e perfil de densidade do lenho de *Tectona grandis*;
- Determinar a densidade aparente por microdensitometria de raio-x;
- Avaliar a variação radial e longitudinal de largura dos anéis de crescimento, densidade aparente, larguras e densidades do lenho inicial e tardio de *Tectona grandis*, pela técnica de microdensitometria de raio-x;
- Estimar as correlações entre a densidade do lenho e a largura dos anéis de crescimento;
- Comparar as características do lenho de *Tectona grandis* de rápido crescimento em sítios distintos (Mato Grosso e Pará).

3 REVISÃO DE LITERATURA

3. 1. Produção comercial da madeira de *Tectona grandis* de rápido crescimento

No panorama global de madeiras tropicais, a teca é considerada uma madeira nobre, com elevado valor comercial. Contudo, essa reputação está associada à qualidade da madeira nativa (Kollert e Kleine, 2017), que apresenta maior quantidade de madeira adula, resultando em maior densidade, colocação mais escura e maior teor de extrativos que aumentam sua durabilidade natural (Moya et al., 2014). Entretanto, a oferta da madeira de teca nativa tem diminuído progressivamente, em grande parte devido à exploração extensiva e a crescentes restrições ao corte de ocorrência natural (Kollert e Kleine, 2017; Bahtiar et al., 2023). Adicionalmente, nas regiões onde essa espécie é nativa também há plantações, com ciclos de rotação longos, variando de 60 a 100 anos (Giustina et al. 2017).

O declínio dessa disponibilidade resulta em um considerável *déficit* para atender à demanda do mercado global, o que estimula a busca por alternativas para suprir essa necessidade (Curvo et al., 2024), como as plantações de teca de rápido crescimento. A intensa exploração da espécie, somada à posterior proibição do corte de árvores de florestas naturais (Bahtiar et al., 2023), e à crescente demanda do mercado consumidor, tem impulsionado a expansão de florestas comerciais em regiões tropicais como uma estratégia para garantir o abastecimento contínuo de madeira (Kollert e Kleine, 2017).

Embora indicar com precisão os valores globais das plantações de teca seja um desafio na integração de dados de diversos países, o estudo de Kollert et al. (2024) indica que as florestas plantadas de teca cobrem 4,8 milhões de hectares globalmente. Essa área está distribuída principalmente em países da Ásia (80%), seguida pela África (13%) e América Latina (7%). Avaliando o volume de madeira colhida em toras, os países que mais produzem toras de teca de florestas plantadas são a Indonésia (639 mil m³), o Brasil (286 mil m³) e Gana (236 mil m³), que juntos representam 65% do total de toras destinadas ao mercado internacional (Kollert et al., 2024). No contexto brasileiro, uma estimativa mais recente da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2024) indicou 84.466 hectares de teca plantada no país.

A teca proveniente de plantações de rápido crescimento difere, em diversos aspectos, das originadas de árvores de crescimento lento, embora algumas pesquisas apontem semelhanças em parâmetros específicos (Anish et al., 2015; Darmawan et al., 2015). Essas diferenças influenciam diretamente seu destino no mercado. A madeira de teca de maior

qualidade, geralmente associada ao crescimento mais lento, é voltada a segmentos de alto padrão, como mobiliário fino, construção naval e aplicações externas, devido à sua durabilidade e resistência à umidade (Moya e Tenorio, 2021). Por outro lado, a teca de rápido crescimento, que apresenta maior proporção de madeira juvenil, é frequentemente direcionada à produção de lâminas e madeira serrada (Sasidharan e Ramasamy, 2021). Os materiais oriundos dos primeiros desbastes ou das porções superiores da árvore abastecem principalmente o mercado interno (Moya e Tenorio, 2021), enquanto as peças de melhor qualidade são utilizadas na fabricação de móveis, pisos, painéis decorativos, esquadrias, artesanato e componentes navais.

As características que conferem destaque à teca no mercado de madeiras nobres tropicais estão associadas às suas propriedades tecnológicas. Durabilidade natural elevada, estética atrativa, textura lisa, boa trabalhabilidade, alta estabilidade dimensional e densidade moderada tornam a madeira de teca valorizada nos mercados de luxo, além de viabilizarem diversas aplicações industriais (Kollert et al., 2024). Dessa forma, a madeira de teca é empregada em diferentes setores, desde usos culturais, como esculturas tradicionais (Kollert et al., 2024), até a construção naval, movelaria de alto padrão, pisos e decks (Tripathi et al., 2016; Niamké et al., 2021). Por apresentar alta resistência às intempéries sem comprometer a integridade da madeira, especialmente quando exposta em ambientes externos, a teca também é amplamente utilizada na construção civil em peças de menor exigência estrutural, como portas, janelas e esquadrias (Niamké et al., 2021).

Em geral, os plantios de teca de curta rotação na América Central e do Sul são conduzidos em ciclos de 20 a 25 anos (Shukla e Viswanath, 2023). Os programas de melhoramento genético e a adoção de práticas silviculturais conseguiram reduzir o ciclo de rotação para aproximadamente 25 anos, com expectativa de redução de corte com até 18-20 anos (Behling e Wruck, 2023). Mas materiais clonais vêm atingindo potencial de comercialização mais jovens, a partir dos 13 anos (Albuês et al., 2024; Souza et al., 2024). Esse aproveitamento inclui árvores de desbaste já sendo utilizadas como madeira serrada (Albuês et al., 2024). Essa antecipação do aproveitamento é relevante para o setor produtivo, pois permite avaliar se o lenho de teca, mesmo em idades precoces, apresenta propriedades tecnológicas adequadas às exigências do mercado, favorecendo a possível redução dos ciclos de corte.

Apesar das plantações comerciais de teca contribuírem para o abastecimento do mercado, o rápido crescimento resulta em produtos com proporções significativas de alborno e madeira juvenil (Paes et al., 2015; Curvo et al., 2024). Isso é reflexo da idade, que é um fator determinante da qualidade da madeira, influenciando a qualidade do material (Brito et al.,

2020). Ainda assim, a madeira de teca proveniente de plantações brasileiras vem apresentando qualidade considerada satisfatória para o mercado (Souza et al., 2024; Silva, 2024), refletida em sua valorização comercial, com precificação média de US\$ 645/m³ para a madeira serrada brasileira em junho de 2025 (ITTO, 2025).

O estabelecimento de programas de melhoramento genético para seleção de materiais genéticos adaptados a diferentes regiões, vem se mostrando como uma necessidade atual do mercado (Giustina et al., 2017; Damayanti et al., 2019). Neste aspecto, o Brasil tem avançado nos programas de melhoramento genético e clones de *Tectona grandis* (Monteuuis e Goh, 2017). Contudo, os materiais genéticos disponíveis ainda são poucos, assim como as informações sobre a qualidade do produto obtido. A teca proveniente de materiais clonais, devido à sua característica de apresentar uma maior proporção de cerne em relação ao alborno e uma maior uniformidade no fuste, tem se destacado no mercado de madeira serrada (Reategui-Betancourt et al., 2020; Barrantes-Madrigal et al., 2021; Curvo et al., 2024). Essas características, que são particularmente valorizadas para fins comerciais, tornam a teca de origem clonal uma alternativa de elevado valor comercial.

Explorar o desenvolvimento de material clonal de teca nas regiões tropicais do país, principalmente nos estados de Mato Grosso e Pará que concentram juntos 80% das áreas plantadas de teca no Brasil (Behling e Wruck, 2023), representa um avanço ao setor florestal, especialmente avaliando a qualidade da madeira de teca conduzida em regime de rápido crescimento.

3.2 Fatores que influenciam nas variações do lenho de *Tectona grandis*

Buscando suprir o déficit entre a alta demanda por madeira de teca e sua disponibilidade limitada, o mercado busca soluções para diminuir o ciclo de rotação (Shukla e Viswanath, 2021; Wirabuana et al., 2022). Técnicas silviculturais e de manejo, seleção de material genético e desenvolvimento de clones são algumas das estratégias adotadas para acelerar o desenvolvimento da teca (Kollert e Kleine, 2017; Albuês et al., 2024; Souza et al., 2024). Porém, o material produzido sobre esse regime de rotação é considerado de qualidade moderada, apresentando menores teores de extrativos, menor proporção de cerne, além de coloração menos uniforme e mais clara em comparação à teca nativa (Kollert e Kleine, 2017; Curvo et al. 2024; Albuês et al. 2024). Embora as plantações de rápido crescimento não apresentem a mesma qualidade da madeira de teca de crescimento lento, elas suprem à

necessidade de abastecimento, sobretudo para usos que admitem qualidade moderada. Nesse contexto, a priorização de maior volume de madeira, torna as plantações comerciais de rápido crescimento uma alternativa promissora ao mercado (Curvo et al. 2024).

O crescimento secundário das árvores envolve uma sequência de processos e fenômenos biológicos e fisiológicos que constroem, hierarquicamente, a composição do lenho. A divisão e diferenciação celular, distribuição das zonas meristemáticas e a formação do câmbio vascular resultam no crescimento em diâmetro das árvores, com suas características anatômicas variando nos sentidos radiais e axiais (Zhu e Li, 2023). Esses fenômenos sofrem influências bióticas e abióticas, com o crescimento dos vegetais sendo afetados pelas características genéticas, condições ambientais e disponibilidade de recursos (Zhu e Li, 2023; Pumijumnong et al. 2023).

Estudos indicam que as propriedades do lenho de teca variam longitudinalmente (Cardoso et al., 2015; Adutwum et al., 2023) e radialmente (Lima et al., 2021; Amodei et al., 2021). Essas variações são observadas em níveis inter e intra- anuais, nos anéis de crescimento (Gaitán-Alvarez et al., 2019). As variações radiais da densidade têm relação com a anatomia do lenho inicial e tardio e às alterações na morfologia dos vasos (Tomazello Filho et al., 2008; Boschetti et al., 2020). A interação entre os meristemas responsáveis pelo crescimento da árvore, assim como o crescimento em altura alteram os gradientes fisiológicos do fuste, como transporte de hormônios e disponibilidade de nutrientes, introduzindo variações nas dimensões das células longitudinais que afetam as propriedades do lenho, especialmente a densidade (Hassanpoor Tichi et al., 2021; Adutwum et al., 2023).

Comumente, a literatura relacionada à anatomia do lenho, atividade cambial e qualidade da madeira discute as relações entre densidade do lenho e a taxa de crescimento vegetal (Fukazawa, 1984; Zobel e Buijtenen, 1989; Savidge, 2003; Saranpää, 2003; Kallarackal e Ramírez, 2024). Grande parte dessas análises considera as diferenças entre grupos botânicos, como Gimnospermas e Angiospermas. Adicionalmente, outras características anatômicas também devem ser levadas em consideração, como a porosidade. Madeiras com porosidade em anel possui comportamento distinto de madeiras de porosidade difusa, considerando a distribuição e dimensão das estruturas celulares e proporções de lenho inicial e lenho tardio. As madeiras com anéis semiporosos, como a *Tectona grandis*, também são afetadas por variações nas proporções e características do lenho inicial e tardio ao longo do fuste (Zobel e Buijtenen, 1989).

Em plantações em regiões tropicais, ao longo do ano é comum variações nas condições ambientais, que afetam a atividade cambial, diferenciação celular e morfologia das células,

especialmente na espessura da parede celular e lúmen, resultando em flutuações de densidade (Micco et al. 2016).

A literatura retrata ainda que para alguns grupos de espécies, há uma relação inversa entre a largura do anel de crescimento e a densidade do lenho. Isso ocorre pelo fator de velocidade de crescimento e produção celular, onde materiais que apresentam elevada taxa de crescimento produzem células com lúmen maiores e parede celular mais finas, para que com a energia disponível, o vegetal possa produzir maior quantidade de células (Worbes, 1989; Pumijumnong et al., 2023). Contudo, esse conceito é amplamente aceito para as coníferas, nas folhosas esse comportamento não é absoluto (Zobel e Buijtenen, 1989; Saranpää, 2003). É comum que nesse grupo de árvores haja um grande controle genético para as suas propriedades, que associado a condições de crescimento favoráveis e ampla distribuição de recursos para desenvolvimento do vegetal, ocorra maior crescimento que resulta em anéis mais largos. A produção de células acompanha essa formação com recursos não escassos, produzindo parede celular com estrutura robusta, de modo que a densidade do lenho acompanhe o crescimento sem ser influenciada (Zobel e Buijtenen, 1989; Saranpää, 2003). Dessa forma, a taxa de crescimento exerce menor efeito na densidade (Nocetti et al. 2011; Moya e Tenorio, 2021).

Zobel e Buijtenen (1989) explicam que para a maior parte das coníferas e folhosas com porosidade difusa, quanto mais largos os anéis de crescimento, maior será a proporção de lenho inicial e menor será a densidade. Essa relação implica que para essas espécies, a densidade do lenho aumenta com a redução na largura dos anéis de crescimento. Contudo, em folhosas com porosidade em anel ou anéis semiporosos o comportamento é inverso. Nesse tipo de material, há maior concentração dos poros de grandes diâmetros no início do lenho inicial, que corresponde à região com menor material lenhoso e maior volume de espaços vazios, distribuídos na parte interna dos poros (Zobel e Buijtenen, 1989; Schweingruber, 2007).

Adicionalmente, a variação interna observada no lenho inicial de folhosas com porosidade em anel ou em anéis semiporosos é explicada pela sua divisão não fisiológica em duas partes (Zobel e Buijtenen, 1989; Schweingruber, 2007). No início dessa região, imediatamente posterior ao lenho tardio do anel da estação de crescimento anterior, forma-se uma região muito porosa, seguida por uma redução gradual da porosidade e aumento da proporção de células do lenho, resultando em maior densidade em relação à porção mais porosa do lenho inicial (Zobel e Buijtenen, 1989; Schweingruber, 2007). Com isso, em anéis mais largos, menor é a proporção de lenho poroso no lenho inicial, enquanto não há variação no volume e na massa nas porções restantes do lenho inicial e tardio.

Dessa forma, as relações entre densidade do lenho e taxa de crescimento em folhosas, se tornam menos consistentes e ainda dependentes de estudos que avalie interações e respostas fisiológicas, explorando que as características do lenho podem variar consideravelmente em função de outros fenômenos, como as condições ambientais e características genéticas. Esse conjunto de informações são valiosas para entender a resposta fisiológica do vegetal mediante às variações climáticas e ambientais, bem como a eficiência de tratamentos silviculturais e manejo, refletindo nas características do material que impactam diretamente seu uso e mercado.

O lenho inicial é produzido na estação chuvosa, que demarca o início do período de crescimento vegetativo, e o lenho tardio é formado no final da estação de crescimento, em períodos mais secos, em que as árvores estão sob estresse, o que limita seu crescimento radial (Housset et al. 2018; Camel e Galeano, 2021; Bahtiar et al., 2023). Para a madeira de teca, a estação seca bem definida favorece o seu desenvolvimento e é caracterizada por três a seis meses com precipitação inferior a 100 mm/mês (Restrepo et al. 2021). Essa sazonalidade favorece a diferenciação estrutural do lenho, refletindo na formação de anéis de crescimento distintos, com transição evidente entre o lenho inicial e o lenho tardio.

Em relação ao crescimento da teca em resposta às variações ambientais, Buajan et al. (2023), avaliando a relação entre a atividade cambial e a produção de lenho com as condições ambientais, indicaram que durante o período de dormência do câmbio, o câmbio vascular da teca estava completamente inativo, coincidindo com a queda total das folhas. No início da estação de crescimento, durante o período chuvoso, a reativação do câmbio teve início com as primeiras chuvas e o brotamento das folhas, marcando o começo da formação do anel de crescimento. Foi relatado ainda que o lenho inicial foi formado durante a fase de chuvas intensas e crescimento acelerado, enquanto o lenho tardio foi produzido após o pico de desenvolvimento e próximo ao final da estação chuvosa. O crescimento da madeira e a largura dos anéis apresentaram correlação positiva com a precipitação e a temperatura. Os autores também identificaram o fotoperíodo como um fator importante para sinalizar tanto o início da dormência quanto a retomada do crescimento.

A densidade do lenho da teca é influenciada por diversos fatores como idade cambial, porosidade e proporção de lenho inicial e lenho tardio (Zobel e Buijtenen, 1989; Gaitan-Alvarez et al., 2019; Shukla e Viswanath et al., 2023) e tem relação com a quantidade de lenho inicial, que produz lenho de menor densidade (Rocha et al., 2019; Shukla e Viswanath et al., 2023).

As características genéticas e o local de plantio, como precipitação, temperatura e solo, afetam as propriedades da madeira, de modo que o material poderá apresentar alterações e

especificidades (Jerez-Rico e Coutinho, 2017; Souza et al., 2024). Em relação ao local de plantio, a teca é considerada uma espécie exigente quanto às condições de crescimento (Tomaselli e Hirakuri, 2023; Souza et al., 2024). Assim, as regiões tropicais e subtropicais possuem condições edafoclimáticas que comumente permitem seu pleno desenvolvimento (Sreekumar e Sanil., 2021; Tomaselli e Hirakuri, 2023). A espécie tem preferência por clima tropical úmido, mas que tenha período seco de três a seis meses (Sasidharan, 2021; Moraes Neto et al., 2021; Souza et al., 2024), que apresente temperaturas médias anuais variando de 22°C a 26 °C e precipitação média anual entre 1200 e 3000 mm (Sasidharan, 2021).

O crescimento da teca é afetado pela drenagem do solo, se estabelecendo em solos bem drenados, porosos, de argilosos a argilo-arenoso, com pH de 5,5 a 7,5, e crescimento restrito em pH superiores (Sasidharan, 2021). A composição química do solo também é determinante no crescimento da teca, especialmente relacionado com a disponibilidade de cálcio, magnésio, fósforo, potássio e nitrogênio (Sasidharan, 2021; Moraes Neto et al., 2021).

As condições do sítio afetam no crescimento e anatomia do lenho, refletindo na sua densidade (Boschetti et al., 2020). Dentre os fatores externos, a precipitação é a principal fonte de variação na qualidade do lenho da teca (Moya e Tenório, 2021). Variações de fatores ambientais como umidade do solo e disponibilidade hídrica, atrelados à sazonalidade, como distribuição da precipitação, fenologia e temperatura também afetam o desenvolvimento de células, impactando em variações nos anéis de crescimento e na densidade (Aduwum et al., 2023; Pumijumng et al., 2023; Buajan et al., 2023). Além disso, outro fator que influencia as características da madeira é a idade (Câmara et al., 2020). Essa variável reflete no comportamento tecnológico e processo de industrialização da madeira, devido às proporções de cerne, alburno, bem como lenho inicial e lenho tardio, além de lenho juvenil e adulto.

Avaliar o sítio de implantação e como as condições edafoclimáticas podem favorecer ou limitar o desenvolvimento pleno da teca é indispensável ao sucesso do plantio (Jerez-Rico e Coutinho, 2017). Deve-se, portanto, integrá-los aos tratamentos silviculturais e material genético selecionado para otimização da produção e alcance de volume de madeira satisfatório em curta rotação (Moraes Neto et al., 2021; Silva, 2024). Assim, considerando a madeira como um material biológico heterogêneo (Schubert et al. 2022), estudar as possíveis interações e relações entre o local de crescimento e as características do lenho, considerando a variação radial e longitudinal, possibilitam avanços no entendimento do comportamento do material, decisões importantes nas instalações de plantações comerciais e precificação e destinação no mercado madeireiro.

Berrocal et al. (2020), investigando o desenvolvimento de *Tectona grandis* de rápido crescimento da região da Costa Rica, observaram que a idade cambial influenciou o lenho, com densidade aumentando com a idade da plantação. A densidade também variou longitudinalmente, com maiores valores na região da base e diminuiu com a altura. Esse comportamento relacionado a altura foi contrário ao observado por Adutwum et al. (2023).

Para compreender a variação da densidade no sentido longitudinal e radial das árvores de teca, Adutwum et al. (2023) avaliaram o efeito da altura e da idade cambial no lenho. No estudo, os autores observaram que ambos os fatores influenciaram a densidade, embora de forma independente. Os autores relataram um aumento de aproximadamente 14% na direção da medula à casca. Com esses resultados, identificaram que o lenho formado nas fases iniciais do desenvolvimento é distinto do produzido na fase adulta. Esse comportamento foi atribuído à maturação do câmbio vascular e à menor influência da copa. Em relação à altura, constatou-se um incremento da densidade longitudinalmente, com valores mais elevados nas porções superiores. Nessas regiões, o material se mostrou mais homogêneo em comparação ao lenho da base da árvore.

Ainda sobre os fatores que afetam a teca, Amodei et al. (2021) avaliaram o lenho de *Tectona grandis* em diferentes espaçamentos, identificando que a variação radial foi o fator que mais influenciou as características da madeira. Observaram também que a densidade do lenho da teca não foi afetada pelas diferentes densidades de plantio, de modo que a variação dentre os espaçamentos avaliados para árvores jovens de teca não é determinante para a qualidade da madeira. Os autores relataram ainda que as árvores eram compostas exclusivamente de lenho juvenil e que a densidade aparente média da madeira foi cerca de $0,60 \text{ g/cm}^3$.

Assim, obter a caracterização do material plantado influencia de forma direta nos aspectos produtivos, bem como contribui para a seleção de clones, buscando um melhor aproveitamento do produto final e avanços nos programas de melhoramento genético (Schuhli e Paludzyszyn Filho, 2010; Câmara et al., 2020; Curvo et al., 2024).

3.3 Avaliação da qualidade da madeira de *Tectona grandis* por microdensitometria de raios-x no Brasil

A densidade é o principal índice de qualidade da madeira. A avaliação da variação da densidade intra e interanual pode ser observada com estudos ao longo dos anéis de crescimento (Gaitan-Alvarez et al., 2019; Amodei et al., 2021). A variação intra-anual da densidade do lenho

distingue as regiões de lenho inicial e tardio, permitindo entender como respostas a estresses e fatores sazonais daquele ano exerceram resposta fisiológica para o câmbio na produção de lenho. Já as variações interanuais, entre os anéis de crescimento, possibilitam comparações entre variações climáticas e tendências de crescimento ao longo do tempo, bem como respostas à aplicação de técnicas de manejo (Gaitan-Alvarez et al., 2019; Cahuana et al., 2023; Moraes et al., 2023).

A microdensitometria de raios-x é uma técnica avançada que fornece informações precisas da densidade do lenho em intervalos micrométricos (Tomazello-Filho et al., 2008). Com isso, avaliações quanto aos anéis de crescimento, variação intra-anual e interanual dos anéis e perfil de densidade ao longo dos raios são facilitadas. Pesquisas avaliando a qualidade da madeira com a utilização de técnicas de alta precisão relacionada a densidade do lenho e interpretações por microdensitometria de raios-x vem sendo desenvolvidas (Gaitan-Alvarez et al., 2019; Amodei et al., 2021; Curvo et al., 2024). A caracterização detalhada e não destrutiva fornece dados de alta precisão sobre a variação ao longo do lenho, que contribui para a seleção eficiente de materiais genético e sítios para produção de madeira com qualidade satisfatória ao mercado (Tomazello-Filho et al., 2008; Gaitan-Alvarez et al., 2019; Boschetti et al., 2020). Assim, a ampliação dos estudos direcionados para espécies comerciais tropicais atende à necessidade do mercado por respostas rápidas.

Determinar densidade do lenho atrelada às características de crescimento da árvore, são importantes para definir a destinação do mercado de madeira sólida. Isso pois fatores como clima, solo, temperaturas, regime hídrico e práticas silviculturais afetam diretamente o crescimento radial e a formação do lenho, influenciando as propriedades tecnológicas do material (Pumijumnong et al., 2023). Dessa forma, compreender o comportamento da madeira como resposta às condições de crescimento permite apontar os limites de uso e recomendar aplicações mais adequadas para a espécie ou clone.

Ugulino et al. (2014), ao analisarem a resposta dos anéis de crescimento de *Tectona grandis* às condições climáticas da região Centro-Oeste do Brasil, identificaram que os anéis são mais largos, especialmente durante a fase juvenil da madeira, refletindo o rápido desenvolvimento da espécie. Constataram também uma significativa correlação positiva entre o crescimento da teca e a precipitação durante a estação seca, indicando sua sensibilidade às variações climáticas. Entretanto, os autores destacaram que seu estudo não realizou análises de regressão para quantificar e confirmar as correlações entre características do ambiente e o

crescimento da teca. Além disso, os autores reforçam que conhecer os fatores que afetam o crescimento da teca contribui para definir as melhores práticas silviculturais.

Martha et al., (2025) avaliando o efeito das modificações químicas e térmicas no perfil de densidade o lenho de *Tectona grandis* de curta rotação aos 13 anos, por tomografia computadorizada por raios X, observou que a densidade média da madeira *in natura* foi de 0,560 g/cm³. Os autores identificaram ainda no perfil de densidade que há uma tendência de aumento dos valores médios na direção da medula para a casca.

De forma semelhante, Curvo et al. (2024), investigando o lenho de *Tectona grandis* em diferentes idades, encontrou que o perfil de densidade, obtido por microdensitometria de raios-X, demonstrou tendência de aumento da densidade no sentido da medula para a casca independentemente das idades avaliadas. Os autores apontaram ainda que a idade de transição entre o lenho juvenil e o lenho adulto foi aproximadamente aos 11 anos.

Estendendo essa discussão para o comportamento da teca frente às mudanças climáticas, Carmo et al. (2024) estudaram as características da madeira de *Tectona grandis* aos 12 anos de idade durante eventos climáticos extremos na Amazônia, observando que a precipitação durante alguns meses do ano contribuiu para o aumento da densidade do lenho. Os autores ainda enfatizaram a importância de entender como as mudanças climáticas afetam o crescimento e o desenvolvimento das árvores.

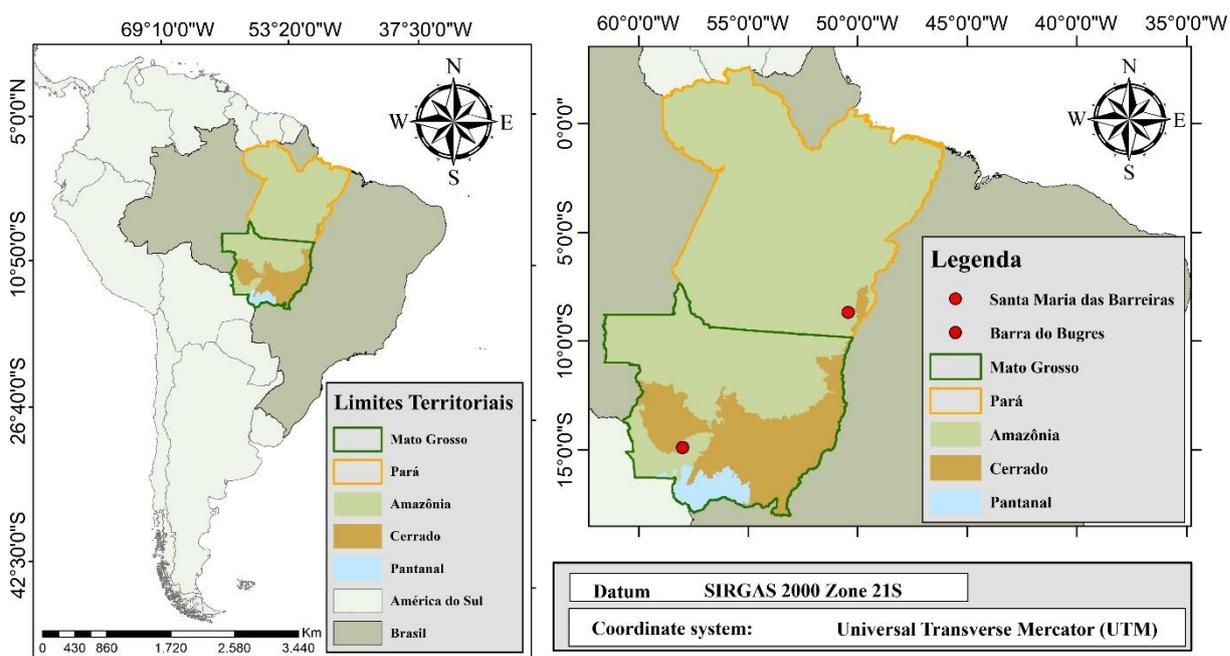
Avaliar os perfis de densidade do lenho de *Tectona grandis* considerando as características climáticas dos sítios, converge para o sugerido por Carmo et al. (2024), pois permite compreender o efeito do sítio sobre a formação do lenho, integrando informações climáticas na análise do crescimento das árvores. O incentivo a esses estudos contribui para a disponibilização de uma base científica para discussões quanto às práticas silviculturais adaptadas às mudanças climáticas. Quantificar os efeitos identificados entre as condições de crescimento e o lenho de *Tectona grandis*, como sugerido por Ugolino et al. (2014) também contribui para a otimização do crescimento das plantações de teca.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização dos sítios de estudo

Este estudo avaliou material clonal de *Tectona grandis* L. f. (Clone A), proveniente de plantações comerciais homogêneas pertencentes à Teak Resources Company (TRC localizadas nos municípios de Barra do Bugres, Mato Grosso (14°54'21.03" S, 57°59'35.86" W) e Santa Maria da Barreira, Pará (8°42'32.16" S, 50°25'47.57" W), Brasil (Figura 1). Em Barra do Bugres, Mato Grosso, o plantio foi instalado em outubro de 2008, com o corte realizado em julho de 2024 (~16 anos de idade). Já em Santa Maria da Barreira, Pará, o plantio foi efetuado em novembro de 2009 e o corte em junho de 2024 (~15 anos de idade).

Figura 1 - Mapa de localização dos sítios das plantações de *Tectona grandis* deste estudo, nos municípios de Barra do Bugres, Mato Grosso, e Santa Maria das Barreiras, Pará, Brasil



Os dois sítios estão localizados no bioma Amazônia, com formações florestais (Souza Júnior et al., 2020), e encontram-se dentro dos limites correspondentes à Amazônia Legal brasileira. Ao longo do trabalho, essas áreas são denominadas como sítios de Mato Grosso e do Pará.

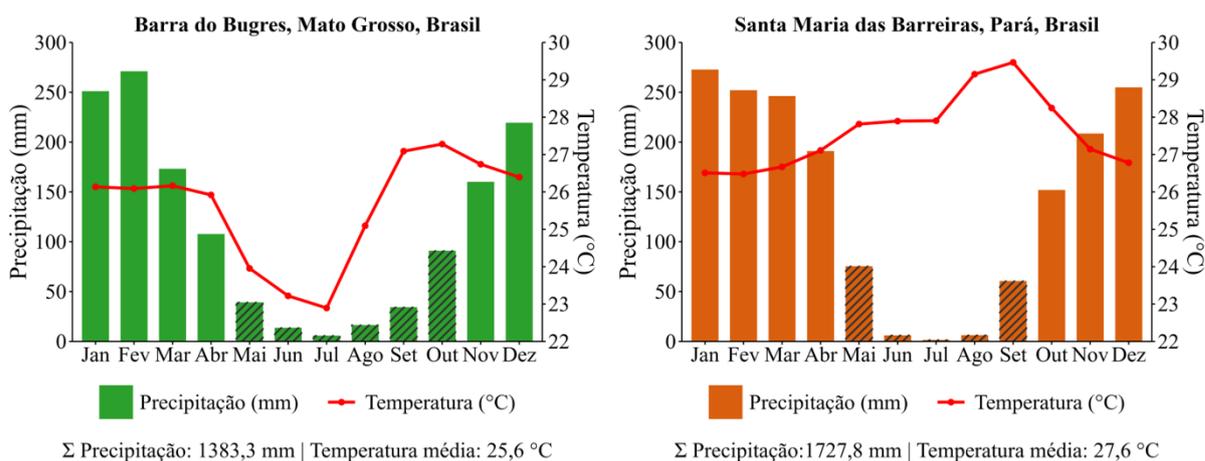
4.1.1 Condições climáticas dos sítios

Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o sítio de Barra do Bugres, Mato Grosso, apresenta clima Aw (tropical de savana), com estação seca bem definida. Já Santa Maria das Barreiras, Pará possui clima Am (monçônico tropical), situando-se na transição para o Aw (Beck et al., 2018).

Para caracterizar o clima das duas regiões, foi analisada uma série temporal de julho de 2004 a julho de 2024, correspondente aos 20 anos que antecederam o abate das árvores, correspondentes ao ano corrente (janeiro a dezembro). Os dados utilizados para as séries temporais foram obtidos em estações hidrometeorológicas localizadas nos municípios dos respectivos sítios, disponibilizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Já as informações do *Oceanic Niño Index* (ONI), utilizadas para identificar os eventos climáticos ocorrentes, foram extraídas da base de dados do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA).

A Figura 2 apresenta as médias mensais de precipitação e temperatura média no período de 2004 a 2024 (ANA). Para definir a estação seca, adotou-se o critério de precipitação inferior a 100 mm/mês (Restrepo et al, 2021), sendo que os meses secos estão hachurados na Figura 2.

Figura 2 – Climograma com médias mensais de precipitação (mm) e temperatura (°C), baseados na ANA, para os sítios de Mato Grosso e Pará, no período de 2004 a 2024



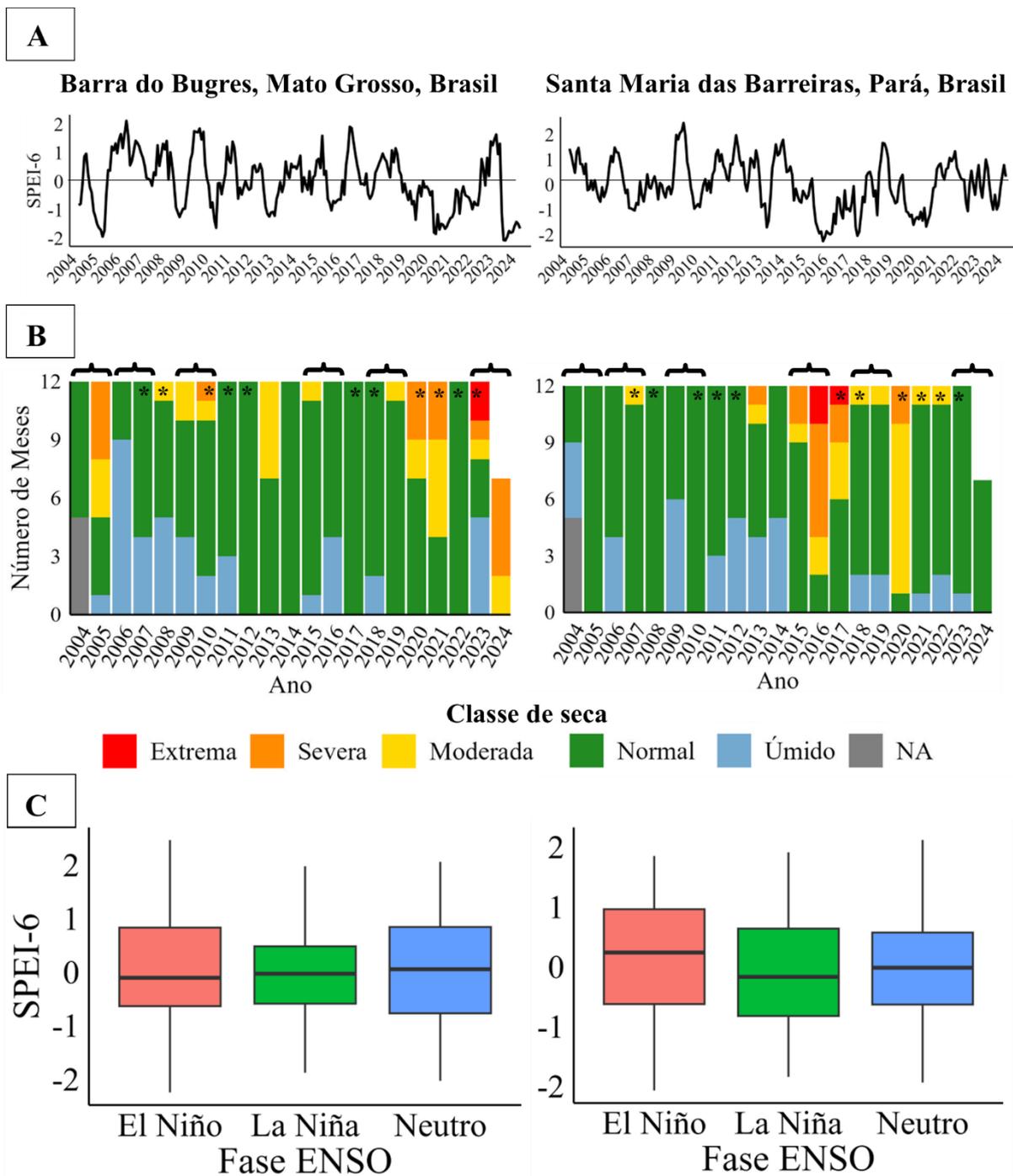
No sítio do Mato Grosso, observam-se duas estações bem definidas: um verão quente e muito chuvoso e um inverno com temperaturas amenas e clima predominantemente seco. A estação seca ocorre entre os meses de maio e outubro, sendo marcada pela elevação das temperaturas no final desse período, principalmente entre setembro e outubro. Já o sítio do Pará

apresenta clima mais quente e úmido, com temperaturas médias elevadas, com baixa amplitude térmica. Embora o período seco seja curto, ele é extremamente intenso, concentrando-se entre maio e setembro.

Os anos considerados como de seca severa foram 2010 (1.096 mm) para o sítio de Mato Grosso e, para o sítio do Pará, 2015 (1.305 mm) e 2023 (1.255 mm). Para essa classificação, consideraram-se os anos com precipitação anual total inferior ao percentil 10 da série histórica (Chipanshi et al., 2006; Zhang et al., 2019) entre 2004 e 2024. Esse limite foi de 1.137,9 mm para Mato Grosso e 1.305 mm para o sítio do Pará. Cabe destacar que os anos de 2004 e 2024 foram excluídos da análise, pois o intervalo adotado, julho de 2004 a julho de 2024, não contempla dados anuais completos para esses dois anos. Já a seca prolongada foi definida, neste estudo, como um período de seis meses consecutivos com precipitação inferior a 100 mm. Com base nesse critério, os anos de ocorrência de seca no sítio do Mato Grosso foram 2005, 2008, 2011, 2013, 2014, 2020 e 2023. No sítio do Pará, essa condição foi registrada nos anos de 2005, 2007, 2015, 2020, 2022 e 2023.

Para caracterizar a ocorrência e a severidade das secas ao longo do ano, utilizou-se o Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (SPEI), na escala de seis meses (SPEI-6) (Figura 3A). Esse índice permite avaliar a severidade dos eventos de seca, considerando sua duração e intensidade, além de identificar o início e o término dos episódios (Serrano et al., 2010). O SPEI foi calculado com base na série temporal do balanço hídrico, obtido a partir da estimativa da evapotranspiração potencial pelo método de Thornthwaite. Para identificar tendências de ocorrência de anos secos, bem como o grau de severidade da seca em cada período. Ainda é apresentada a distribuição das classes de seca ao longo do ano para os sítios do Mato Grosso e do Pará (Figura 3B), com base nos valores de SPEI-6 de cada sítio. Como a série histórica compreendida entre o plantio até o abate das árvores incluiu eventos de El Niño e La Niña, foi considerada a influência do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENSO), baseado no SPEI-6. Para isso, as suas fases (El Niño, La Niña e Neutralidade), foram identificadas, fornecendo subsídios para a previsibilidade sazonal de eventos extremos (Figura 3C).

Figura 3 – Série temporal do Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração, escala de seis meses (SPEI-6) (A), distribuição da classe de seca (B) e distribuição do SPEI-6 de acordo com as fases do El Niño-Oscilação Sul (ENSO) (C) para os sítios de Mato Grosso e Pará no período de 2004-2024



Legenda: Valores negativos indicam condições de seca, enquanto valores positivos indicam umidade acima da média, em que: $> 2,0$ (muito úmido), $1,5$ a $1,99$ (moderadamente úmido), $1,0$ a $1,49$ (levemente úmido), $-0,99$ a $0,99$ (normal), $-1,0$ a $-1,49$ (seca moderada), $-1,5$ a $-1,99$ (seca severa) e $\leq -2,0$ (seca extrema), de acordo com McKee et al. (1993). NA indica período de análise vazio. Os cinco primeiros meses da série não possuem valor (NA) devido à janela de cálculo de seis meses exigida pela metodologia do SPEI-6. {}: intervalo de ocorrência de El Niño; *: intervalo de ocorrência de La Niña.

Para avaliar se houve diferença significativa nas variações no SPEI-6 entre as fases ENSO, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) a 5 % de significância. Apesar de haver variações no SPEI-6, observadas nas médias com anos de El Niño, mais úmidos, e de La Niña, mais secos, elas não foram significativas (p -valor = 0,224). Isso indica que o SPEI-6 mensal, nos dois sítios avaliados, não se altera de forma consistente com as fases do ENSO, sugerindo que esse fenômeno não é o principal modulador da seca nos dois sítios avaliados. Assim, outros fatores climáticos regionais possuem influência dominante, como regime de precipitação específicos, insolação, flutuações térmicas e variações sazonais características do microclima que afetam o balanço hídrico local.

4.1.2 Condições edáficas dos sítios

De acordo com a classificação de solos disponível nos *shapefiles* públicos do IBGE, o solo do sítio de Mato Grosso é classificado como Nitossolo vermelho distrófico, enquanto o do Pará é um Argilossolo vermelho-amarelo distrófico. A Tabela 1 apresentam os resultados da análise química e granulométrica do solo dos dois sítios avaliados. As amostras foram coletadas anteriormente ao abate das árvores, a 50 cm do tronco, em quatro pontos ao redor de cada árvore, posicionados nos quadrantes cardeais (norte, sul, leste e oeste), nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm. Para cada profundidade, foi formada uma amostra composta por árvore e os valores apresentados correspondem às médias por sítio.

A análise textural indicou que o solo do sítio de Mato Grosso é argiloso, enquanto o do sítio do Pará foi classificado como argilo-arenoso (Tabela 2). Ressalta-se que essas eram as condições edáficas no momento do abate das árvores. Assim, esses dados não representam a série histórica dos sítios, pois o perfil químico do solo pode variar ao longo do tempo de acordo com manejo e condições ambientais. Apesar disso, é importante observar que essas alterações não são suficientes para modificar as características morfológicas do solo, ou ainda alterar sua classificação taxonômica em curto prazo. O sítio de Mato Grosso, com solo Nitossolo, tem como característica ser mais estruturado e profundo, contudo, o solo do sítio do Pará, do tipo Argilossolo apresentou textura argiloarenosa, que reflete em melhor condição física superficial, melhor drenagem e menos resistência à penetração radicular da planta (Vieira, 1988).

Tabela 1 – Atributos químicos e granulométricos do solo nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm nos dois sítios de plantio de *Tectona grandis* avaliados

Atributo do solo	Barra do Bugres, Mato Grosso		Santa Maria da Barreira, Pará	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
pH água	7,1 ^(0,2)	6,7 ^(0,2)	5,9 ^(0,4)	5,5 ^(0,3)
pH CaCl ₂	6,3 ^(0,2)	6,0 ^(0,2)	5,1 ^(0,4)	4,7 ^(0,3)
P (mg/dm ³)	57,5 ^(50,5)	29,7 ^(29,1)	2,9 ^(1,3)	1,8 ^(0,8)
K (mg/dm ³)	212,6 ^(53,6)	159,9 ^(43,2)	41,5 ^(9,9)	28,4 ^(11,2)
Ca cmol(c)/dm ³	13,3 ^(3,2)	9,5 ^(2,6)	4,0 ^(2,0)	2,2 ^(1,4)
Mg cmol(c)/dm ³	1,4 ^(0,2)	1,1 ^(0,2)	0,9 ^(0,3)	0,6 ^(0,2)
Al cmol(c)/dm ³	0,0 ^(0,0)	0,0 ^(0,0)	0,1 ^(0,1)	0,3 ^(0,2)
H cmol(c)/dm ³	2,8 ^(0,7)	3,3 ^(0,4)	5,1 ^(0,8)	4,8 ^(0,6)
MO (g/dm ³)	35,3 ^(2,9)	33,5 ^(3,2)	35,2 ^(2,8)	28,5 ^(5,5)
Zn (mg/dm ³)	11,5 ^(2,8)	8,4 ^(3,1)	1,5 ^(0,8)	0,7 ^(0,4)
Cu (mg/dm ³)	4,8 ^(1,6)	3,4 ^(1,1)	4,0 ^(1,3)	3,1 ^(0,8)
Fe (mg/dm ³)	71,7 ^(35,7)	101,2 ^(31,1)	173,4 ^(66,5)	137,4 ^(47,8)
Mn (mg/dm ³)	171,5 ^(52,6)	104,8 ^(36,4)	123,4 ^(39,3)	86,8 ^(42,7)
S (mg/dm ³)	3,7 ^(1,0)	4,2 ^(0,9)	5,9 ^(1,1)	7,2 ^(1,4)
B (mg/dm ³)	0,5 ^(0,1)	0,3 ^(0,1)	0,3 ^(0,1)	0,2 ^(0,1)
SB cmolc/dm ³	15,2 ^(3,3)	11,0 ^(2,7)	5,0 ^(2,2)	2,8 ^(1,5)
CTC cmolc/dm ³	18,0 ^(2,7)	14,3 ^(2,4)	10,2 ^(1,7)	8,0 ^(1,6)
V (%)	83,7 ^(6,0)	75,9 ^(7,0)	47,80 ^(13,7)	34,1 ^(11,0)
Areia (g/kg)	271,3 ^(28,9)		443,08 ^(32,1)	
Silte (g/kg)	236,0 ^(0,5)		121,83 ^(6,4)	
Argila (g/kg)	492,7 ^(29,4)		435,08 ^(25,7)	

Legenda: Fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio trocável (Al), acidez potencial (H), matéria orgânica (MO), zinco (Zn), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), enxofre (S), boro (B), pH (em água), pH (em CaCl₂), Soma de Bases Catiônicas (SB), Capacidade de Troca de Cátions (CTC) e Saturação por Bases (V). As análises foram realizadas em laboratório especializado, adotando a metodologia da EMBRAPA.

4.1.3 Condições de crescimento, intervenções silviculturais e seleção das árvores

A escolha das plantações de teca entre 15 e 16 anos para o estudo foi feita com base no critério de que, nessas idades, a empresa que forneceu os materiais analisados possuía plantações com o mesmo material genético e espaçamento, em sítios distintos, que haviam passado por tratamentos silviculturais semelhantes. Além disso, nessa fase de desenvolvimento, já é possível obter madeira comercializável, o que permite avaliar as características do lenho em uma etapa intermediária, representando uma transição entre o crescimento juvenil e o início da maturação da árvore. Essa escolha foi estratégica para controlar variáveis que poderiam

interferir nas propriedades do lenho e possibilitar a análise de madeira com potencial para uso comercial.

O plantio foi realizado em outubro de 2008 no sítio de Barra do Bugres, Mato Grosso, e em novembro de 2009 no sítio de Santa Maria das Barreiras, Pará, adotando espaçamento de 4 x 4 m. Não houve mortalidade significativa que exigisse replantio. Em Mato Grosso, houve adubação de plantio e de cobertura nos anos de 2009 (NPK 08-44-00, 39 kg/ha) e 2016 (MAP, 250 kg/ha). No Pará, anteriormente ao plantio das mudas, foi realizada uma gradagem intermediária e calagem. Houve ainda adubação de cobertura em 2014 (NPK 06-42-00 + B + Zn, 297 kg/ha).

Realizaram-se desbrota, controle de formigas e desrama semimecanizada (Tabela 2). A desrama ocorreu até a altura de 6 metros, buscando potencializar a viabilidade econômica produzindo as toras iniciais (primeira e segunda tora comercial) com menor incidência de nós. A frequência da desrama foi definida pela empresa responsável e executada conforme a identificação da necessidade (Tabela 2).

Tabela 2 – Anos de ocorrência das intervenções silviculturais nos sítios de Mato Grosso e Pará

Atividade	Sítio	
	Mato Grosso	Pará
Desbrota	2009	2011
Combate a formigas	2008, 2009, 2010, 2012 e 2016	2010, 2011, 2012 e 2013
Desrama	2009, 2012, 2016, 2018 e 2020	2012 e 2013

A plantação de Mato Grosso passou por desbaste seletivo em 2016 (remanescente de 417 árvores/ha) e 2018 (remanescente de 250 árvores/ha). No Pará, houve desbaste seletivo em 2015 (remanescente de 417 árvores/ha) e 2017 (remanescente de 347 árvores/ha) e sistemático em 2021 (remanescente de 250 árvores/ha).

A partir de informações fornecidas pela empresa, identificaram-se, em ambos os sítios, doenças como cancro, mela, podridão de raiz e a presença do fungo *Ceratocystis*. Contudo, essas ocorrências não comprometeram as plantações, mantendo-se abaixo de 5% no sítio de Mato Grosso e de 2,5% no sítio do Pará.

Com base no inventário florestal da empresa responsável, realizou-se a classificação diamétrica das árvores de cada sítio (Tabela 3), a fim de coletar indivíduos que representassem todas as classes. Foram amostradas aleatoriamente nove árvores em cada sítio, sendo três para

cada classe diamétrica. Na seleção em campo, descartaram-se árvores com defeitos aparentes, como tortuosidade acentuada, bifurcação, ocos ou ataque de pragas e doenças. As informações dendrométricas das árvores avaliadas no trabalho dos dois sítios são apresentadas nas Tabela 3.

Tabela 3 - Informações dendrométricas das árvores de *Tectona grandis* amostradas nos sítios

Sítio	Classe diamétrica (cm)	DAP médio (cm)	HC (m)	HT (m)
Barra do Bugres, Mato Grosso	25,9 – 34,0	28,3 ^(2,85)	10,8 ^(1,2)	18,8 ^(1,9)
	34,1 – 42,0	40,2 ^(2,50)	17,1 ^(1,7)	23,4 ^(1,2)
	42,1 – 51,5	45,2 ^(1,13)	12,8 ^(2,4)	24,1 ^(0,5)
Santa Maria da Barreira, Pará	27,8 – 33,8	32,2 ^(0,93)	11,0 ^(0,7)	22,8 ^(1,5)
	33,9 – 39,9	36,7 ^(1,87)	12,5 ^(1,0)	23,1 ^(1,5)
	40,0 – 49,9	40,6 ^(0,19)	12,4 ^(0,6)	23,2 ^(1,4)

Legenda: (...) Desvio Padrão; DAP: Diâmetro à Altura do Peito; HC: Altura Comercial; HT: Altura Total.

A Tabela 4 apresenta os valores médios das características das árvores amostradas nos dois sítios. Os valores incluem o volume médio de madeira produzido em cada árvore considerando da base (0,1 m) até a altura 8,1 m, que corresponde a terceira tora comercial, calculado por meio da cubagem rigorosa pelo método de Smalian.

Tabela 4 - Valores médios das árvores de *Tectona grandis* amostradas nos sítios

Valor médio	Barra do Bugres, Mato Grosso	Santa Maria da Barreira, Pará
DAP (cm)	37,9 ^(8,7)	36,5 ^(4,2)
HC (m)	13,6 ^(3,2)	12 ^(0,8)
HT(m)	22,1 ^(2,9)	23 ^(0,2)
Volume por árvore (m ³)	0,535 ^(0,082)	0,507 ^(0,050)

Legenda: (...) Desvio Padrão; DAP: Diâmetro à Altura do Peito; HC: Altura Comercial; HT: Altura Total.

4.2 Preparo de amostras e microdensitometria de raios x

De cada árvore foram retirados discos nas alturas de 0,1 m (base), 2,7 m, 5,4 m e 8,1 m, correspondentes ao início e ao final das três primeiras toras comerciais (Figura 4A). A direção norte foi identificada em cada árvore para padronizar a análise de microdensitometria de raio-

x no sentido norte-sul, uma vez que a exposição desigual à luz, temperatura e umidade conforme a orientação cardeal pode influenciar as propriedades do lenho.

Figura 4 - Etapas do procedimento metodológico para as análises de microdensitometria de raios-x no lenho de *Tectona grandis*



De cada disco, retirou-se uma amostra diametral (casca-medula-casca) de 2 cm de largura, na direção norte-sul (Figura 4B-I), posteriormente seccionada em duas metades radiais, da medula até a casca. Nas amostras da altura 0,1 m, realizou-se uma caracterização macroscópica simplificada na seção transversal, abrangendo a diferenciação entre cerne e alburno, a distinção entre as camadas de crescimento, o tipo de porosidade e a presença de parênquima axial marginal. Para essa análise, as superfícies das amostras lixadas com lixa de granulometria 40 e 80.

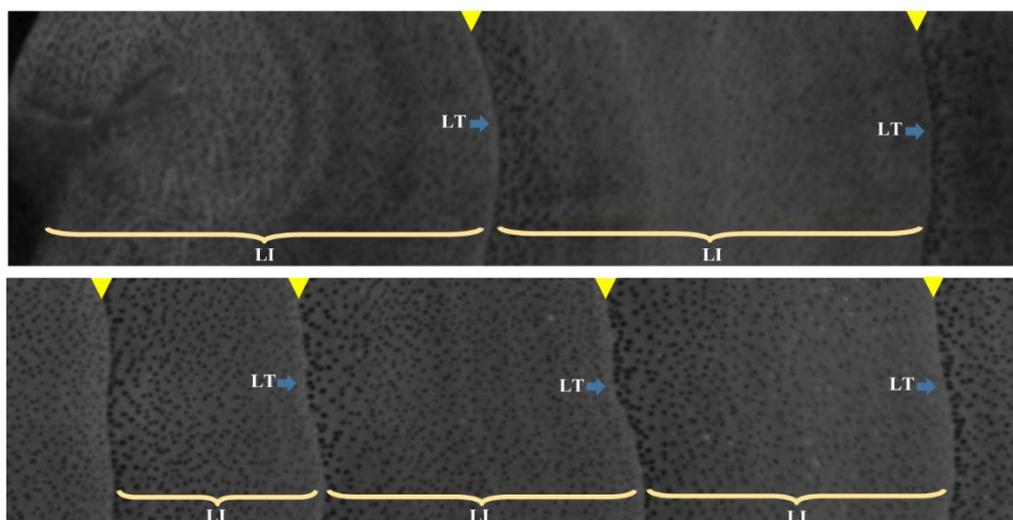
As amostras das duas seções radiais foram coladas em suporte de madeira, com orientação perpendicular dos elementos de vasos e das fibras em relação à linha de corte. Posteriormente, o material foi seccionado, na direção transversal, em dupla serra circular paralela, obtendo corpos de prova de ~1,2 mm de espessura (Figura 4B-II). Em seguida, as amostras foram levadas para câmara de climatização (20° C e 65% UR), onde permanecerem por 24 horas, até atingirem a umidade de equilíbrio higroscópico (~12% de umidade).

A caracterização dos anéis de crescimento e o perfil de densidade aparente do lenho de *Tectona grandis* foi realizada pela aplicação da técnica de microdensitometria de raio-x, realizada na seção transversal (Tomazello Filho et al., 2008; Jacquin et al., 2017; Gaitan-Alvarez et al., 2019; Amodei et al., 2021). As amostras, juntamente com a escala de acetato de celulose, foram inseridas no equipamento Faxitron X-ray modelo LX-60 (Figura 4B-III), previamente calibrado para obtenção das radiografias. Foi realizada então a irradiação de raios-x, expondo as amostras por 15 segundos em tensão elétrica de 30 kV, com exposição à radiação por um tempo prolongado de 5000 milissegundos (*extended exposure* de 5000 ms).

As imagens foram processadas e fixadas em escala de cinza pelo *software* ImageJ. Devido ao princípio de atenuação dos raios x, nesse tipo de análise, as estruturas de menor densidade são representadas por zonas mais escuras e maior densidade com representação mais clara. A escala de acetato de celulose que acompanhou a radiografia das amostras apresentava nove níveis de densidade previamente conhecidos para a calibração do *software* WinDendro™ (Regent Instruments Inc.). Foram obtidas as informações de densidade aparente em intervalos de 50 µm.

A partir das radiografias, foram determinadas a largura dos anéis de crescimento, largura e densidade do lenho inicial e lenho tardio e a densidade do lenho por anel de crescimento. Na delimitação dos anéis também foi utilizada a visualização dos poros do lenho inicial, o parênquima marginal no início da estação de crescimento e zonas fibrosas no final da estação de crescimento (Cardoso et al. 2015). Para distinguir as regiões de lenho inicial e tardio foi utilizada a distinção visual, avaliando as variações no diâmetro e frequência dos poros (Figura 5). Na radiografia, tonalidades mais claras indicam tecidos de maior densidade.

Figura 5. Demonstração visual do lenho inicial e tardio ao longo do anel de crescimento



Legenda: Triângulo amarelo: demarcação das camadas de crescimento; chave bege: indicação de lenho inicial (LI); seta azul indica o início do lenho tardio (LT).

Para a obtenção do perfil de densidade aparente do lenho, foram elaborados gráficos a partir das seções transversais, utilizando-se dados isentos de *outliers*. A árvore selecionada para representar os perfis de densidade de cada sítio foi aquela cujos valores de densidade mais se aproximaram dos valores médios de cada seção.

4.3 Análise estatística

O trabalho foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial duplo (2 locais x 4 alturas), com nove repetições (árvores). As análises estatísticas de largura dos anéis de crescimento, densidade do lenho, largura e densidade do lenho inicial e tardio incluíram o teste de Shapiro-Wilk para avaliar a normalidade dos dados e seus resíduos e o teste de Bartlett para testar a homogeneidade da variância. As análises estatísticas foram realizadas no *software* RStudio (R CORE TEAM, 2023).

4.3.1 Análise da largura dos anéis de crescimento

Inicialmente, os dados foram interpretados por meio de estatísticas descritivas, com base nos valores médios da largura dos anéis de crescimento, calculados a partir das duas seções radiais de cada disco. Essa média foi utilizada para comparar a largura dos anéis em função da idade cambial e do sítio, em cada altura avaliada.

Em seguida, a variação da largura dos anéis de crescimento foi avaliada por meio de Modelos Lineares de Efeitos Mistos (LMM), a 5% de significância, respeitando a estrutura hierárquica dos dados. O modelo incluiu como efeitos fixos a idade cambial, a altura e o local, e suas interações, e as árvores foram consideradas como efeito aleatório. A interação entre local e altura não foi incluída no modelo por não ser relevante para os objetivos do trabalho. O modelo LMM foi ajustado com todas as interações possíveis, porém como a interação tripla não foi significativa ($p\text{-valor} \geq 0,05$), optou-se por simplificar o modelo, mantendo apenas as interações entre duas variáveis, conforme Equação 1.

$$RW_{ijkl} = \mu + Local_i + Altura_j + Idade\ Cambial_k + (Local \times Idade\ Cambial)_{ik} + (Altura \times Idade\ Cambial)_{jk} + (1|Árvore_l) + \varepsilon_{ijkl} \quad (1)$$

Onde:

μ = média geral, correspondendo ao intercepto do modelo;

$Local_i$ = efeito fixo do local;

$Altura_j$ = efeito fixo da altura;

$Idade\ Cambial_k$ = efeito fixo da idade cambial;

$(Local \times Idade\ Cambial)_{ik}$ = efeito da interação entre local e idade cambial;

$(Altura \times Idade\ Cambial)_{jk}$ = efeito da interação entre altura e idade cambial;

$(1|Árvore_l)$ = efeito aleatório da árvore;

ε_{ijkl} = erro residual.

Após o ajuste do modelo linear de efeitos mistos, foi ajustado o modelo de regressão quadrático para os fatores significativos. Adotou-se a regressão quadrática para todos os níveis avaliados, arbitrariamente, considerando que o crescimento vegetal é frequentemente descrito por polinômios de segunda ordem.

4.3.2 Análise dos lenhos inicial e tardio

Para avaliar a largura e densidade do lenho inicial e lenho tardio, foram utilizadas estatísticas descritivas (média e desvio padrão), com avaliação dos fatores por um modelo fatorial 2x4. Utilizou-se duas variáveis independentes (local e altura) e suas interações, avaliando cada parâmetro individualmente. Avaliou-se ainda a distribuição percentual do lenho inicial e lenho tardio ao longo do anel. Realizou-se ainda análise de variância (ANOVA) ao nível de 5% de significância efeitos de Local e Altura, juntamente com o teste t de Student a 5% de significância para amostras emparelhadas. As variáveis em que o fator altura foi significativo pelo teste da ANOVA, realizou-se a comparação das médias ajustadas, ao nível de 5% de significância pelo método de comparações múltiplas de Tukey.

Para compreender a variação radial da largura e densidade do lenho inicial e tardio, os dados foram avaliados por meio de estatísticas descritivas, obtido a partir das duas seções radiais de cada disco. Essas análises foram realizadas considerando as médias por anel de crescimento, em cada idade cambial e altura.

A distribuição de lenho inicial e tardio foi determinada por anel de crescimento, em cada altura, considerando a largura total do anel (100%) e o percentual ocupada o por cada tipo de lenho.

4.3.3 Análise da densidade aparente do lenho

Os dados foram interpretados por estatísticas descritivas, baseadas nos valores médios, calculados a partir das duas seções radiais de cada disco. Essa média foi utilizada para comparar a densidade do lenho dos anéis em função da idade cambial e do sítio, em cada altura avaliada.

A variação radial da densidade aparente do lenho foi avaliada por modelos lineares de efeitos mistos (LMM), considerando idade cambial, altura, local e suas interações como efeitos fixos, e as árvores (repetições) como efeito aleatório, a nível de significância de 5%, conforme expressado na Eq. 2.

$$\rho_{ijk} = \mu + Local_i \times Idade\ Cambial_j \times Altura_k + (1|Árvore_l) + \varepsilon_{ijkl} \quad (2)$$

Onde:

μ = média geral, correspondendo ao intercepto do modelo;

$Local_i$ = efeito fixo do local;

$Altura_j$ = efeito fixo da altura;

$Idade\ Cambial_k$ = efeito fixo da idade cambial;

* = Efeito de todas as interações possíveis entre os fatores avaliados;

$(Altura \times Idade\ Cambial)_{jk}$ = efeito da interação entre altura e idade cambial;

$(1|Árvore_l)$ = efeito aleatório da árvore;

ε_{ijkl} = erro residual.

Foram ajustados modelos de regressão quadrático para os fatores e interações significativas, considerando as diferentes alturas avaliadas e os dois sítios avaliados.

Para avaliar a variação longitudinal da densidade aparente foi realizado em esquema modelo fatorial 2x4 (2 sítios x 4 alturas), adotando-se o valor de densidade aparente ponderada pela seção. Para obter o valor de densidade aparente por seção, correspondente a cada altura, calculou-se a densidade ponderada pela área da seção transversal de cada anel. (Eq. 3).

$$\rho_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{ij} \times A_{ij}}{\sum_{i=1}^n A_{ij}} \quad (3)$$

Onde:

ρ_{ij} = Densidade ponderada do anel i na altura j ;

D_{ij} = Densidade média linear do anel i na altura j ;

A_{ij} = Área da seção transversal do anel i na altura j .

No modelo fatorial duplo, considerou-se duas variáveis independentes e suas interações de forma sistemática, utilizando as árvores como repetições. Esse modelo foi adotado para testar os efeitos principais dos dois sítios (Mato Grosso e Pará), das quatro alturas (0,1m, 2,7m, 5,4m

e 8,1m) e suas interações. Após a análise de variância (ANOVA), aplicou-se o teste de Tukey a 5 % de significância.

O mapa de densidade aparente da árvore por sítio, utilizado para avaliação da variação da densidade nos sentidos radial e longitudinal, foi gerado com o software Surfer® (Golden Software, versão 29.1.267, 2025). Os dados correspondiam aos valores médios de densidade do por anel de crescimento. Para a interpolação dos valores, foi utilizado o método Krigagem Ordinária (Ordinary Kriging).

4.3.4 Análise da relação entre largura do anel e densidade do lenho

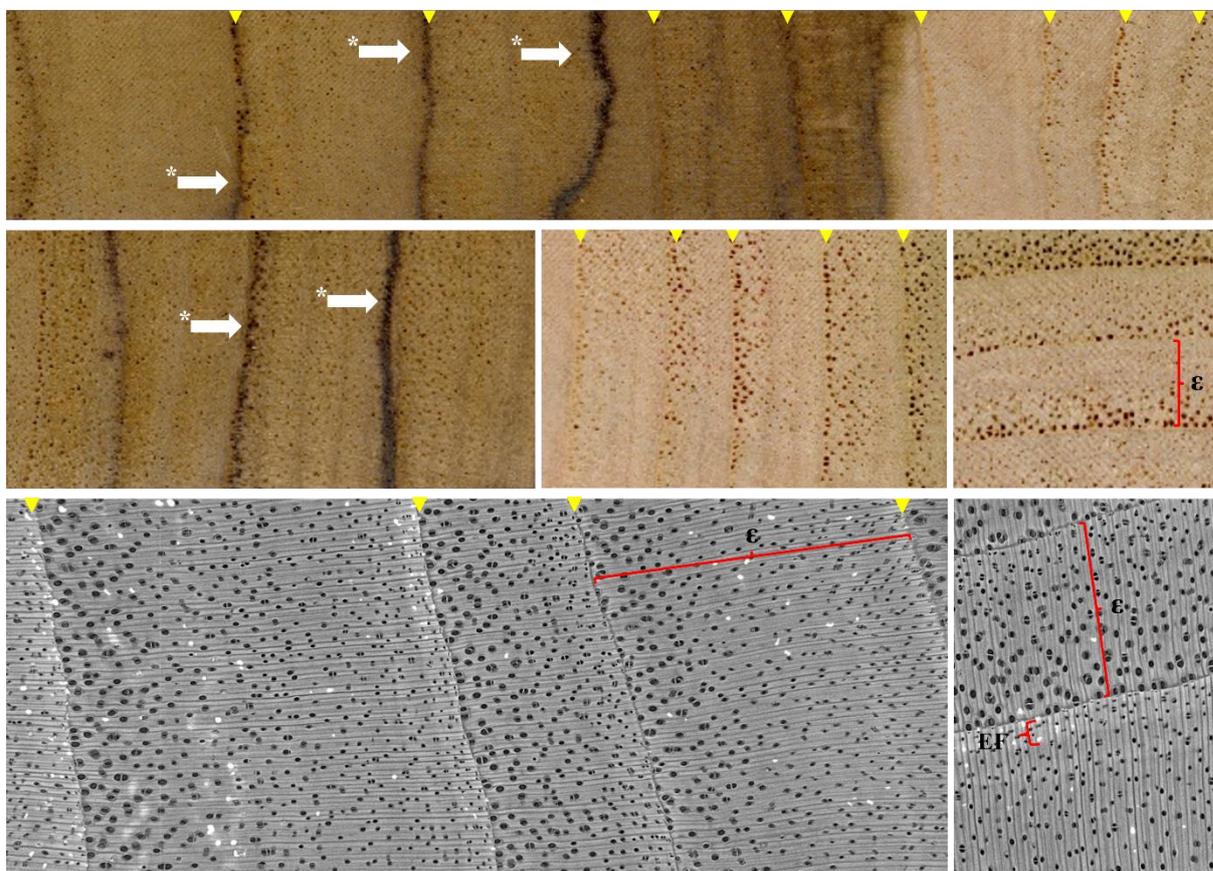
Para entender a relação entre a largura dos anéis de crescimento e a densidade do lenho, foi estabelecido um modelo linear, considerando a largura do anel em função da densidade. Adicionalmente, foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson. De acordo com o modelo, os valores foram representados graficamente em função da idade cambial.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização macroscópica do lenho de *Tectona grandis*

O lenho teca apresentou uma variação de cor acentuada entre as regiões de cerne e albarno (Figura 6), conforme já destacado em trabalhos anteriores (Cardoso et al. 2015; Lima et al., 2021). O albarno possui coloração clara, amarelada ou acinzentada, e cerne varia de marrom-claro a marrom (Moya et al., 2014; Sreekumar e Sanil 2021).

Figura 6 - Imagens macroscópicas do lenho de *Tectona grandis*



Legenda: *Seta branca: presença de listras negras; Triângulo amarelo: demarcação das camadas de crescimento; ε: anel de crescimento com porosidade do tipo anéis semiporosos; EF: espessamento das fibras.

Independentemente da posição longitudinal e do sítio, foram verificadas a presença de listras negras irregulares na região do cerne (Figura 6). Elas tendiam a acompanhar os anéis anuais, mas apresentavam leve deslocamento em relação aos seus limites (Figura 6). Essas listras já foram observadas no lenho de teca (Lukmandaru et al., 2008; Moya et al., 2014).

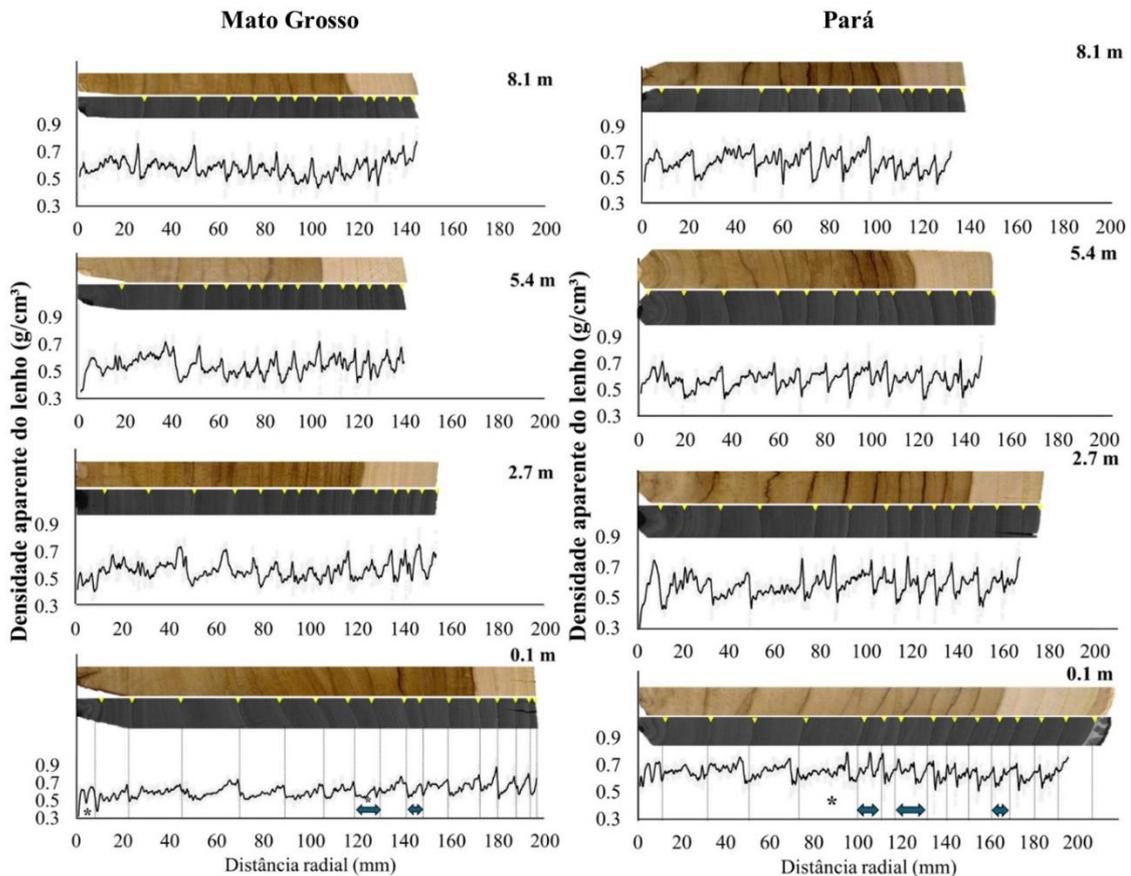
O lenho de teca, independentemente do sítio, apresentou anéis de crescimento anuais muito distintos (Figura 6). Observou-se anéis semiporosos, com vasos mais frequentes e com maior diâmetro no início da estação de crescimento. Além disso, é visível uma redução gradativa na frequência e diâmetro dos vasos em direção ao final da estação de crescimento. O lenho tardio apresentou maior proporção de fibras com paredes mais espessas (Figura 6) e menor área ocupada pelos elementos de vasos. Essas são características frequentes no lenho de teca, amplamente observadas (Ugulino et al., 2014; Segura et al., 2020; Figueiredo, 2021; Lima et al., 2021; Sreekumar e Sanil, 2021; Bahtiar et al., 2023; Silva, 2024).

O parênquima axial marginal (Figura 6) também facilitou na demarcação dos anéis. Outro facilitador da demarcação dos anéis de crescimento foi a presença zonas fibrosas no lenho tardio. A demarcação dos anéis de crescimento pelo auxílio do parênquima marginal é uma característica marcante na literatura do lenho de teca (Ugulino et al., 2014; Cardoso et al., 2015; Sreekumar e Sanil, 2021).

5.2 Perfil de densidade aparente do lenho de *Tectona grandis*

Nas regiões mais externas do lenho, os anéis de crescimentos são mais estreitos (Figura 7), o que refletiu em maior homogeneidade, ou seja, menor variação da densidade. Também foi observado para esses anéis, maiores valores de densidade média nas alturas 0,1 m e 2,7 m, que correspondem à primeira tora comercial. Esse comportamento é esperado para madeira de rápido crescimento (Figueiredo, 2021; Silva, 2024), porque a redução da largura dos anéis é atrelada à redução na taxa de crescimento à medida que a árvore envelhece (Camel e Galeano, 2021; Wirabuana et al. 2022). Além disso, os maiores valores de densidade nas regiões mais externas do lenho da base da árvore podem ser atribuídos ao início da formação de lenho adulto (Curvo et al., 2024).

Figura 7. Perfil radial da densidade aparente do lenho de *Tectona grandis* proveniente de Barra do Bugres, Mato Grosso e Santa Maria da Barreira, Pará, em diferentes posições longitudinais, obtido por microdensitometria de raios-x



Legenda: Triângulo amarelo: demarcação das camadas de crescimento; Setas azuis representam os anos em que ocorreu desbaste. *Ano de adubação. Sombra cinza nos gráficos representam a distribuição dos dados. Triângulos amarelos demarcam a finalização do anel.

Na análise da variação intra-anual do lenho (Figura 7), são percebidas zonas de menor e maior densidade, em todas as posições longitudinais. Essa variação deve-se às diferenças nas estruturas dos lenhos inicial e tardio, uma vez que alterações bruscas no ambiente regulam a atividade cambial (Micco et al., 2016). Na teca, essas alterações são percebidas na distribuição dos elementos anatômicas (Gaitan-Alvarez et al. 2019; Buajan et al. 2023). Vasos maiores e mais frequentes no lenho inicial, que diminuem até o final da estação, causam variação de densidade ao longo do anel (Cardoso et al., 2015; Gaitan-Alvarez et al. 2019). Desse modo, no início do anel de crescimento há maior atividade cambial e produção de lenho com menor densidade, e com a atividade cambial reduzida, no final do anel de crescimento, o lenho é de maior densidade (Worbes, 2010; Gaitan-Alvarez et al. 2019). Esses picos são percebidos na finalização de cada anel de crescimento (Figura 7).

As variações de densidade do lenho refletem respostas fisiológicas a estresses do desenvolvimento, como o crescimento da nova folhagem e o aumento da demanda por água no início da estação, após a desfolha natural da teca (Dié et al., 2012). Essa variação intra-anual ocorre pela atividade cambial estar associada à precipitação pluviométrica mensal (Dié et al., 2012; Buajan et al. 2023), influenciando a formação do lenho ao longo da estação de crescimento. Desse modo, dentro de um mesmo ano de crescimento, as flutuações na precipitação refletem em pequenas zonas de variação da densidade intra-anual. Como houve variações pluviométricas (Figura 2) nas duas localidades, típicas de regiões de clima de savana tropical com inverso seco, durante o crescimento das árvores, as variações intra-aneais ocorridas são esperadas.

De forma geral, os dois primeiros anéis de crescimento do lenho de teca podem ser considerados pouco distintos. Para demarcação deles, foi necessário fazer uma avaliação macroscópica das amostras. Essa baixa distinção dos anéis iniciais em árvores de rápido crescimento deve-se às altas taxas de crescimento nos primeiros anos. Gaitan-Alvarez et al. (2019), avaliando o perfil de densidade de *Tectona grandis* em diversas idades, também identificaram dificuldade para delimitar os primeiros anéis de crescimento em árvores jovens. Silva (2024), avaliando lenho de teca de 22-23 anos de diferentes locais, também registrou tal dificuldade.

A densidade do lenho apresentou valores elevados nos dois primeiros anéis de crescimento para os dois sítios (Figura 7), independentemente da posição longitudinal, o que pode ser atribuído ao crescimento inicial instável. Esse tipo de crescimento resulta em picos de densidade dentro de um mesmo anel de crescimento (Gaitan-Alvarez et al. 2019), refletindo em densidade média do anel mais alta. Posteriormente, observa-se uma redução sutil na densidade, entre o 4º e 6º anel de crescimento, a depender da altura avaliada, seguida por uma estabilização com baixa amplitude de variação. Esse comportamento é mais acentuado no material proveniente de Mato Grosso, por apresentar maior variação radial na densidade. Nos últimos anéis de crescimento, observou-se que há um aumento gradual da densidade.

Comportamento similar foi observado por Silva (2024), ao apresentar o perfil de densidade do lenho de *Tectona grandis* aos 22-23 anos, e por Curvo et al. (2024) avaliando o lenho de teca de 5, 10, 15 e 20 anos. Os autores observaram tendência de estabilização na densidade, seguida por um aumento nos anéis mais próximos à casca, além de menor variação nessa região. Isso ocorre porque, com a idade cambial, o crescimento diamétrico desacelera

(Wirabuana et al., 2022), formando anéis mais estreitos, com maior proporção de lenho tardio e menor variação de densidade.

Segundo a classificação proposta por Gaitan-Alvarez et al. (2019), os três primeiros anéis apresentaram crescimento instável em todas as posições longitudinais, com 2 a 3 picos de densidade por anel, independentemente do sítio. Apenas na altura de 8,1 m esse padrão se restringiu aos dois primeiros anéis. A partir do 4º anel, o crescimento torna-se estável, com aumento contínuo da densidade ao longo do anel. A formação desses picos de densidade ao longo do anel gera zonas de transição de densidade abruptas, com distribuição de tensões internas desbalanceadas (Battipaglia et al., 2016; Coneglian et al., 2017). Esse comportamento pode resultar em menor homogeneidade das propriedades mecânicas e ainda em lenho mais susceptível a defeitos durante o processo de secagem, como empenamento e rachaduras internas e superficiais.

De forma geral, a densidade do lenho das árvores de teca plantadas em Mato Grosso (Figura 7), manteve-se estável entre o 5º e o 8º anéis de crescimento, com aumento a partir do 9º, indicando maior homogeneidade nos anéis próximos à casca. Nas alturas de 5,4 m e 8,1 m (3ª tora comercial), houve redução da densidade. Isso sugere que as duas primeiras toras, além de apresentarem maiores diâmetros devido ao afinamento natural das árvores (Mascarenhas et al., 2021; Rocha et al., 2022), possuem maior densidade, o que pode agregar valor ao produto final.

No lenho do Pará (Figura 7), a densidade manteve-se estável entre o 5º e o 10º anéis de crescimento, aproximadamente. Nas alturas de 0,1 m e 2,7 m (1ª tora comercial), observou-se aumento de densidade nos três últimos anéis. Já em 5,4 m e 8,1 m, a densidade permaneceu no mesmo intervalo observado a partir do 5º anel, resultando em baixa variação nos seis anéis finais, próximos à casca. Dessa forma, a primeira tora comercial apresentaria maior densidade e diâmetro, indicando maior valor agregado, enquanto a segunda e terceira toras mostraram padrões semelhantes, com menor densidade, porém maior homogeneidade entre os anéis. Curvo et al. (2024), avaliando o lenho de teca com idades variadas, reforçaram o maior valor agregado das primeiras toras comerciais, atrelado aos maiores diâmetro, percentual de cerne e proporção de lenho adulta.

A teca possui anéis semiporosos, que apresentam uma distribuição mais uniforme dos poros ao longo do anel (Figura 6), quando comparado ao lenho com porosidade em anel (Zobel e Buijtenen, 1989). Essa característica provoca uma variação intra-anual da densidade, que aumenta gradualmente. Isso ocorre porque os vasos maiores e mais frequentes estão no início

do anel e vão diminuindo em tamanho e quantidade, aumentando a proporção de tecido lenhoso e, conseqüentemente, a densidade no lenho tardio (Figura 7). Amodei et al. (2021) confirmou esse padrão em lenho jovem de teca.

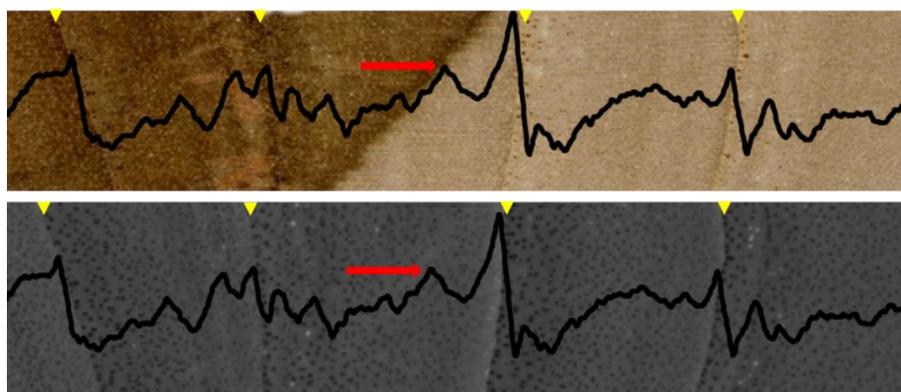
Em ambos os sítios, observou-se variação na densidade dos anéis de crescimento referentes aos anos 2015 e 2016, com padrão de crescimento instável. Nesses anos, houve desbastes nas plantações, concomitantes a ocorrência do fenômeno *El Niño*, que afetou a região Norte e Centro-Oestes do Brasil com intensificação da seca e ocorrência de altas temperaturas (Carmo et al., 2024). A técnica de desbaste geralmente promove o crescimento das árvores ao reduzir a competição entre elas, evidenciado pelo alargamento dos anéis de crescimento. No entanto, esse padrão foi pouco expressivo nas plantações avaliadas em Mato Grosso e Pará, nos desbastes realizados entre 2015 e 2016, possivelmente devido à ocorrência simultânea do *El Niño*. Estudos descrevem que o *El Niño* de 2015/2016 impactou significativamente as plantações de *Tectona grandis* na região amazônica, afetando a duração da estação de crescimento, que reflete nos picos e vales intra-anuais e na diminuição da largura dos anéis (Carmo et al., 2022; Carmo et al., 2024).

Outro padrão observado foi o aumento na largura do anel de crescimento no ano do desbaste e nos anos imediatamente seguintes (Figura 7). Isso ocorre porque a teca responde bem às práticas silviculturais, que estimulam o desenvolvimento das árvores em plantações florestais, resultando em maior crescimento secundário e anéis mais largos (Budiadi et al., 2017; Figueiredo, 2021; Seta et al., 2021; Chelliah et al., 2021). Essas alterações podem gerar picos e vales dentro do anel de crescimento, causando variação intra-anual na densidade (Carmo et al., 2022). Contudo, quanto à adubação, não foi possível isolar seu efeito no crescimento do ano corrente, pois coincidiu com intervenções de desbaste no mesmo ano ou em anos adjacentes. A variação no espaçamento entre anéis sucessivos está relacionada às condições ambientais que afetam a xilogênese (Bahtiar et al., 2023). Assim, os fenômenos de divisão celular e a taxa de diferenciação do compõem a atividade cambial, que são sensíveis à disponibilidade hídrica e às técnicas silviculturais (Buajan et al., 2023; Bahtiar et al., 2023).

Não foi possível estabelecer um critério para delimitar a transição cerne-alburno por meio da microdensitometria de raio-x. A técnica não se mostra eficiente para identificar o limite entre cerne e alburno. Quando a transição entre essas regiões ocorre dentro de um mesmo anel de crescimento (seta vermelha – Figura 8), observa-se uma redução sutil na densidade no limite entre cerne e alburno. No entanto, é comum essa transição coincidir com o fim de um anel e o início de outro, situação em que a variação de densidade provocada pela transição dos anéis é

mais acentuada, dificultando a distinção entre o efeito do anel e o da transição cerne-alburno. Situação semelhante foi identificada por Curvo et al., (2024) e Gaitan-Alvarez et al. (2019). Assim, recomenda-se distinguir cerne e alburno macro ou microscopicamente, baseando-se em propriedades químicas, anatômicas e colorimétricas (Berrocal et al., 2020; Castro et al., 2022; Campos et al., 2025).

Figura 8. Transição entre cerne e alburno no lenho de *Tectona grandis*, dentro de um observada com a técnica de microdensitometria de raios-x



Legenda: Setas vermelhas representam a transição entre cerne e alburno. Triângulos amarelos demarcam a finalização do anel.

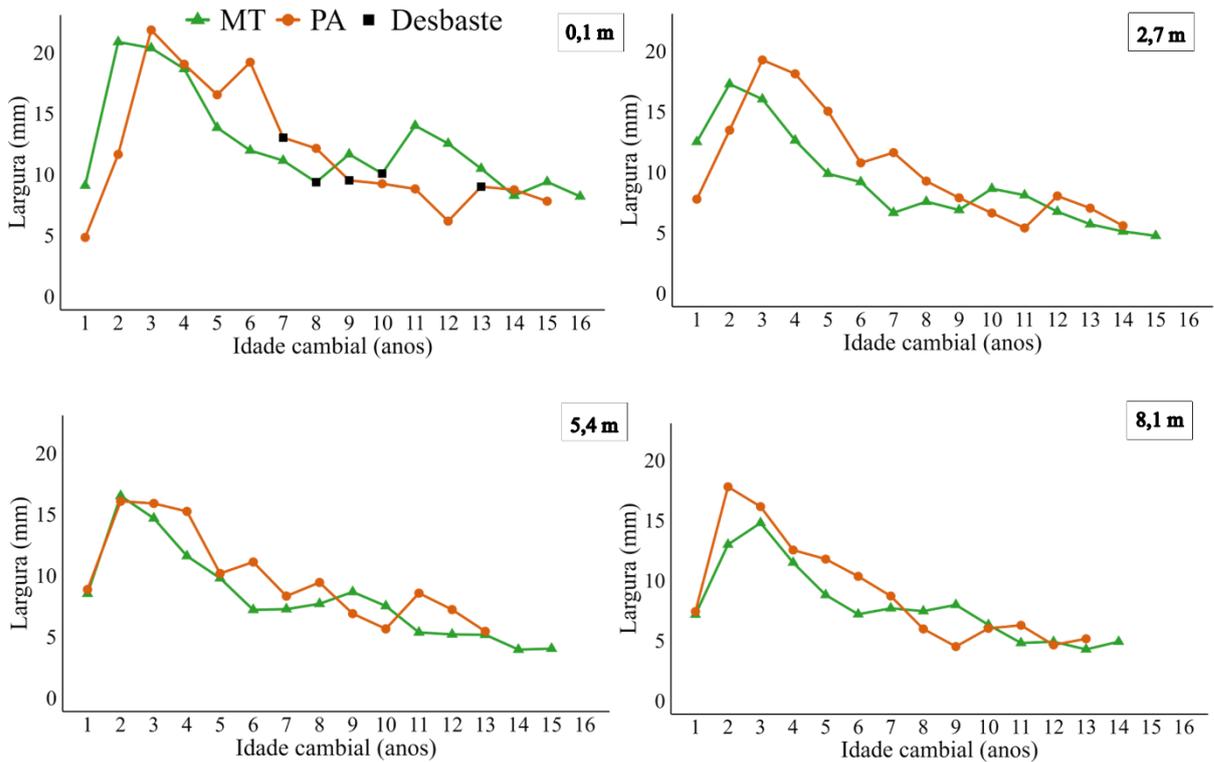
Quanto a presença das listras negras presentes no lenho, não houve variação expressiva na densidade do lenho nas áreas com listras negras, embora picos pontuais de densidade tenham sido observados, porém sem padrão evidente. Esses picos podem estar associados a composição química das listras, tendo em vista que a literatura sugere que há uma variação química nessa região (Hillis, 1998; Lukmandaru et al., 2008; Moya et al., 2014), que podem elevar a densidade pontualmente. Recomenda-se que estudos futuros investiguem detalhadamente o conteúdo, as causas e possíveis efeitos das listras negras no lenho.

5.3 Variação da largura dos anéis de crescimento de *Tectona grandis*

Os anéis de crescimento apresentaram, em geral, largura média entre 5 e 20 mm. Apesar da redução na largura do anel de crescimento gradual ao longo do tempo, o padrão de largura se manteve próximos ou acima de 5 mm. Anish et al. (2015) classificaram o lenho de teca como de rápido crescimento quando a largura média dos anéis era ≥ 5 mm, e como de crescimento lento quando era < 5 mm. Assim, considerando que, nos dois sítios avaliados, os valores encontrados foram ≥ 5 mm, confirma-se que são plantações de rápido crescimento. A variação

radial e longitudinal da largura dos anéis de crescimento para os dois sítios é apresentada na Figura 9.

Figura 9. Variação radial e longitudinal da largura dos anéis de crescimento de árvores de *Tectona grandis* de plantações em Mato Grosso e Pará, Brasil



Ao comparar os dois sítios, observou-se que, entre o 2º/3º e o 7º/9º anel, as larguras dos anéis foram ligeiramente maiores nas árvores do Pará, em todas as posições longitudinais (Figura 9). A partir do 10º anel, na base (0,1 m), a largura dos anéis das árvores de Mato Grosso passam a ser superiores. Nas demais alturas, os valores são semelhantes entre os sítios, sem uma variação padrão.

Para ambos os sítios, em todas as posições longitudinais, a largura dos anéis de crescimento seguiu o mesmo padrão: maior nos três primeiros anos e com redução gradual na direção radial (Figura 9). Figueiredo (2021), ao avaliar *Tectona grandis* plantada em Mato Grosso e São Paulo, Brasil, descreveu tendência similar. Isso ocorre porque na fase inicial do desenvolvimento, as árvores têm maior acesso a nutrientes, luz e água, com menor competição, o que favorece o rápido crescimento e resulta em anéis mais largos (Rocha et al., 2019; Shukla e Viswanath, 2023).

Independentemente do local, anéis de crescimento mais largos foram observados em anos de tratos silviculturais, como desbaste e adubação, e imediatamente seguintes (Figura 9). Esse comportamento pode ser visualizado na teca de Mato Grosso no 8º e 10º anéis, e no Pará pode ser observado no 5º, 6º, 8º e 12º anéis. Em função do aumento da competição entre árvores pelos recursos disponíveis, há redução do crescimento. Com a aplicação de tratos silviculturais, há uma redução nessa competição, resultado da abertura das áreas pelo desbaste e maior disponibilização de recursos. Assim, há uma retomada acelerada do crescimento, promovendo as oscilações na largura dos anéis.. Figueiredo (2021) confirmou esse padrão de crescimento, também identificando aumentos nos anéis de crescimento nos anos de tratos silviculturais, reforçando que a técnica de desbaste é efetiva para o incremento do lenho de teca.

Foi observado uma diminuição nos cinco anéis finais, independentemente do sítio. Figueiredo (2021) relatou tendência similar, com redução na largura dos últimos 2 a 3 anéis de árvores entre 9 e 18 anos. Ressalta-se que como as árvores foram abatidas antes de completarem o crescimento do ano corrente, o último anel está incompleto.

Por se tratar de indivíduos jovens, com 15 a 16 anos, ou seja, abaixo da idade de corte de plantações de rápido crescimento, que varia de 20 a 30 anos (Kollert et al., 2024), não foi possível identificar com precisão o ponto em que se inicia uma tendência contínua de estabilização da largura dos anéis de crescimento. Essa análise é importante para o planejamento do corte final e do manejo, por identificar o início da estabilização do crescimento. Isso contribui com a definição da idade ideal de corte e a tomada de decisões silviculturais, como a intensidade e o tempo dos desbastes, especialmente ao se considerar a resposta positiva das árvores aos tratos silviculturais, como o desbaste.

A cada posição longitudinal avaliada, observou-se a diminuição de um anel de crescimento. Esse processo acontece devido ao crescimento em altura ser progressivo, os anéis de crescimento se formam nas partes da árvore que já foram criadas pelo crescimento primário. Assim, as regiões superiores ainda não estavam desenvolvidas no momento da formação desses anéis, o que explica a defasagem cronológica observada nas alturas superiores das árvores (Larson, 1994).

A Tabela 5 apresenta os resultados da análise estatística por meio de modelos lineares de efeitos mistos, considerando os efeitos dos sítios, da idade cambial e da altura na largura dos anéis de crescimento de *Tectona grandis*. Não houve diferença estatística na largura dos anéis de crescimento entre os dois sítios (p -valor > 0,05; Tabela 4), apesar de suas particularidades

edafoclimáticas. Por outro lado, a idade cambial teve efeito significativo na largura dos anéis (p -valor $< 0,05$), diminuindo com o aumento da idade cambial.

Tabela 5 - Análise dos coeficientes preditivos avaliados radialmente para a largura dos anéis de crescimento de *Tectona grandis* por meio dos modelos lineares de efeitos mistos

Fonte de variação	Estimativa	t-valor	p-valor
Intercepto (categoria de referência MT)	16,22	20,75	$< 2 e^{-16}$ *
Local (PA vs MT)	1,03	1,14	0,26376 ^{ns}
Idade cambial (anéis)	-0,51	-8,00	$3,33 e^{-15}$ *
Altura 2,7 m	-1,08	-1,41	0,15812
Altura 5,4 m	-2,28	-2,92	0,00354 *
Altura 8,1 m	-2,86	-3,61	0,00032 *
Local × Idade cambial (anéis)	-0,08	-1,28	0,20212 ^{ns}
Altura 2,7 m × Idade cambial (anéis)	-0,21	-2,44	0,01474 *
Altura 5,4 m × Idade cambial (anéis)	-0,18	-2,00	0,04558 *
Altura 8,1 m × Idade cambial (anéis)	-0,21	-2,24	0,02534 *

^{ns}: Não significativo ao nível de 5% de significância; *: Significativo ao nível de 5% de significância

O efeito da altura foi significativo (p -valor $< 0,05$), indicando que a posição longitudinal individualmente exerceu influência na largura dos anéis de crescimento (Tabela 5). Em 2,7 m, não houve redução significativa ($p = 0,15812$), mas a partir de 5,4 m, a diminuição foi significativa ($p = 0,00354$), e ainda mais acentuada em 8,1 m ($p = 0,00032$). Em relação à altura 0,1 m (base da árvore), a largura dos anéis foi, em média, 2,28 mm menor em relação a altura de 5,4 m e 2,86 mm menor que a altura de 8,1 m. Isso indica que a redução na largura dos anéis não ocorre de forma linear com o aumento da altura. Nas porções mais altas do tronco, a redução na largura dos anéis com avanço da idade cambial é mais expressiva. Nas alturas 2,7 m e 8,1 m, a cada ano adicional de idade cambial, a largura dos anéis reduz, em média, 0,21 mm, enquanto em 5,4 m a redução é de 0,18 mm (Tabela 5). Considerando que o crescimento radial varia longitudinalmente, esse resultado é compatível com o descrito na literatura (Sousa et al., 2012; Hao et al., 2022).

Para entender o efeito da altura na largura dos anéis de crescimento, a Tabela 6 apresenta a variação dos valores médios no sentido longitudinal e compara os dois sítios estudados.

A largura média dos anéis de crescimento diminuiu 36,4% em Mato Grosso e 22,4% no Pará, da base (0,1 m) até a altura de 8,1 m (Tabela 6). Essa redução também é percebida ao observar os valores médios máximos e mínimos de largura dos anéis de crescimento (Figura 9). Ressalta-se que, em ambos os sítios, a largura dos anéis foi significativamente maior na base das árvores. Houve também uma diminuição gradativa da largura dos anéis de crescimento em

direção ao topo, embora sem diferenças estatísticas significativas entre as demais posições longitudinais. Considerando as toras comerciais, a maior variação na largura dos anéis ocorreu entre 0,1 m e 2,7 m, limites da primeira tora comercial, para ambos os sítios (Tabela 6). Esse comportamento está de acordo com as tendências de crescimento das árvores (Nicoletti et al., 2016; Ramanantoandro et al. 2016; Marques, 2024), considerando que na região basal é onde são necessários maiores esforços para sustentação do vegetal, o que resulta em maior acúmulo de material lenhoso (Câmara et al., 2020).

Tabela 6. Valores médios da largura dos anéis de crescimento de *Tectona grandis* por meio dos modelos lineares de efeitos mistos em função da altura e sítio

Altura (m)	Sítio		p-valor
	Mato Grosso	Pará	
0,1	12,50 a ^{ns}	11,63 a ^{ns}	0,090
2,7	9,17 b	10,20 b*	0,044
5,4	8,41 b	9,70 b*	0,014
8,1	7,95 b	9,03 b*	0,035

^{ns}: Não significativo ao nível de 5% de significância na linha; *: Significativo ao nível de 5% de significância entre sítios na linha. Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

A variação no sentido longitudinal acompanha o afinamento da árvore, de modo que com o aumento da altura, há uma redução no diâmetro, resultando assim, em menor largura do anel de crescimento. Resposta similar foi observada por Silva (2024), que também encontrou redução da largura dos anéis no sentido longitudinal em *Tectona grandis* de diferentes sítios. Sousa et al. (2012), avaliando os anéis de crescimento nas alturas de 1,7 m; 9,5 m e 18,7 m de teca proveniente de uma floresta não manejada em Timor-Leste, obtiveram resultados contrários. Em sua análise, os autores não detectaram variação longitudinal da largura dos anéis, porém, o estudo avaliou árvores de idades avançadas (~54 anos) e de crescimento lento.

Essa diferença pode ser atribuída à atividade cambial da árvore. Com o avanço da idade e em crescimento lento, como no estudo de Sousa et al. (2012), a atividade cambial diminui, inclusive nas porções superiores do fuste, o que reduz a variação longitudinal dos anéis. Em contrapartida, Adutwum et al. (2023) indica que árvores jovens de rápido crescimento, como neste estudo, a alta atividade dos meristemas apicais mantém a atividade cambial elevada ao longo do fuste, aumentando o contraste na variação das estruturas e propriedades do lenho entre base e topo. Isso reforça a necessidade de avaliar a variação longitudinal dos anéis de crescimento de teca conduzidas em regime de rápido crescimento nas regiões tropicais.

Ainda sobre a avaliação da variação da largura dos anéis de crescimento em função da altura, as árvores do Pará apresentaram valores médios significativamente maiores do que as de Mato Grosso a partir da altura de 2,7 m, com diferença aproximada de 15% (Tabela 6). Na base (0,1 m), porém, não houve diferença estatística entre os sítios. Apesar do modelo de efeito misto indicar que o local não exerceu influência direta, as médias variam ao longo da altura. Durante o desenvolvimento inicial, da base até a altura 2,7 m, o comportamento da largura dos anéis de crescimento é o mesmo nos dois locais. No entanto, em alturas maiores, observam-se diferenças nas larguras médias dos anéis entre Mato Grosso e Pará, indicando que o sítio não afeta diretamente essa medida, mas influencia indiretamente, já que o efeito da altura varia entre os materiais avaliados.

A maior largura nos anéis de crescimento a partir da altura 2,7 m resultam em maior volume de madeira acumulado nessas regiões. Esse comportamento fica ainda mais evidenciado quando realizada a comparação por toras comerciais. O maior desenvolvimento das árvores do Pará nas alturas superiores refletiu nas 2ª e 3ª toras comerciais com maior volume pela cubagem rigorosa de Smalian. A 2ª tora do Pará apresentou volume médio de 0,160 m³, 8,84% maior que a do Mato Grosso (0,147 m³). O mesmo padrão foi observado na 3ª tora, com o Pará apresentando 6,84% mais volume (0,125 m³) em comparação ao Mato Grosso (0,117 m³). Essa variação tem impacto direto na economia da madeira de teca, com o Pará apresentando maior volume nas 2ª e 3ª toras comerciais.

No aspecto nutricional, a teca exige saturação por bases de média a alta, com o Ca com maior relevância (Moraes Neto et al., 2021), sendo um indicador de qualidade do sítio para teca (Zhou et al., 2012). Apesar das limitações texturais e de classe de solos, o sítio de Mato Grosso apresentam maiores quantidades de Ca, em relação ao Pará (Tabela 1). O Ca favorece o incremento da área basal e do volume da teca, apresentando altas correlações com o DAP e altura total (Gava, 2023), e tende a aumentar com o avanço da idade cambial (Pelissari, 2012). Essa influência se relaciona com os resultados observados nesse trabalho, em que apesar do sítio não influenciar a largura dos anéis de crescimento na base da árvore (0,1 m), a teca produzida em Mato Grosso apresentou maior volume na primeira tora comercial (0,271 m³) em relação a do Pará (0,223 m³).

Comparando as condições climáticas, o sítio do Pará apresentou maior precipitação anual ao longo de toda a série histórica (Figura 2), resultando em maior disponibilidade hídrica para o crescimento das árvores. Além disso, a estação de crescimento no Pará é mais longa do que no Mato Grosso (Figura 2), proporcionando aproximadamente um mês a mais de atividade

cambial para o desenvolvimento das árvores. Também é observado que, durante o desenvolvimento das árvores, o sítio do Pará apresentou menos meses em condição de seca moderada ou severa (Figura 3B), se comparado ao sítio de Mato Grosso. Essas condições favoreceram larguras de anéis maiores no Pará, indicando maior crescimento radial em comparação ao Mato Grosso.

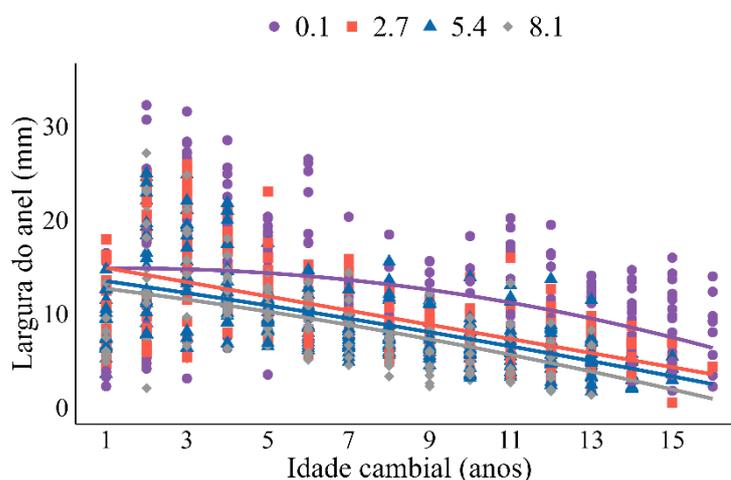
Não houve interação significativa entre sítio e idade cambial (p -valor $> 0,05$; Tabela 6), o que indica que o efeito da idade cambial na largura dos anéis é semelhante nos dois sítios e que esses fatores são independentes. Porém, a interação entre altura e idade cambial foi significativa (p -valor $< 0,05$), de modo que a influência da posição longitudinal na largura dos anéis varia conforme a idade cambial. Diante disso, a Tabela 7 apresenta os coeficientes estimados dos modelos quadráticos ajustados enquanto a Figura 10 ilustra as curvas de variação da largura dos anéis em função da idade cambial para cada posição longitudinal.

Tabela 7. Coeficientes dos modelos quadráticos para largura dos anéis de crescimento de *Tectona grandis* e estatísticas de ajuste por altura

Altura (m)	Estatística			R ²	R ² _{aj}	S _{yx}	S _{yx} %	AIC	BIC
	β_0	β_1	β_2						
0,1	14,78*	0,12 ^{ns}	-0,04*	0,17	0,17	5,66	56,65	1764,37	1778,90
2,7	15,67*	-0,76*	0,0002 ^{ns}	0,38	0,37	4,13	41,28	1491,35	1505,62
5,4	14,11*	-0,61*	-0,01 ^{ns}	0,37	0,36	3,80	38,06	1366,07	1380,11
8,1	13,23*	-0,52 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,35	0,34	3,87	38,69	1302,11	1315,93

^{ns}: Não significativo ao nível de 5% de significância; *: Significativo ao nível de 5% de significância. β_0 , β_1 , β_2 : coeficientes do modelo quadrático; R²: coeficiente de determinação; R²_{aj}: coeficiente de determinação ajustado; S_{yx}: erro padrão da estimativa; AIC: critério de Informação de Akaike; BIC: critério de Informação Bayesiano.

Figura 10. Variação da largura do anel de crescimento em função da idade cambial, em diferentes alturas de árvores de *Tectona grandis* independentemente do sítio de plantio



As análises estatísticas contribuem para a avaliação do modelo, indicando que na altura de 0,1 m (base), o modelo explica apenas 17% da variabilidade dos dados, com erro padrão elevado e AIC e BIC altos, sugerindo baixa eficiência. Dessa forma, o ajuste do modelo quadrático para a largura dos anéis de crescimento é fraco nessa altura. A partir de 2,7 m, os modelos explicam entre 35% e 38% da variabilidade, e, embora os erros permaneçam elevados (38% a 41%), AIC e BIC mostram melhorias, o modelo ainda é limitado.

Nesse tipo de interação observada, para cada ano adicional na idade cambial do lenho de teca, independentemente do sítio, o efeito da altura sobre a largura dos anéis torna-se mais acentuado, variando conforme a posição ao longo do fuste (Figura 10). Com base nos coeficientes dos modelos, os padrões para largura dos anéis de crescimento foram distintos para as posições longitudinais avaliadas. O comportamento da curva relacionadas à altura 0,1 m (base) demonstrou constância seguida de redução (Figura 10), indicando maior atividade cambial concentrada nos anos iniciais, e redução com o avanço da idade cambial. Na altura 2,7 m, a curva expressa evidentemente comportamento decrescente, com redução da largura dos anéis com o avanço da idade cambial. Os valores de R^2 (Tabela 7) indicaram que, apesar dos modelos expressarem tendências relevantes, outros fatores além da idade cambial também afetam a variação na largura dos anéis.

5.4 Características do lenho inicial e lenho tardio de *Tectona grandis*

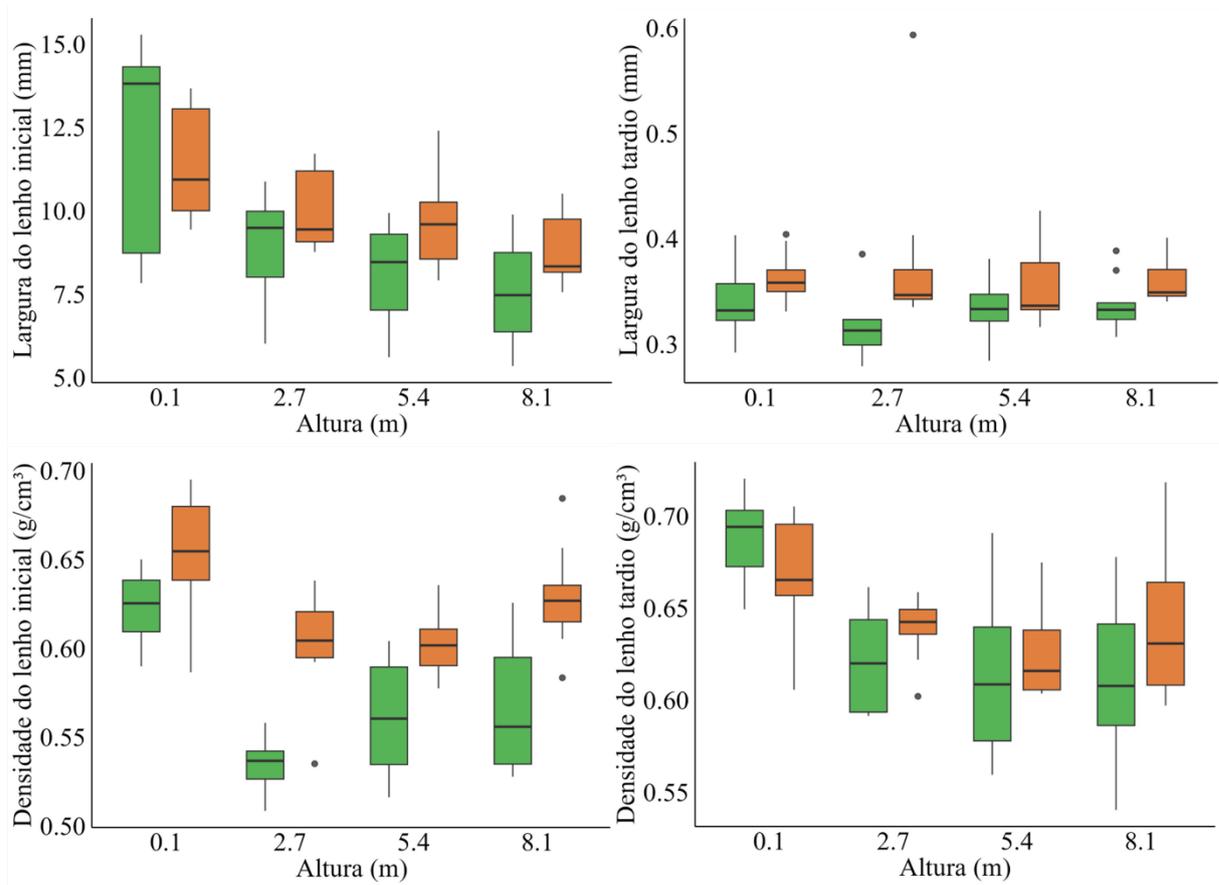
A Tabela 8 mostra que o sítio e a altura influenciam a largura e a densidade dos lenhos inicial e tardio. Não houve interação significativa entre esses fatores (p -valor $> 0,05$), indicando que os efeitos do sítio e da altura são independentes. A Figura 11 apresenta a distribuição dos valores médios de largura e densidade dos lenhos, considerando os dois sítios e as alturas avaliadas. Os valores médios de largura e densidade do lenho tardio por anel de crescimento podem ser observados nas Tabelas 14 e 15 (Apêndice I).

Tabela 8 - Análise de variância dos efeitos dos fatores sítio e posição ao longo da altura sobre os parâmetros de lenho inicial e tardio de *Tectona grandis*

Parâmetro	Fatores		
	Sítio	Altura	Sítio \times Altura
Largura do lenho inicial (mm)	0,054 ^{ns}	$2,99e^{-07*}$	0,231 ^{ns}
Largura do lenho tardio (mm)	0,0005*	0,999 ^{ns}	0,253 ^{ns}
Densidade do lenho inicial (g/cm ³)	$1,57e^{-10*}$	$2,86e^{-09*}$	0,121 ^{ns}
Densidade do lenho tardio (g/cm ³)	0,261 ^{ns}	$5,2e^{-06*}$	0,193 ^{ns}

^{ns}: Não significativo ao nível de 5% de significância; *: Significativo ao nível de 5% de significância pelo teste F da análise de variância (ANOVA).

Figura 11. Variação da largura e densidade dos lenhos inicial e tardio de *Tectona grandis* em função da posição longitudinal e dos sítios



O sítio não exerceu efeito significativo na largura do lenho inicial (p -valor $> 0,05$), de modo que no sítio do Pará a média da largura do lenho inicial foi 10 mm e no Mato Grosso 9,19 mm, não diferindo entre si. Já a altura, influenciou significativamente esse parâmetro (p -valor $< 0,05$; Tabela 8). Foi observada uma diminuição da largura dos anéis do lenho inicial ocorre progressivamente da base (0,1 m) até o topo (8,1 m) da árvore (Figura 11). Comparando as alturas (Tabela 16, Apêndice II), na largura do lenho inicial, apenas a base (0,1m) é significativamente diferente das demais alturas ($p < 0,05$). Assim, a redução na largura do lenho inicial mais expressiva na base da árvore, tendendo a se estabilizar a partir de 2,7 m.

Para a largura do lenho tardio, o sítio exerceu efeito significativo, independentemente da posição longitudinal (p -valor $< 0,05$; Tabela 8). Observou-se que em todas as alturas avaliadas, o lenho tardio das árvores proveniente do Pará possuía larguras maiores em relação às de Mato Grosso (Figura 11). Assim, o lenho tardio das árvores provenientes do Pará apresentou largura média de 0,37 mm, valor significativamente superior ao observado na teca plantada em Mato Grosso, com largura média de 0,33 mm. Desse modo, sugere-se as condições edafoclimáticas influenciaram a formação de lenho tardio.

O sítio exerceu influência significativa (p -valor $< 0,05$) sobre a densidade do lenho inicial (Tabela 7), com o sítio do Pará apresentando, independentemente da altura, densidades médias superiores às de Mato Grosso (Figura 11). Para a densidade do lenho tardio, embora não tenha sido observado efeito significativo do sítio (Tabela 8), ambos os sítios apresentaram densidades mais elevadas na base do fuste (0,1 m) em relação às outras posições longitudinais (Tabela 14 e 15, Apêndice I). A altura afetou significativamente tanto a densidade do lenho inicial quanto do lenho tardio, o que está associado à formação diferenciada do lenho em distintas posições do fuste.

Ao comparar os valores médios de densidade dos lenhos inicial e tardio dos dois sítios, observa-se que o lenho de Mato Grosso apresenta maior variação intra-anual. Nesse caso, a densidade do lenho tardio ($0,634 \text{ g/cm}^3$) é significativamente maior, aproximadamente 10,84% superior à do lenho inicial ($0,572 \text{ g/cm}^3$). Esse comportamento está de acordo com a literatura, que aponta variações esperadas entre essas regiões do anel de crescimento (Figueiredo, 2021; Seta et al., 2021; Carmo et al., 2022; Bahtiar et al., 2023). Apesar da densidade do lenho inicial e tardio também serem significativamente diferentes para as árvores do sítio do Pará, a densidade do lenho tardio ($0,643 \text{ g/cm}^3$) apresentou densidade apenas 3,38% superior à do lenho inicial ($0,622 \text{ g/cm}^3$).

As diferenças observadas entre o lenho inicial e tardio, ao longo do fuste, estão associadas às variações fisiológicas do câmbio vascular, como a disponibilidade de auxinas, que regulam a atividade cambial e são influenciadas por condições ambientais e genéticas (Dié et al., 2012; Pumijumnong et al. 2023). Foi observado que o lenho inicial apresentou largura maior e densidade menor em comparação ao lenho tardio. Esses padrões também variaram ao longo do fuste e entre os sítios, com a densidade do lenho inicial influenciada tanto pela altura quanto pelo sítio, enquanto a do lenho tardio variou apenas com a altura. Já para a largura, apenas o lenho tardio apresentou diferenças significativas entre os sítios. O estresse hídrico, que ocorre nas regiões de Mato Grosso e Pará (Figura 2) durante o período de seca na região pode ter influenciado a formação do lenho, conforme descrito por Zobel e Buijtenen (1989), Bahtiar et al. (2023) e Buajan et al. (2023).

A literatura aponta que em folhosas com porosidade em anel ou anéis semiporosos, há maior concentração de poros de grandes diâmetros no início do lenho inicial, região com menor quantidade de material lenhoso e maior volume de espaços vazios, distribuídos na parte interna dos poros (Larson, 1994; Schweingruber, 2007). Essa variação interna é explicada pela divisão não fisiológica do lenho inicial, que no começo de sua formação, logo após o lenho tardio do

anel da estação anterior, estabelece uma zona altamente porosa, seguida por redução gradual da porosidade e aumento da proporção de células do lenho, resultando em maior densidade em relação à porção mais porosa do início (Larson, 1994; Schweingruber, 2007). Assim, em anéis mais largos, a proporção de lenho poroso no lenho inicial tende a ser menor, enquanto não há variação no volume e na massa das demais porções do lenho inicial e do lenho tardio.

Como a atividade cambial está relacionada à precipitação (Dié et al., 2012), durante a estação seca, o sítio de Mato Grosso registrou em média 195 mm de chuva acumulada para o período (de abril a outubro), enquanto o Pará teve 149 mm (de abril a setembro). Apesar de próximos, os padrões de distribuição foram diferentes: em Mato Grosso, a precipitação foi mais uniforme ao longo do período seco (Figura 2), mas essa regularidade ocorreu justamente na fase de cessação do crescimento das árvores. Em contrapartida, nos meses que antecedem a estação seca, Mato Grosso já apresentou menor precipitação, especialmente na transição entre estação chuvosa e seca, passando de 103 mm de precipitação em abril, média já próxima ao limite de classificação de estação seca (< 100 mm), para 42 mm de precipitação em maio. No Pará, a estação de crescimento manteve níveis mais constantes e elevados de chuva, com redução abrupta apenas no início da seca, transicionado de 187 mm em abril para 76 mm em maio, que corresponde ao início da estação seca (Figura 2).

Essa constância favoreceu o desenvolvimento das árvores de teca no Pará, cuja largura do lenho tardio foi significativamente maior (p -valor $< 0,05$; Tabela 8). Adicionalmente, apesar do sítio de Mato Grosso ter acumulado maior precipitação durante a estação de seca, esse período também foi maior, enquanto no sítio do Pará a estação de crescimento iniciou um mês antes, com o retorno das chuvas (Figura 2). Dessa forma, a maior disponibilidade hídrica no início da estação de crescimento das árvores possivelmente proporcionou condições mais favoráveis à formação de células mais robustas do lenho, com paredes mais espessas, resultando em maior densidade do lenho inicial para a teca do sítio do Pará.

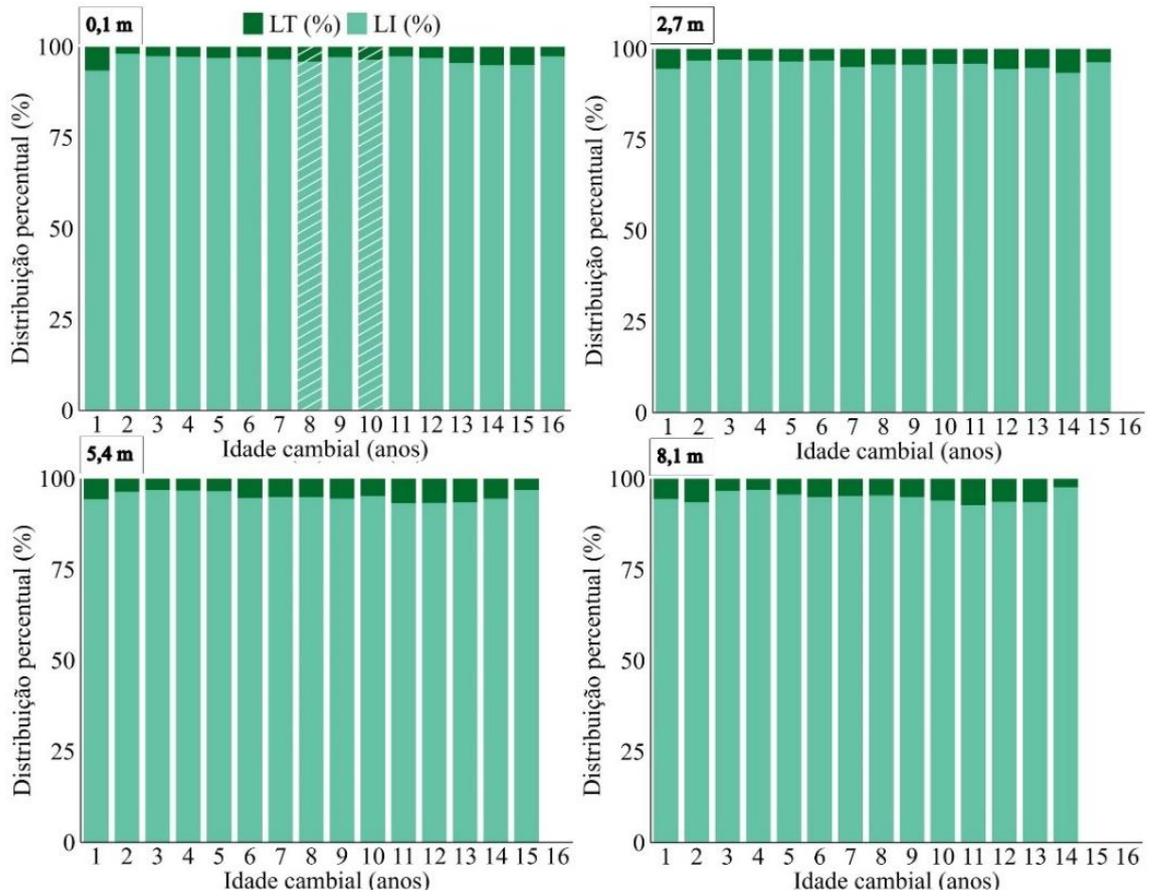
Buajan et al. (2023), avaliando a relação entre atividade cambial e produção de xilema em árvores de teca observou que a precipitação é um fator crítico que impulsiona a atividade cambial. Desse modo, a distribuição da precipitação média mensal nos meses de transição entre a estação úmida e a seca, regula a atividade do câmbio, que é responsável pela produção do lenho tardio. Essa produção ocorre no final da estação de crescimento, quando a atividade cambial diminui gradualmente, com a formação de células menores e paredes mais espessas, antes da dormência cambial. Assim, a largura do lenho tardio do material do Pará é superior ao de Mato Grosso.

O lenho das árvores de Mato Grosso e do Pará apresentaram comportamento similar para larguras dos lenhos inicial e tardio (Figura 11). As maiores larguras de lenho inicial ocorreram nos primeiros anéis de crescimento, principalmente na altura de 0,1 m (base da árvore), entre o 2º e 4º anel em Mato Grosso, e entre o 3º e 6º no Pará (Tabelas 14 e 15, Apêndice I). Após esse período inicial de crescimento, houve redução da largura do lenho inicial radialmente, mais acentuada nas maiores alturas. Nos anos com intervenções silviculturais, observou-se aumento pontual nessa largura. Apesar da tendência geral de redução com a altura, as árvores do Pará mantiveram larguras de lenho inicial superiores às de Mato Grosso nas porções mais altas do fuste.

Quanto ao lenho tardio, sua largura permaneceu estável ao longo das posições longitudinais, mas a largura média do lenho tardio das árvores do sítio do Pará foi maior em relação à de Mato Grosso (Tabelas 14 e 15, Apêndice I). Em geral, diferentemente da largura do lenho inicial, o lenho tardio não possui uma tendência clara de variação com a idade. Marques (2024), avaliando *Tachigali vulgaris* observou comportamento similar nas larguras dos lenhos inicial e tardio, com o lenho inicial apresentando comportamento decrescente no sentido radial e lenho tardio estável. Esse comportamento indica que ao finalizar a produção de lenho inicial, a árvore mantém um padrão regular na formação de células de lenho tardio. Com isso, o tecido de lenho tardio se mostra menos sujeito a variações ambientais. Essas condições favorecem o uso dessa madeira na indústria, considerando que largura estável do lenho tardio, que possui maior densidade, proporciona características físicas e mecânicas mais uniformes e previsíveis para as peças, o que é desejável para aplicações que exigem resistência e durabilidade da madeira.

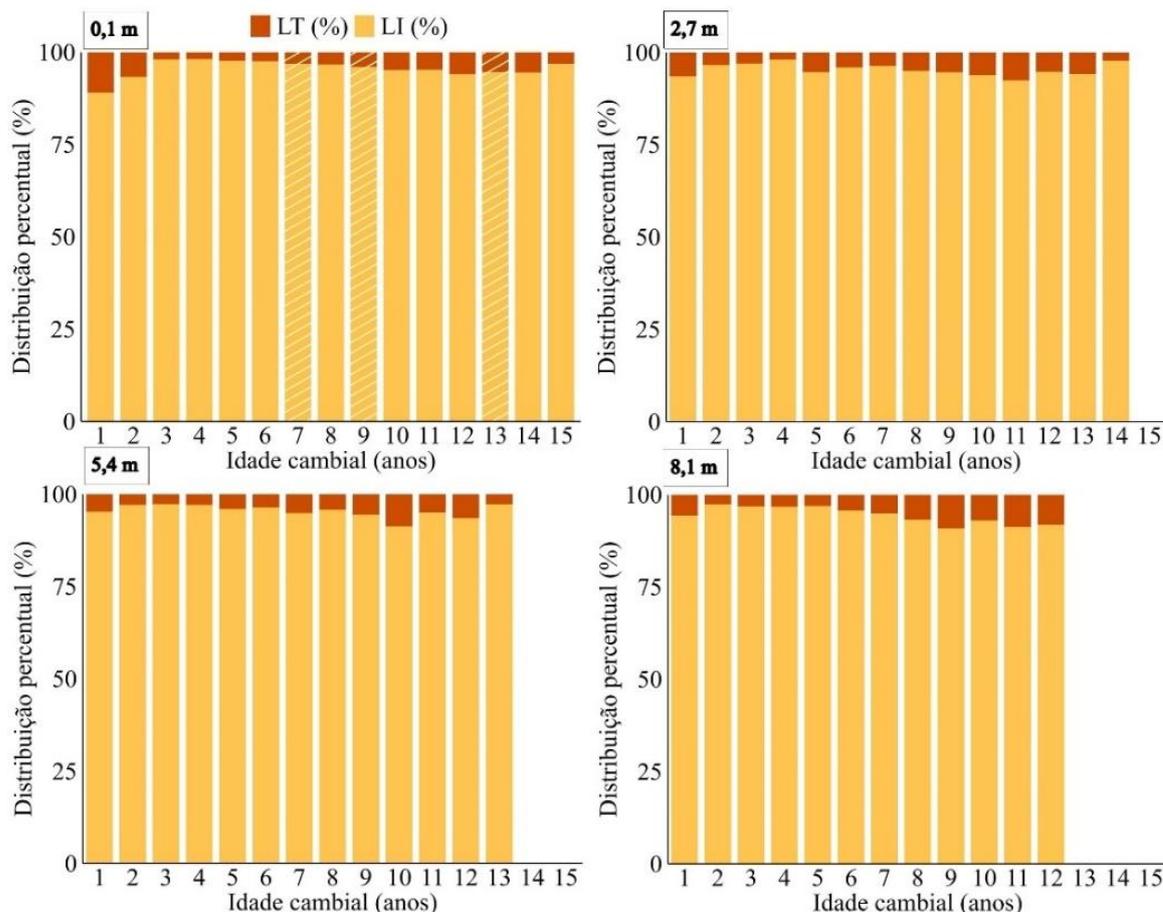
As Figura 12 e 13 apresenta os percentuais de lenho inicial e lenho tardio por anel de crescimento, mostrando sua variação radial, em função da idade cambial nas diferentes posições longitudinais avaliadas, nas árvores de teca plantadas em Mato Grosso (Figura 12) e no Pará (Figura 13).

Figura 12. Distribuição percentual dos lenhos inicial e tardio ao longo da idade cambial em diferentes alturas do fuste de *Tectona grandis* em Mato Grosso.



Legenda: Hachura na base da árvore representam os anos de desbastes. A marcação é limitada à base, onde os anéis de crescimento permitem identificação precisa.

Figura 13. Distribuição percentual dos lenhos inicial e tardio ao longo da idade cambial em diferentes alturas do fuste de *Tectona grandis* no Pará.



Legenda: Hachura na base da árvore representam os anos de desbastes. A marcação é limitada à base, onde os anéis de crescimento permitem identificação precisa.

As porcentagens médias de lenho inicial variaram de 92,7% a 97,4% nas árvores de Mato Grosso e de 89% a 98,1% nas árvores do Pará. Esses valores referem-se apenas aos anéis completamente formados, desconsiderando o último por estar incompleto. Essa variação foi observada radialmente, nos dois sítios (Figura 12 e 13). Visualmente, não se notaram diferenças marcantes entre as alturas avaliadas, com a base (0,1 m) apresentando distribuição percentual semelhante à da altura final avaliada (8,1 m).

Avaliando a distribuição de lenho inicial e tardio por anel de crescimento, em ambos os sítios, o primeiro anel de crescimento apresentou maior porcentagem de lenho tardio em relação aos anos seguintes. Esse comportamento está relacionado ao estágio inicial de crescimento das árvores, quando ainda estão estabelecendo seu sistema de transporte. Nesse momento inicial do crescimento, a proximidade com a medula e ainda a presença de lenho não normal (tração), resultado do estresse de crescimento inicial pode influenciar a formação dos tecidos (Wiedenhoeft e Miller, 2005).

O lenho de teca de Mato Grosso (Figura 13) apresentou baixa variação dos percentuais de lenho inicial e tardio entre o 2º e 6º ano, com um aumento de lenho tardio entre o 7º e 10º ano (Figura 12). Em seguida, houve aumento gradual no percentual de lenho tardio, seguida de tendência de proporções estáveis entre lenho inicial e tardio. Já o material proveniente do Pará (Figura 14), apresentou variações moderadas. Observou-se menores percentuais de lenho tardio nos 1º e 2º anos em relação ao 3º, atribuídas ao crescimento instável nas fases iniciais, como sugerido por Wiedenhoeft e Miller (2005). A variação percentual de lenho inicial e tardio foi pouco expressiva entre o 3º e 6º anos (Figura 13), com redução gradativa e menos oscilações bruscas na proporção de lenho inicial e tardio. Isso demonstra que a partir do 6º ano de crescimento, o material plantado no Pará produziu lenho com percentagens de lenho inicial e tardio estáveis. Entre o 10º e o 14º houve maior percentual de lenho tardio, independentemente da altura.

Em todas as alturas, no sentido medula casca, houve maior percentagem de lenho inicial. A partir do 12º ano, observou-se uma tendência de redução na percentagem e na largura do lenho inicial, enquanto a largura do lenho tardio se manteve estável. Com isso, há uma tendência de aumento na percentagem de lenho tardio. Silva (2024) encontrou tendência similar para a proporção de LI/LT de teca de 22-23 anos, plantada em três regiões de Mato Grosso, enquanto Sinha et al. (2017) avaliando a estrutura e variação da largura e densidade dos anéis de crescimento em lenho jovem e adulto de teca, relataram que a largura do anel, densidade e proporção de lenho tardio variaram entre locais de plantio.

Os elevados valores percentuais de lenho inicial em relação ao tardio nas primeiras idades cambiais é atribuída à maior disponibilidade de recursos e menor competição entre os indivíduos (Rocha et al., 2019; Hitsuma et al., 2021). Com o avanço da idade das árvores, há uma maturação no lenho que reduz essa taxa de crescimento (Boschetti et al., 2020; Moraes Neto et al., 2021), estabilizando a quantidade de lenho inicial e tardio.

Em geral, em ambos os sítios e em todas as alturas avaliadas, o percentual de lenho tardio aumentou gradualmente com a idade cambial, enquanto o percentual de lenho inicial diminuiu. No material do sítio Pará (Figura 13), esse aumento no percentual de lenho tardio tornou-se evidente a partir do 10º ano e tendeu a estabilizar em idades maiores. Em Mato Grosso (Figura 13), o mesmo padrão ocorre, mas a estabilização começou aproximadamente no 13º anel. Ressalta-se que os desbastes realizados não mostraram alteração evidente na proporção entre lenho inicial e tardio, independentemente do sítio. A teca do Pará (Figura 13) apresentou comportamento radial mais uniforme, com menor oscilação entre as percentagens de lenho

inicial e tardio ao longo dos anos. Já o material de Mato Grosso apresentou maiores oscilações, indicando que a percentagem de lenho tardio tem maior variação ao longo da idade cambial.

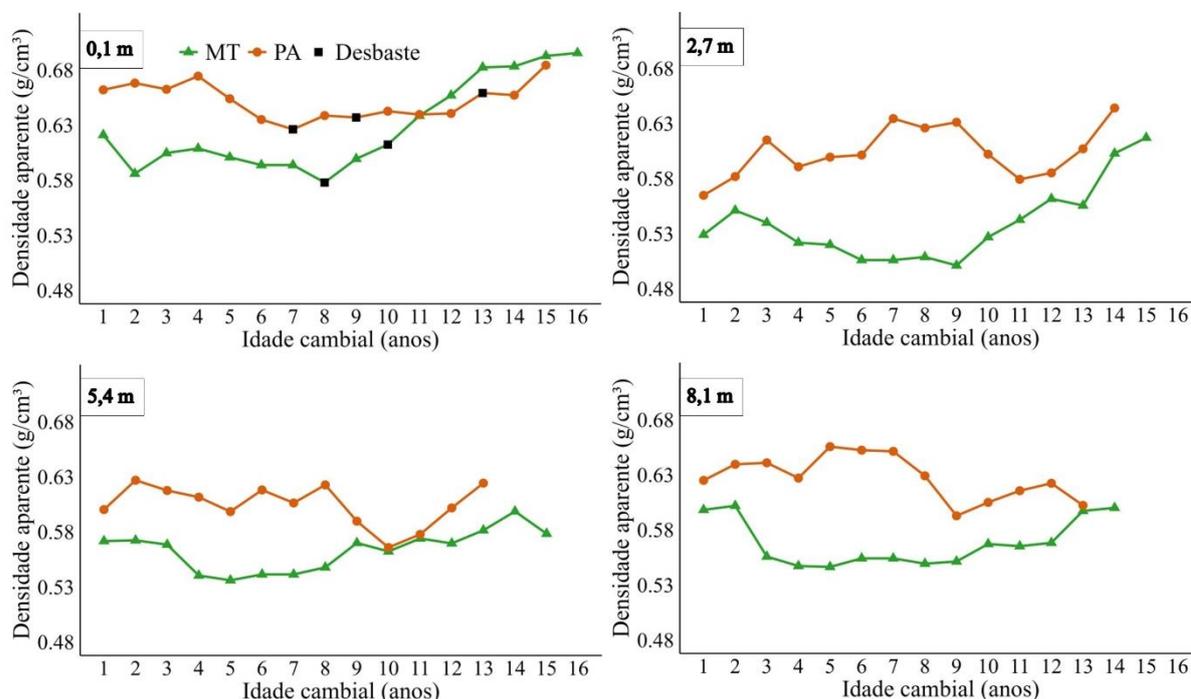
A análise das larguras médias dos anéis de crescimento indicou que a teca do sítio Pará apresentou 95,23% de lenho inicial e 4,77% de lenho tardio, valores próximos aos observados no material de Mato Grosso, 95,39% e 4,61%, respectivamente. Esses valores estão de acordo com a indicação de que a taxa de crescimento tem relação com o ambiente, principalmente com a precipitação (Buajan et al., 2023). Os percentuais de lenho inicial e tardio obtidos são um padrão comum em espécies folhosas de regiões tropicais (Tavares et al., 2013), cujo crescimento se concentra majoritariamente durante o período chuvoso, favorecendo a formação de lenho inicial. Assim, o baixo percentual de lenho tardio observado era esperado. Esse comportamento foi semelhante nos dois sítios avaliados, uma vez que compartilham a mesma sazonalidade climática.

5.5 Influência do sítio na variação radial e longitudinal da densidade do lenho de *Tectona grandis*

5.5.1 Avaliação da variação radial da densidade do lenho ao longo da altura

De modo geral, a densidade aumentou na direção radial, especialmente nas alturas de 0,1 e 2,7 m (Figura 14). O material do Pará apresentou as maiores densidades, enquanto o de Mato Grosso superou apenas nos cinco anéis mais externos da base (0,1 m). Entre as quatro alturas analisadas, a base apresentou os maiores valores de densidade, como também observado por Miranda et al. (2011). Dessa forma, a Figura 14 apresenta a distribuição densidade média do lenho por anel de crescimento ao longo da altura.

Figura 14. Variação da densidade do lenho ao longo da idade cambial em diferentes alturas das árvores de *Tectona grandis* nas plantações de Mato Grosso e Pará, Brasil



Avaliando a densidade aparente média na base das árvores (0,1 m) (Figura 14), observam-se padrões distintos de variação radial entre os sítios. Em Mato Grosso, a densidade do lenho foi inferior à do Pará, entre o 1º e 10º ano de crescimento, mantendo-se relativamente estável nesse intervalo, com quedas nos 2º e 8º anos. Em seguida, a densidade aumentou até o 13º ano, quando iniciou uma tendência de estabilização. Já no material do Pará, observou-se diminuição da densidade nos 3º e 7º anéis, seguida de estabilização até o 12º anel. Após esse período, a densidade voltou a apresentar tendência de aumento (Figura 14).

Na altura de 2,7 m, o material de Mato Grosso apresentou redução na densidade entre o 3º e o 6º anel de crescimento, seguida de estabilização até o 9º anel. A partir desse ponto, houve um aumento acentuado de aproximadamente 0,100 g/cm³ até o 15º anel. No material do Pará, destacaram-se picos de densidade nos 3º, 7º e 9º anéis, seguidos por uma queda nos 10º e 11º, com posterior aumento até o último anel avaliado (14º). Nas alturas 5,4 m e 8,1 m, a variação da densidade apresentou variações semelhantes às observadas em 2,7 m. Gráficamente, as variações de densidade ocorrem em intensidades proporcionais, com um deslocamento temporal de cerca de um ano, mantendo o padrão de variação. Esse comportamento reforça a evidência de que o padrão de variação longitudinal da densidade do lenho é similar para os dois sítios.

5.5.2 Variação da densidade do lenho em relação ao sítio, idade cambial e altura

A análise por modelos mistos mostrou que houve interação tripla significativa, indicando variação da densidade em função da idade cambial, altura e sítio (Tabela 9). Esse resultado sugere que o aumento da idade cambial tende a aumentar a densidade e a altura também influencia a densidade, quando combinada com os outros fatores. Contudo, essas relações se manifestam de formas distintas nos sítios Mato Grosso e Pará. Portanto, é importante avaliar os desdobramentos desses efeitos (Tabela 9).

Tabela 9 - Análise dos coeficientes preditivos avaliados para a densidade do lenho de *Tectona grandis* por meio dos modelos lineares de efeitos mistos

Fonte de variação	Estimativa	t-valor	p-valor
Intercepto (categoria de referência MT)	0,569	59,371	$< 2 e^{-16}$ *
Local (PA vs MT)	0.086	6.295	$5,06 e^{-08}$ *
Idade cambial (anéis)	0.007	10.016	$< 2 e^{-16}$ *
Altura 2,7 m	-0.066	-6.788	$1,96 e^{-11}$ *
Altura 5,4 m	-0.018	-1.817	0.070 ^{ns}
Altura 8,1 m	-0.003	-0.260	0.795 ^{ns}
Local × Idade cambial (anéis)	-0.007	-7.002	$4,66 e^{-12}$ *
Local × Altura 2,7 m	-0.001	-0.101	0.920 ^{ns}
Local × Altura 5,4 m	-0.028	-1.917	0.056 ^{ns}
Local × Altura 8,1 m	-0.005	-0,378	0,706 ^{ns}
Idade cambial (anéis) × Altura 2,7 m	-0,002	-2,337	0,020*
Idade cambial (anéis) × Altura 5,4 m	-0,005	-4,419	$1,10 e^{-05}$ *
Idade cambial (anéis) × Altura 8,1 m	-0,007	-5,933	$4,12 e^{-09}$ *
Local × Idade cambial (anéis) × Altura 2,7 m	0,005	3,247	0,001*
Local × Idade cambial (anéis) × Altura 5,4 m	0,004	2,197	0,028*
Local × Idade cambial (anéis) × Altura 8,1 m	0,004	2,586	0,010*

^{ns}: Não significativo ao nível de 5% de significância; *: Significativo ao nível de 5% de significância

A análise do modelo indicou que há diferença significativa na densidade do lenho entre os dois sítios (p-valor < 0,05). De acordo com o modelo, as árvores do Pará apresentaram densidade média 0,086 g/cm³ superior àquelas de Mato Grosso, quando as demais variáveis são constantes (Tabela 9), o que representa um aumento relativo de 15,1%. Em valores médios, a teca plantada em Mato Grosso teve densidade média de 0,571 g/cm³, enquanto no Pará esse valor foi de 0,628 g/cm³, o que representa um incremento de aproximadamente 9,98%. Essa diferença está possivelmente associada às distintas condições edafoclimáticas, como a maior precipitação (Figura 2) e características do solo observadas no Pará (Tabela 1), que favorecem, pela maior disponibilidade de recursos, o desenvolvimento de lenho de maior densidade. Outros

estudos também indicam que variações locais, sobretudo relacionadas ao clima e solo, influenciam a densidade do lenho em teca (Sinha et al., 2017; Silva, 2024; Souza et al., 2024).

O sítio do Pará apresentou uma precipitação anual 24,9% superior à de Mato Grosso (Figura 2). Como a teca responde positivamente à maior disponibilidade hídrica (Buajan et al., 2023), esse maior volume de chuvas indica condições mais favoráveis ao crescimento, o que se refletiu no incremento da densidade do lenho. De fato, o crescimento da espécie e as propriedades do lenho são influenciadas pela precipitação (Hlaing et al. 2014; Moya e Tenorio, 2021). Durante o período correspondente à estação de crescimento (outubro a abril), o sítio do Pará também registrou maior média mensal de chuvas em comparação ao de Mato Grosso (Figura 2), reforçando a maior disponibilidade hídrica. Essa condição favorece a formação de fibras com paredes celulares espessas, o que contribui para o incremento da densidade do lenho nas árvores cultivadas no Pará.

Além disso, as características edáficas (Tabela 1) também contribuíram para a maior densidade do lenho nas árvores do Pará, já que as condições de solo desse sítio se aproximam dos parâmetros ideais para o desenvolvimento da teca, conforme indicado por Jerez-Rico e Coutinho (2017). Considerando a textura argilosa do sítio de Mato Grosso, esses solos se caracterizam pela alta capacidade de retenção de água e nutrientes, além da boa fertilidade natural (Vieira, 1988). Entretanto, apresentam drenagem lenta, alto risco de compactação, baixa aeração e desenvolvimento radicular limitado (Vieira, 1988). Já o solo do sítio do Pará, com textura argilo-arenosa, possui boa retenção de água, drenagem média e pode apresentar boa capacidade de troca de cátions (Vieira, 1988). Quanto à textura, o ideal para o cultivo da teca é a predominância de areia sobre argila (Gava, 2023; Pelissari et al., 2014), padrão identificado no sítio do Pará.

Com base nos percentuais de areia e argila apresentados por Jerez-Rico e Coutinho (2017), o solo de Mato Grosso possui boa quantidade de argila, mas areia em nível inadequado para o cultivo. Já o solo do Pará tem boa argila e está no limite entre adequado e marginal quanto à areia. Outro fator edáfico que demonstrou discrepância entre os sítios, foi quanto a concentração de Mn. Altos teores de Mn no solo podem prejudicar o desenvolvimento da teca, por ativar o ácido indol acético-oxidase, que compromete a auxina (Marschner, 2012; Gava, 2023). Nos sítios avaliados, o solo de Mato Grosso apresentou teor de Mn superior ao Pará. Dessa forma, o sítio de Mato Grosso apresenta fatores que possivelmente limitaram o pleno desenvolvimento da teca, enquanto as condições mais favoráveis do sítio do Pará, associadas a maior disponibilidade hídrica, resultaram em lenho de maior densidade.

A idade cambial também teve efeito significativo na densidade do lenho (p -valor $< 0,05$). De forma isolada, independentemente do sítio, a densidade aumenta com a idade da árvore, com um acréscimo médio de $0,007 \text{ g/cm}^3$ por ano (Tabela 9), relacionando o aumento da idade ao incremento da densidade do lenho, resultando em 15 anos, em um aumento estimado de $0,105 \text{ g/cm}^3$. Esse padrão é visível na Figura 15, com aumento gradual da densidade ao longo dos anéis de crescimento.

Na direção radial, a densidade do lenho do material do Pará apresentou menor variação, com coeficiente de variação de 3,16%, indicando maior estabilidade nesse parâmetro, em comparação à teca de Mato Grosso, cujo coeficiente de variação foi de 4,98% (Figura 14). Embora ocorram variações radiais, observa-se que a diferença na oscilação de densidade aparente entre anéis de crescimento para os dois sítios foi sutil. Em Mato Grosso, a densidade variou em média $0,088 \text{ g/cm}^3$, com valores entre $0,501$ e $0,696 \text{ g/cm}^3$. No Pará, a variação não ultrapassou $0,065 \text{ g/cm}^3$, com densidades entre $0,565$ e $0,685 \text{ g/cm}^3$. Essa variação foi inferior à encontrada por Silva (2024), que observou variação de $0,200 \text{ g/cm}^3$ para teca em Mato Grosso aos 22-23 anos. Isso sugere que, embora o material aqui avaliado seja mais jovem, produziu lenho mais homogêneo. Ressalta-se que Silva (2024) avaliou teca de origem seminal, enquanto este estudo analisou material clonal, pode indicar superioridade genética em termos de densidade e homogeneidade. Assim, esse resultado reforça a importância do melhoramento genético para a produção de material mais homogêneo, atendendo melhor às exigências da indústria.

Já a altura, exerceu efeito significativo na densidade do lenho apenas em 2,7 m (Tabela 9), ocorrendo redução média de $0,066 \text{ g/cm}^3$ em relação à base da árvore (0,1 m) (p -valor $< 0,05$). Nas demais alturas (5,4 m e 8,1 m), não houve efeito significativo (p -valor $> 0,05$) (Tabela 8). Assim, a principal variação na densidade ocorre na porção inicial da árvore, estabilizando em alturas superiores. Adutwum et al. (2023) e Gil et al., (2018) descreveram comportamento similar. E ainda, Boschetti et al. (2020) discutindo sobre as variações longitudinais na densidade do lenho de eucalipto, destacou esse comportamento recorrente. Essa redução observada entre a base da árvore (0,1 m) e a altura 2,7 m é associada a sustentação da árvore. No geral, proporções próximas apresentam maior densidade para suprir a necessidade de sustentação estrutural, realizando o espaçamento da parede celular das suas fibras. Após suprir essa necessidade, a árvore inicia sua tendência de crescimento com células mais delgadas, fazendo com que tenha um declínio acentuado entre a densidade do lenho da base (0,1m) para alturas ainda iniciais (2,7 m) (Boschetti et al., 2020).

Houve interação significativa entre sítio e idade cambial (p -valor $< 0,05$), indicando que o aumento da densidade com a idade varia entre os sítios. Embora a teca no Pará apresente densidade média por anel superior à do Mato Grosso (Tabela 9), o incremento da densidade com a idade é menos expressivo. No Pará, a densidade já é elevada em árvores jovens, enquanto em Mato Grosso o aumento ocorre de forma mais acentuada à medida que a idade cambial aumenta. Esse padrão pode estar relacionado com as condições mais favoráveis de crescimento do sítio do Pará.

A interação entre altura e idade cambial também foi significativa (p -valor $< 0,05$), indicando que, em posições mais altas do fuste, o efeito da idade cambial sobre o aumento da densidade do lenho é menos evidente. Esse comportamento era esperado, como descrito por Cahuana et al. (2023), uma vez regiões mais próximas a base da árvore apresentam maior proporção de lenho adulto, que apresenta densidade superior. Essa está relacionada à necessidade da árvore garantir a sustentação e a biomecânica (Câmara et al., 2020).

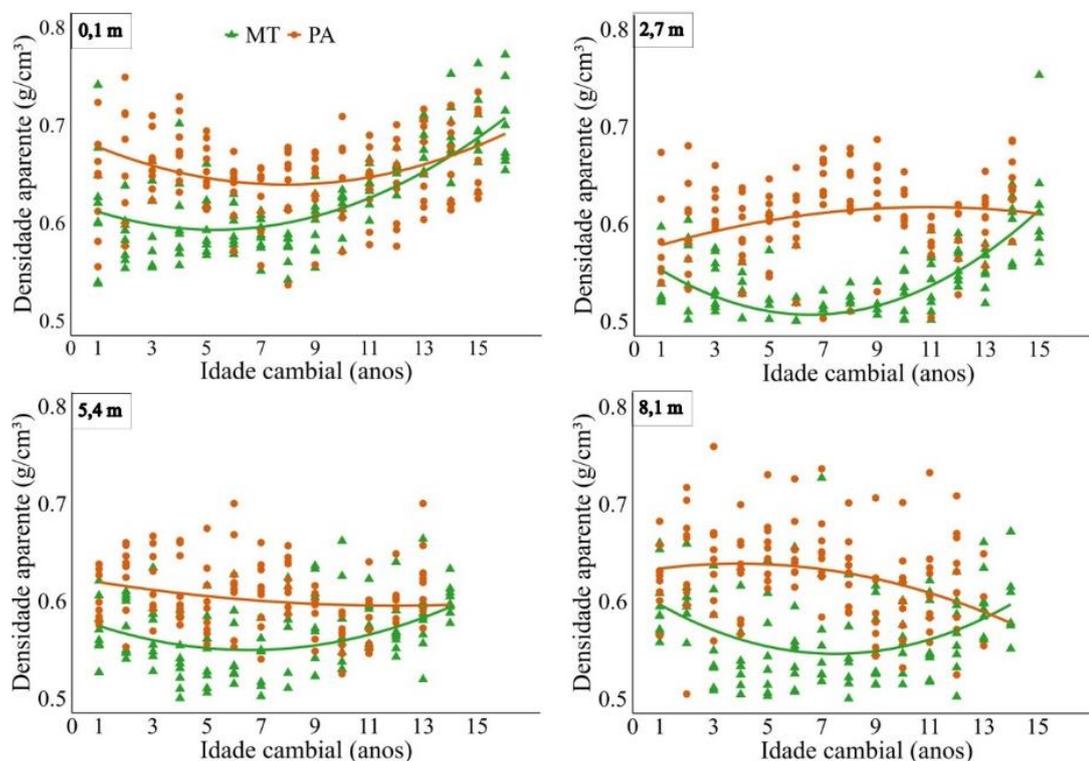
Diante do efeito significativo do sítio e das interações com altura e idade cambial, a Tabela 10 apresenta os coeficientes dos modelos ajustados para descrever a variação da densidade do lenho de teca. A Figura 15 apresenta a variação da densidade do lenho em função da idade cambial para os dois sítios, em diferentes alturas do fuste.

Tabela 10. Coeficientes dos modelos quadráticos para densidade do lenho de *Tectona grandis* e estatísticas de ajuste por altura em cada localidade

Mato Grosso									
Altura (m)	Estatística			R ²	R ² _{aj}	S _{yx}	S _{yx} %	AIC	BIC
	β_0	β_1	β_2						
0,1	0,62*	-0,01*	0,001*	0,55	0,54	0,03	3,46	- 555,22	- 543,34
2,7	0,57*	-0,02*	0,002*	0,50	0,49	0,03	3,21	- 540,27	- 528,65
5,4	0,58*	-0,01*	0,001*	0,15	0,14	0,04	3,56	- 478,07	- 466,73
8,1	0,61*	-0,02*	0,001*	0,14	0,12	0,04	4,40	- 414,20	- 402,95
Pará									
Altura (m)	Estatística			R ²	R ² _{aj}	S _{yx}	S _{yx} %	AIC	BIC
	β_0	β_1	β_2						
0,1	0,69*	-0,01*	0,001*	0,08	0,06	0,04	4,48	-450,53	- 438,91
2,7	0,57*	0,01*	-0,0004 ^{ns}	0,06	0,04	0,05	4,54	- 416,69	- 405,34
5,4	0,62*	-0,005 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	0,04	0,02	0,03	3,49	- 447,96	- 436,91
8,1	0,63*	0,005 ^{ns}	-0,0006 ^{ns}	0,06	0,04	0,05	4,79	-354,48	-343,64

^{ns}: Não significativo ao nível de 5% de significância; *: Significativo ao nível de 5% de significância. β_0 , β_1 , β_2 : coeficientes do modelo quadrático; R²: coeficiente de determinação; R²_{aj}: coeficiente de determinação ajustado; S_{yx}: erro padrão da estimativa; AIC: critério de Informação de Akaike; BIC: critério de Informação Bayesiano.

Figura 15. Variação da densidade do lenho em função da idade cambial em diferentes alturas das árvores de *Tectona grandis* de plantações em Mato Grosso e Pará, Brasil



As estatísticas dos modelos mostraram tendências distintas entre os dois sítios ao longo das alturas. Em Mato Grosso, na base (0,1 m), o modelo explicou 55% da variabilidade dos dados, com erro padrão baixo e AIC e BIC negativos, indicando bom ajuste (Tabela 10). Porém, a partir de 2,7 m, houve redução na capacidade do modelo de explicar a variabilidade, embora os demais parâmetros se mantivessem estáveis. No Pará, na altura de 0,1 m, embora o erro fosse baixo, a explicação da variabilidade foi mínima ($R^2 = 0,08$), configurando um ajuste fraco, o que se manteve nas demais alturas. Assim, o modelo para o Pará apresentou desempenho inferior, enquanto em Mato Grosso o modelo alcançou bom ajuste ao longo das alturas.

As curvas indicam que o sítio influencia de maneira distinta a variação radial da densidade do lenho em diferentes posições longitudinais do fuste (Figura 15). No Pará, a teca apresentou aumento na densidade na altura mais próxima a base (0,1 m), associada ao avanço da idade cambial, indicando maior proporção de lenho adulto nessa região. A variação da densidade ao longo do fuste reflete a interação entre as condições do ambiente e a posição longitudinal, manifestada na distribuição de biomassa ao longo da árvore.

Os valores de R^2 indicam quanto as curvas ajustadas explicam a variação da densidade em função da idade cambial nos dois sítios. No Mato Grosso, os R^2 moderados, principalmente

para 0,1 m e 2,7 m, mostram que os modelos conseguem representar parcialmente o padrão de variação da densidade. Em contraste, no Pará, os R^2 foram baixos, apesar dos erros padrão reduzidos, sugerindo que a variação radial da densidade é pouco explicada pela idade cambial. Esse resultado corresponde à menor variação radial da densidade nesse sítio, reforçando a hipótese de que, nesse sítio, a densidade é menos dependente da idade cambial e mais homogênea.

5.5.3 Variação da densidade do lenho ao longo da altura

A densidade do lenho, ponderada pela seção do disco, diferiu significativamente entre os sítios ($p < 0,05$). A altura também influenciou significativamente a densidade ($p < 0,05$). No entanto, não houve interação significativa entre os fatores sítio e altura ($p > 0,05$) (Tabela 11). Os desdobramentos dos efeitos principais estão detalhados na Tabela 12, para comparação das médias entre as diferentes alturas do fuste e os sítios.

Tabela 11 - Análise de variância dos efeitos do sítio e da altura na densidade do lenho de *Tectona grandis*

Fonte de variação	Graus de Liberdade	F-valor	p-valor
Sítio (PA vs MT)	1	83,740	$3,09e^{-13}$ *
Altura	3	17,313	$2,43 e^{-13}$ *
Local \times Altura	3	1,894	0,139 ^{ns}

^{ns}: Não significativo ao nível de 5% de significância; *: Significativo ao nível de 5% de significância

Tabela 12 - Densidade média do lenho de *Tectona grandis* de rápido crescimento, ponderada pela seção do disco, em diferentes alturas do fuste, nos sítios de Mato Grosso e Pará

Altura	Densidade (g/cm ³)	
	Mato Grosso	Pará
0,1 m	0,614 ^(0,022) a	0,650 ^(0,025) a
2,7 m	0,538 ^(0,023) b	0,604 ^(0,025) c
5,4 m	0,565 ^(0,025) b	0,615 ^(0,022) bc
8,1 m	0,568 ^(0,037) b	0,642 ^(0,028) ab
Média	0,571 ^(0,027) B	0,628 ^(0,025) A

^(...)Desvio padrão. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, para cada local, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Médias seguidas por diferentes letras maiúsculas indicam diferenças significativas entre os locais.

Avaliando a variação longitudinal da densidade ponderada do lenho (Tabela 12), observou-se que a base das árvores (0,1 m) apresentou os maiores valores de densidade tanto em Mato Grosso quanto no Pará, enquanto a altura de 2,7 m exibiu os menores valores em ambos os sítios. As alturas de 5,4 m e 8,1 m apresentaram valores intermediários. Destaca-se

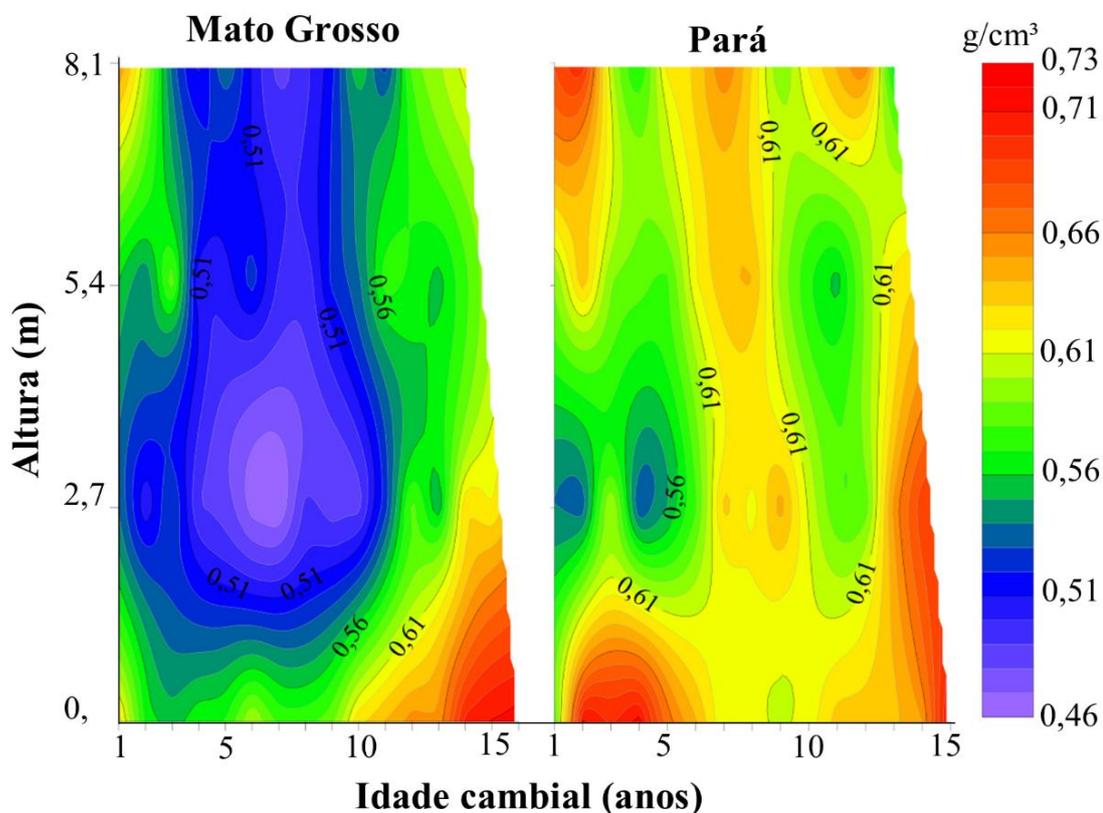
que, no Pará, a densidade do lenho a 8,1 m não diferiu significativamente da base. No sítio de Mato Grosso, a variação longitudinal da densidade foi menos acentuada. Dessa forma, a primeira tora comercial tende a apresentar densidade superior, enquanto a segunda e a terceira toras exibem valores semelhantes entre si, resultando em maior homogeneidade na densidade do lenho ao longo dessas seções.

Pequenas diferenças são observadas entre os valores de densidade apresentados na Tabela 11 e Tabela 12, que ocorrem devido a Tabela 12 apresentar as densidades médias ponderadas por seção em cada altura, enquanto na Tabela 11 os valores correspondem às médias ajustadas pelo modelo. Assim, considerando o valor médio ponderado, o sítio influenciou na densidade do lenho conforme discutido anteriormente, com as árvores de teca do Pará sendo mais densas que as árvores do sítio de Mato Grosso.

Em termos gerais, a classe de solo do sítio do Pará (argilossolo vermelho-amarelo distrófico) foi indicado por Kreitlow et al. (2014) como apto para o cultivo da teca, com as devidas correções químicas para potencializar a produtividade. Entretanto, a aptidão do solo do sítio de Mato Grosso (nitossolo vermelho distrófico) para o plantio de teca, não é mencionado na literatura. Porém, a classe de solo não é o principal fator determinante para o pleno desenvolvimento da teca, com outras propriedades e características edáficas também importantes (Jerez-Rico e Coutinho, 2017; Gava, 2023). Nos dois sítios, o lenho da teca alcançou densidade satisfatória, contudo, como o sítio do Pará possui algumas características edafoclimáticas exigidas pelo pleno desenvolvimento da teca, como elevada precipitação e solo bem drenado, de modo que as condições desse sítio favorecem o desenvolvimento de lenho de maior densidade.

A densidade do lenho variou menos longitudinalmente no sítio de Mato Grosso, que também apresentou valores inferiores aos observados no Pará (Figura 16). Radialmente, em ambos os sítios, a densidade aumentou da medula para a casca, com menor variação no Pará (Figura 16). De forma geral, a densidade foi mais elevada na base, reduziu-se na direção da altura 2,7 m e, em seguida, manteve-se estável em Mato Grosso, enquanto nas árvores do Pará, após a redução em 2,7 m a tendência foi de aumento na densidade (Tabela 12). Comportamento similar foi observado por Gil et al., (2018) avaliando as variações longitudinais de *Tectona grandis* aos 7 anos e por Paes et al. (2015) caracterizando lenho juvenil de teca.

Figura 16. Variação radial e longitudinal da densidade aparente do lenho de *Tectona grandis* nos sítios de Mato Grosso e Pará, Brasil



Visando melhor aproveitamento, recomenda-se para as toras de teca produzidas no sítio do Pará, a adoção de sortimentos com base na densidade da madeira, agrupando as toras em faixas mais homogêneas conforme as exigências do mercado. Essa recomendação considera as condições deste estudo, pois práticas como adubação, desbaste e variações climáticas podem afetar a densidade e, portanto, exigir ajustes em outros sítios. No sítio de Mato Grosso, observou-se que, a partir da primeira tora, as demais apresentaram densidades estatisticamente similares, favorecendo um aproveitamento mais uniforme. Diferenças na faixa de variação como as observadas entre os sítios podem impactar tanto as propriedades tecnológicas quanto o valor comercial da madeira, reforçando a importância do sortimento para fins industriais.

Os valores de densidade aparente obtidos para o lenho de teca neste estudo (Tabela 12; Figura 16) são condizentes com as médias reportadas na literatura. Souza et al., (2024), ao avaliarem a densidade aparente do lenho de teca aos 13 anos, em duas regiões de Mato Grosso, Brasil, observaram influência significativa do sítio e encontraram valores médios de 0,535 g/cm³ (material seminal) a 0,618 g/cm³ (material clonal). Amodei et al. (2021), utilizando microdensitometria de raios-x no lenho de teca aos 11 anos, encontraram valores entre 0,562

a 0,581 g/cm³, de acordo com o espaçamento entre plantas. Enquanto que Curvo et al., (2024), também por meio da microdensitometria de raios-x, avaliaram o lenho de teca com 15 anos e encontraram densidade média de 0,630 g/cm³.

O lenho de teca dos dois sítios apresentou densidade moderada, conforme a classificação proposta por Csanády et al. (2015), que considera o intervalo de 0,500 a 0,750 g/cm³ para essa classe. Dessa forma, a madeira clonal de teca dos sítios do Pará e Mato Grosso é indicada para aplicações que não exigem elevada resistência mecânica, mas requerem densidade intermediária, sendo recomendada para usos nobres como movelaria, construção civil leve em peças não estruturais como revestimentos, forros e esquadrias, pisos, decks e indústria naval.

5.6 Relação da largura dos anéis de crescimento e densidade do lenho de *Tectona grandis*

A relação entre taxa de crescimento e qualidade do lenho é amplamente discutida na literatura (Chambi-Legoas et al., 2021; Zhang et al., 2022), com estudos que frequentemente indicam que anéis de crescimento mais largos estão associados a menor densidade do lenho (Locosselli et al., 2017). Contudo, essa relação não se aplica de forma universal. Em espécies com porosidade em anel, a densidade pode estar positivamente ou negativamente associada à taxa de crescimento, de acordo com a espécie e grupo que pertence (Angiosperma ou Gimnospermas). Enquanto em espécies de porosidade difusa, ou ainda em anéis semiporosos, são independentes ou pouco relacionadas para diversas espécies tropicais, sem ainda um consenso claro sobre essa relação (Fukazawa, 1983; Zobel e Buijtenen, 1989; Saranpää, 2003 Tavares et al., 2013).

Essas generalizações têm impacto direto na valorização comercial da teca, uma vez que o lenho de rápido crescimento é comumente comercializado com valores inferiores às de crescimento lento, sendo a suposta menor densidade um dos principais argumentos. Assim, buscando entender como a largura dos anéis de crescimento afeta a densidade do lenho de teca, a Tabela 13 apresenta os coeficientes do modelo de regressão linear entre essas variáveis. A Figura 17 ilustra essa relação, considerando a idade cambial e os dois sítios.

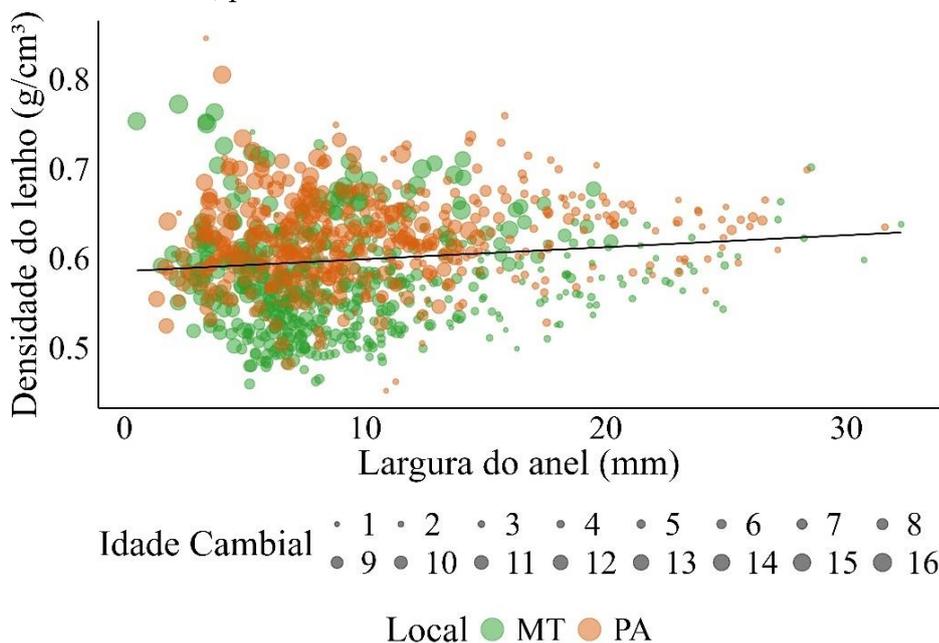
Ao considerar os dois sítios, foi observada uma correlação positiva fraca, mas significativa, entre a largura dos anéis de crescimento e a densidade do lenho (Tabela 13). Isso indica que, à medida que a largura dos anéis aumenta, a densidade do lenho também tende a aumentar. Em contraste, Silva (2024) observou correlação negativa entre essas variáveis, porém sem significância (p -valor > 0,05).

Tabela 13. Coeficientes do modelo linear da largura dos anéis de crescimento de *Tectona grandis* em função da densidade

Modelo	β_0	β_1	R^2	R^2_{aj}	S_{yx}	$S_{yx}\%$	AIC	BIC	r
Densidade ~ Largura do anel	0,586*	0,001*	0,016	0,015	0,06	9,6	-2919,6	-2904,8	0,13*

*: Significativo ao nível de 5% de significância. β_0 e β_1 : coeficientes do modelo linear; R^2 : coeficiente de determinação; R^2_{aj} : coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} : erro padrão da estimativa; AIC: critério de Informação de Akaike; BIC: critério de Informação Bayesiano; r: correlação de Pearson.

Figura 17. Relação entre a largura dos anéis de crescimento e a densidade do lenho de *Tectona grandis*, por idade cambial, para as árvores de Mato Grosso e Pará



A Figura 17 mostra grande variabilidade na distribuição dos pontos, com densidade do lenho oscilando entre 0,45 e 0,85 g/cm³ e a largura dos anéis entre 1 mm e cerca de 32 mm. A dispersão dos dados, sem uma tendência clara, indica que a densidade do lenho é influenciada por outros fatores além da largura dos anéis. Essa variabilidade é mais evidente nas árvores de teca do Pará (Figura 17), onde há maior ocorrência de valores extremos, principalmente densidades mais altas. Isso se reflete nos maiores valores de densidade observados nesse sítio e no menor efeito da largura dos anéis na densidade do lenho.

Quanto à idade cambial as maiores larguras de anel se concentram nos primeiros anos, enquanto densidades mais altas aparecem de forma mais dispersa ao longo das idades (Figura 17). Assim, embora a largura dos anéis diminua com o avanço da idade, a densidade não segue uma tendência linear, apresentando valores moderados já nas idades iniciais.

A independência entre a largura dos anéis de crescimento e a densidade do lenho observada (Figura 17; Tabela 13) pode ser explicada pela anatomia do lenho da teca, que

apresenta anéis semi-porosos. Nessa condição, a densidade do lenho inicial tende a apresentar baixa variação, enquanto anéis de crescimento mais largos concentram maior quantidade de lenho tardio, que se caracteriza por vasos menos frequentes e de menor diâmetro (Zobel e Buijtenen, 1989; Esteban et al., 2024). Esses aspectos contribuem na discussão de que o aumento na largura dos anéis não está relacionado com a redução na densidade.

Com base nos resultados observados ao longo do trabalho, apesar das comparações entre a densidade do lenho inicial e do lenho tardio confirmarem a existência de diferenças entre esses dois tecidos, a amplitude entre os valores médios é relativamente baixa, de modo que as densidades do lenho inicial e tardio são aproximadas. Então, apesar da variação interanual, o lenho tardio corresponde a um percentual menor do lenho (Figura 12 e 13), tornando essa diferença pouco expressiva considerando todo o anel. Assim, a distinção entre lenho inicial e tardio não é suficiente para estabelecer uma tendência em que anéis mais largos, que consequentemente possuem maior percentual de lenho inicial, sejam menos densos que anéis mais estreitos, com maior percentual de lenho tardio.

Com isso, os resultados demonstram que mesmo em regime de crescimento rápido, a teca foi capaz de manter densidade satisfatória no lenho inicial, que representa a maior proporção do lenho produzido. Isso sugere uma boa eficiência no uso dos recursos disponíveis por parte da árvore, de modo que permitiu o crescimento acelerado sem comprometer a qualidade do lenho. Esse comportamento é reforçado pela ausência de tendência linear entre a largura dos anéis de crescimento e a densidade do lenho, considerando que mesmo anéis largos apresentaram densidade semelhante à de anéis mais estreitos (Figura 17).

Com a elevada disponibilidade de recursos no início da estação de crescimento, as árvores investem mais na produção de tecidos, resultando em taxas de crescimento elevadas, como observado nos sítios de Mato Grosso e Pará. Consequentemente, as árvores são capazes de produzir mais células com os recursos fisiológicos disponíveis sem comprometer a densidade do lenho, o que resulta numa relação fraca ou até mesmo independente entre largura dos anéis de crescimento e densidade do lenho. Fajardo (2016) observou que árvores com taxas de crescimento significativamente diferentes não apresentaram diferenças na densidade do lenho, e que a densidade do lenho não sofreu efeito da largura dos anéis.

Adicionalmente, a hipótese confirmada pelos resultados obtidos, de que anéis mais largos, não reduzem a densidade do lenho, está relacionada ao que foi discutido por Zobel e Buijtenen (1989). Os autores apontaram que em folhosas com porosidade em anel, a densidade tende a aumentar em anéis mais largos, devido à menor proporção de lenho poroso no início do

anel. Na *Tectona grandis*, como observado, por sua porosidade em anéis semiporoso, a densidade tende a se manter estável e aumentar em anéis mais largos, pela menor fração de lenho poroso na fase inicial da formação do lenho inicial.

Dessa forma, como representado na Figura 17, independentemente do sítio, não há um padrão consistente que indique uma relação direta entre as variáveis avaliadas. Apesar do manejo favorecer o rápido crescimento e a formação de anéis mais largos, esse aumento não resultou em redução significativa da densidade do lenho. Assim, para o clone avaliado entre 15 e 16 anos, independentemente do local de plantio, o crescimento acelerado não comprometeu a densidade do lenho.

Com os resultados obtidos ao longo deste trabalho, foi possível compreender padrões relacionados às condições de crescimento que influenciam as características do lenho. Além disso, fatores internos, como o crescimento radial e longitudinal, também exercem influência na formação do lenho, refletindo em variações nas suas propriedades. Embora essas variações sejam significativas em diversos parâmetros, elas não desqualificam o uso da madeira de teca.

As propriedades do lenho de teca de rápido crescimento, embora distintas das de lenho de crescimento lento relatadas na literatura, têm alcançado densidade satisfatória para a maioria dos usos tradicionais. O rápido crescimento não compromete a qualidade do lenho, e representa uma alternativa viável para atender à demanda crescente por madeira de teca, reduzindo a pressão sobre a exploração nativa e suprimindo as necessidades do mercado.

As variações nas propriedades do lenho entre sítios e árvores, especialmente a densidade, impactam diretamente o uso da madeira na indústria. Diferenças nas condições de crescimento resultam em comportamentos distintos durante o processamento, secagem e usinagem (Albuês et al., 2024). Em sítios com maior homogeneidade radial, como no Pará, espera-se melhor desempenho em serrarias, com acabamento mais uniforme e menor incidência de defeitos. Por outro lado, a variação longitudinal pode comprometer a uniformidade das peças e dificultar a secagem, reduzindo o rendimento industrial. Assim, a teca do sítio de Mato Grosso por ser mais uniforme longitudinalmente, favorece a automatização, mas apresenta desafios no processamento devido à variação radial. Conhecer o material e as condições de crescimento é, portanto, essencial para o planejamento do sortimento, otimização da secagem e processamento, e direcionamento do produto.

6 CONCLUSÕES

O trabalho avaliou a influência do sítio, da altura e da idade cambial nos anéis de crescimento e na densidade do lenho de tecas jovens plantadas em dois sítios. As características anatômicas do lenho de teca confirmam seu potencial para estudos de sazonalidade e crescimento.

O crescimento inicial instável, com anéis mais estreitos e densos externamente, e a redução gradual da largura dos anéis da medula à casca indicam alteração no desenvolvimento do lenho com a idade. As diferenças entre os sítios, especialmente na densidade e na largura dos anéis, reforçam a influência das condições de crescimento. No sítio do Pará, observaram-se maiores larguras nas alturas superiores (2,7 m, 5,4 m e 8,1 m) em comparação a Mato Grosso. A presença de listras negras no cerne necessita de estudos futuros sobre sua origem e impacto tecnológico.

A largura do lenho inicial reduziu na direção base-topo. Já a largura do lenho tardio foi maior nas árvores do Pará em comparação às de Mato Grosso, e constante nas alturas superiores. A densidade do lenho inicial foi maior no sítio do Pará, e a densidade do lenho tardio foi afetada apenas pela altura, com a base (0,1 m) apresentando maiores densidades que o topo (8,1 m). A partir do 12º ano ocorreu o início da formação do lenho adulto.

O sítio do Pará produziu teca com lenho mais denso que as árvores de Mato Grosso. Além disso, com o aumento da idade cambial, houve incremento na densidade. Radialmente, o sítio do Pará apresentou densidade mais homogênea, e longitudinalmente a base apresentou os maiores valores de densidade, com a teca de Mato Grosso sendo mais homogênea na direção base-topo.

As árvores de teca produzidas no sítio de Mato Grosso são mais homogêneas na variação da densidade longitudinalmente, enquanto as do Pará apresentam maior homogeneidade radialmente. Ambos os locais produziram lenho com densidade moderada e qualidade satisfatória para o exigente mercado da teca.

A relação entre largura dos anéis de crescimento e densidade do lenho indicaram que mesmo com crescimento acelerado e anéis mais largos, a densidade do lenho não foi comprometida. Este trabalho confirmou a hipótese de que as condições de crescimento influenciam a qualidade do lenho de *Tectona grandis* em plantações de rápido crescimento, e causam variações radiais e longitudinais. Assim, para o clone avaliado, o rápido crescimento das árvores não comprometeu a densidade do lenho.

REFERÊNCIAS

- ADUTWUM, J. O.; SAKAGAMI, H.; KOGA, S.; MATSUMURA, J. Space-time analysis of the longitudinal variation in wood specific gravity of teak and its effect on tree growth and development. **BioResources**, 18, n. 2, p. 2670-2692, 2023. DOI: DOI: 10.15376/biores.18.2.2670-2692.
- ALBUÊS, T. A. S.; PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. G.; MÔRA, R.; OLIVEIRA, A. C. Quality of *Tectona grandis* for sawn wood production. **Maderas-Cienc Tecnol**, 26, p. 1-16, 2023. DOI: 10.22320/s0718221x/2024.06.
- AMOAHAH, M.; INYONG, S. Comparison of some physical, mechanical and anatomical properties of smallholder plantation teak (*Tectona grandis* Linn. f.) from dry and wet localities of Ghana. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, 16, n. 2, p. 125-138, 2019. DOI: 10.1007/s13196-019-00248-7.
- AMODEI, J. B.; LATORRACA, J. V. d. F.; SANTOS, G. C. V. d.; MARTINS, B. C. Wood Quality of Young Teak in Different Planting Spaces. **Floresta e Ambiente**, 28, n. 4, 2021. DOI: 10.1590/2179-8087-FLORAM-2021-0026.
- ANISH, M. C.; ANOOP, E. V.; VISHNU, R.; SREEJITH, B.; JJEESH, C. M. Effect of growth rate on wood quality of teak (*Tectona grandis* L. f.): a comparative study of teak grown under differing site quality conditions. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, 12, n. 1, p. 81-88, 2015. DOI 10.1007/s13196-015-0147-1.
- ARYAPRATAMA, R.; PAULIUK, S. Life cycle carbon emissions of different land conversion and woody biomass utilization scenarios in Indonesia. **Sci Total Environ**, 805, p. 150226, Jan 20 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150226.
- BAHTIAR, E. T.; KIM, N.-H.; ISWANTO, A. H. Biological Rotation Age of Community Teak (*Tectona grandis*) Plantation Based on the Volume, Biomass, and Price Growth Curve Determined through the Analysis of Its Tree Ring Digitization. **Forests**, 14, n. 10, 2023. DOI: 10.3390/f14101944.
- BARRANTES-MADRIGAL, K.; MURILLO-CRUZ, R.; ÁVILA-ARIAS, C.; FONSECA-GONZÁLEZ, W.; BARQUERO-ELIZONDO, A. I. Tabla de volumen comercial para teca clonal en diferentes índices de sitio en la Zona Norte de Costa Rica. **Revista de Ciencias Ambientales**, 55, n. 1, p. 211-229, 2021. DOI: 10.15359/rca.55-1.10.
- BATTIPAGLIA, G.; CAMPELO, F.; VIEIRA, J.; GRABNER, M.; DE MICCO, V.; NABAIS, C.; CHERUBINI, P.; CARRER, M.; BRÄUNING, A.; ČUFAR, K.; DI FILIPPO, A.; GARCÍA-GONZÁLEZ, I.; KOPROWSKI, M.; KLISZ, M.; KIRDYANOV, A. V.; ZAFIROV, N.; DE LUIS, M. Structure and function of intra-annual density fluctuations: mind the gaps. **Frontiers in plant science**, v. 7, p. 595, 2016. DOI: 10.3389/fpls.2016.00595
- BECK, H. E.; ZIMMERMANN, N. E.; MCVICAR, T. R.; VERGOPOLAN, N.; BERG, A.; WOOD, E. F. Present and future Koppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. **Sci Data**, 5, p. 180214, Oct 30 2018. DOI: 10.1038/sdata.2018.214.

BEHLING, M.; WRUCK, F. J. Sistemas de integração com teca. *In: REIS, C. A. F. et al.* (Ed.). **Teca (*Tectona grandis* L. f.) no Brasil**. Brasília - DF: Embrapa Florestas, 2023. v. 1, p. 384-427.

BERROCAL, A.; GAITAN-ALVAREZ, J.; MOYA, R.; FERNÁNDEZ-SÓLIS, D.; ORTIZ-MALAVASSI, E. Development of heartwood, sapwood, bark, pith and specific gravity of teak (*Tectona grandis*) in fast-growing plantations in Costa Rica. **Journal of Forestry Research**, 31, n. 2, p. 667-676, 2018. DOI: 10.1007/s11676-018-0849-5

BOSCHETTI, W. T. N.; VIDAURRE, G. B.; SILVA, J. G. M. d. Densidade e sua variação na madeira de eucalipto. *In: VIDAURRE, G. B. et al.* (Ed.). **Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil**. Vitória: UFES, 2020. v. 1, cap. 5, p. 132-170.

BRITO, A. S.; SILVA, J. G. M. d.; VIDAURRE, G. B.; TRUGILHO, P. F. Influência da idade nas propriedades da madeira de eucalipto. *In: VIDAURRE, G. B.; SILVA, J. G. M. d., et al* (Ed.). **Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil**. Vitória: EDUFES, 2020. cap. 4, p. 103-131.

BUAJAN, S.; SONGTRIRAT, P.; MUANGSONG, C. Relationship of Cambial Activity and Xylem Production in Teak (*Tectona grandis*) to Phenology and Climatic Variables in North-Western Thailand. **Journal of Tropical Forest Science**, 35, n. 2, p. 141-156, 2023. DOI: 10.26525/jtfs2023.35.2.141.

BUDIADI, W.; ISHII, H. Response of a clonal teak plantation to thinning and pruning in Java, Indonesia. **Forest Research Institute Malaysia**, 29, n. 1, p. 44-53, 2017.

CAHUANA, L. A. P.; PIÑA, E. A. G.; TUESTA, G. P.; TOMAZELLO-FILHO, M. Radial variation of wood density and fiber morphology of two commercial species in a tropical humid forest in Southeastern Peru. **Cerne**, 29, 2023. DOI: 10.1590/01047760202329013143.

CÂMARA, A. P.; VIDAURRE, G. B.; MOULIN, J. C.; BOBADILHA, G. d. S. A relação cerne e alborno na madeira de eucalipto. *In: VIDAURRE, G. B. et al* (Ed.). **Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil**. Vitória: EDUFES, 2020. v. 1, cap. 3, p. 70-102.

CAMEL, V.; GALEANO, E. Molecular Physiology of Teak. *In: RAMASAMY, Y. et al* (Ed.). **The Teak Genome**: Springer Cham, 2021. cap. 14, p. 219-236. (Compendium of Plant Genomes).

CAMPOS, C. M.; HOFFMANN, W. R.; CORREIA, F. dos S.; LENGOWSKI, E. C.; SILVA, M. J. da; NATALINO, R.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C. Radial Variation in Colorimetric Parameters, Chemical Composition, and Biological Resistance of Teak Wood Extracted from 13- and 22-Year-Old Teak Trees. **Forests**, 16, n. 1, 2025. DOI: 10.3390/f16010177

CARDOSO, S.; SOUSA, V. B.; QUILHÓ, T.; PEREIRA, H. Anatomical variation of teakwood from unmanaged mature plantations in East Timor. **Journal of Wood Science**, 61, n. 3, p. 326-333, 2015. DOI 10.1007/s10086-015-1474-y.

CARMO, F. H. D. J. d.; LATORRACA, J. V. d. F.; VOLPATO, M.; SANTOS, G. C. V. d.; SOUZA, P. P. d.; TAKIZAWA, F. H. Climate variations affect the growth period of young *Tectona grandis* Linn F. in the Amazon. **Acta Botanica Brasilica**, 36, 2022. DOI: 10.1590/0102-33062020abb0525.

CARMO, F. H. D. J. d.; VOLPATO, M.; ATAÍDE, G. C. V. d. S.; CASTRO, J. P.; TAKIZAWA, F. H.; LATORRACA, J. V. d. F. Wood traits of *Tectona grandis* during the 2015–2016 El Niño drought in the Amazon. **Canadian Journal of Forest Research**, 54, n. 7, p. 741-748, 2024. DOI: 10.1139/cjfr-2023-0179.

CASTRO, V. R. de; SURDI, P. G.; FERNANDES, S. A.; BERGER, M. da S.; ZANUNCIO, A. J. V.; ZANUNCIO, J. C.; ARAÚJO, S. de O. Chemical composition of heartwood and sapwood of *Tectona grandis* characterized by CG/MS-PY. **Sci Rep**, 12, n. 1, p. 18441, Nov 2 2022. DOI: 10.1038/s41598-022-22800-1.

CHAMBI-LEGOAS, R.; TOMAZELLO-FILHO, M.; VIDAL, C.; CHAIX, G. Wood density prediction using near-infrared hyperspectral imaging for early selection of *Eucalyptus grandis* trees. **Trees**, 37, n. 3, p. 981-991, 2023. DOI: 10.1007/s00468-023-02397-2.

CHELLIAH, B.; RAVI, A.; MUTHURASU, N. Modern Silvicultural Practices and Productivity of Teak. In: RAMASAMY, Y.; GALEANO, E., *et al* (Ed.). **The Teak Genome**: Springer Cham, 2021. cap. 3, p. 27-44. (Compendium of Plant Genomes).

CHIPANSHI, A. C.; FINDLATER, K. M.; HADWEN, T.; O' BRIEN, E. G. Analysis of consecutive droughts on the Canadian Prairies. **Climate Research**, 30, p. 175-187, 2006.

CONEGLIAN, A.; SEVERO, E. T. D.; BATISTA, W. R.; PEREIRA, I. M.; GOMES, I. da S. Rendimento e classificação das lâminas de *Eucalyptus grandis* W. Hill utilizando dois tratamentos térmicos. **Revista Espacios**, v. 38, n. 38, p. 14, 2017.

CSANÁDY, E.; MAGOSS, E.; TOLVAJ, L. **Quality of Machined Wood Surfaces**. Springer Cham, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-22419-0.

CURVO, K. R.; SILVA, G. A. O.; CASTRO, V. R.; GAVA, F. H.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C. Heartwood proportion and density of *Tectona grandis* L.f. wood from Brazilian fast-growing plantations at different ages. **European Journal of Wood and Wood Products**, 82, n. 2, p. 357-369, 2024. DOI: 10.1007/s00107-023-02031-5.

DARMAWAN, W.; NANDIKA, D.; SARI, R. K.; SITOMPUL, A. Juvenile and mature wood characteristics of short and long rotation teak in Java. **IAWA journal**, v. 36, n. 4, p. 428-442, 2015. DOI: 10.5555/20163009690.

DAMAYANTI, R.; DEWI, L. M.; OZARSKA, B.; ILLIC, J.; KRISDIANTO, G. P. Assessing ultrastructure and density properties to predict wood hardness of young fast grown plantation teak. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 935, n. 1, 2020. DOI: 10.3390/f15040669.

DIÉ, A.; KITIN, P.; KOUAMÉ, F. N.; BULCKE, J. Van den; ACKER, J. Van; BEECKMAN, H. Fluctuations of cambial activity in relation to precipitation result in annual rings and intra-

annual growth zones of xylem and phloem in teak (*Tectona grandis*) in Ivory Coast. **Ann Bot**, 110, n. 4, p. 861-873, 2012. DOI: 10.1093/aob/mcs145.

ESTEBAN, L. G.; PALACIOS, P. de; FERNÁNDEZ, F. G.; GASSON, P.; ESTEBAN, G. L. Hardwoods: Anatomy and Functionality of Their Elements—A Short Review. **Forests**, 15, n. 7, 2024. DOI: 10.3390/f15071162.

EVANS, P. D.; MATSUNAGA, H.; PRESTON, A. F.; KEWISH, C. M. Wood Protection for Carbon Sequestration — a Review of Existing Approaches and Future Directions. **Current Forestry Reports**, 8, n. 2, p. 181-198, 2022. DOI: 0.1007/s40725-022-00166-x.

FAJARDO, A. Wood density is a poor predictor of competitive ability among individuals of the same species. **Forest Ecology and Management**, 372, p. 217-225, 2016. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.04.022.

FIGUEIREDO, F. d. M. d. **Aplicação dos anéis de crescimento – dendrocronologia - na reconstrução do crescimento do tronco de árvores de *Tectona grandis* L.f., teca, de plantações dos estados do Mato Grosso e de São Paulo**. Orientador: TOMMASIELLO FILHO, M. T. 2021. 90 f. (Dissertação de mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

FUKAZAWA, K. Juvenile wood of hardwoods judged by density variation. **IAWA Bulletin**, 5, p. 65-73, 1984.

GAITAN-ALVAREZ, J.; MOYA, R.; BERROCAL, A. The use of X-ray densitometry to evaluate the wood density profile of *Tectona grandis* trees growing in fast-growth plantations. **Dendrochronologia**, 55, p. 71-79, 2019. DOI: 10.1016/j.dendro.2019.04.004.

GAVA, F. H. **Atributos químicos do solo e da planta de *Tectona grandis* em diferentes idades**. 2023. 83 f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2023.

GIL, J. L. R. A.; BARBOZA, F. S.; CONEGLIAN, A.; SILVA, M. F. da; MORAES, M. D. A. de; SETTE JR., C. R. Características físicas e anatômicas da madeira de *Tectona grandis* L.f. aos 7 anos de idade. **Revista de Ciências Agrárias**, 41, n. 2, p. 529-538, 2018. DOI:10.19084/RCA17149.

GIUSTINA, L. D.; ROSSI, A. A. B.; VIEIRA, F. S.; TARDIN, F. D.; NEVES, L. G.; PEREIRA, T. N. S. Variabilidade genética em genótipos de teca (*Tectona grandis* Linn. F.) baseada em marcadores moleculares issr e caracteres morfológicos. **Ciência Florestal**, 27, p. 1311-1324, 2017. DOI: 10.5902/1980509829894.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer**. Versão 29.1.267. Golden: Golden Software, 2025.

HAO, J.; JIA, H.; YANG, B.; HUANG, G.; NIU, C.; LIANG, K.; HUANG, D.; MURALIDHARAN, E. M. Growth process and heartwood formation for planted teak (*Tectona grandis*) in South China. **Austrian Journal of Forest Science**, 2, p. 97–116, 2022.

HASSANPOOR-TICHI, A.; GHOLAMIYAN, H.; DIVKOLAE, M. R. Changes in Biometric, Density, and Microscopic Features of Parrotia persica Trees in Longitudinal and Radial Directions of the Stem. **BioResources**, 16, n. 2, p. 3563-3574, 2021.

HILLIS, W. E. Deposits in heartshakes in wood. **Wood Science and Technology**, 32, p. 129-137, 1998.

HITSUMA, G.; HIMMAPAN, W.; YAGIHASHI, T.; MIYAMOTO, K.; VACHARANGKURA, T. Effects of tree density and size symmetry of competition on diameter growth in the early stages of growth in planted teak (*Tectona grandis*) trees in northern Thailand. **Journal of Forest Research**, 26, n. 5, p. 321-327, 2021. DOI: 10.1080/13416979.2021.1902598.

HLAING, Z. C.; TEPLYAKOV, V. K.; THANT, N. M. L. Influence of climate factors on tree-ring growth in teak (*Tectona grandis*L. f.) plantations in the Bago Yoma Range, Myanmar. **Forest Science and Technology**, 10, n. 1, p. 40-45, 2014. DOI: 10.1080/21580103.2013.834275.

HOUSSET, J. M.; NADEAU, S.; ISABEL, N.; DEPARDIEU, C.; DUCHESNE, I.; LENZ, P.; GIRARDIN, M. P. Tree rings provide a new class of phenotypes for genetic associations that foster insights into adaptation of conifers to climate change. **New Phytologist**, 218, n. 2, p. 630-645, Apr 2018. DOI: 10.1111/nph.14968.

INDIRA, E. P.; BHAT, K. M. Effects of site and place of origin on wood density of teak (*Tectona grandis*) clones. **Journal of Tropical Forest Science**, 10, n. 4, p. 537-541 1998.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual 2024**. Brasília, DF: Iba, 2024. Disponível em: <https://iba.org/relatorio2024.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2025.

INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION. **Tropical Timber Market Report**. Yokohama: ITTO, v. 29, n. 11, 1-15 jun. 2025. Disponível em: https://www.itto.int/direct/topics/topics_pdf_download/topics_id=8359&no=1. Acesso em: 22 jun. 2025.

JACQUIN, P.; LONGUETAUD, F.; LEBAN, J.-M.; MOTHE, F. X-ray microdensitometry of wood: A review of existing principles and devices. **Dendrochronologia**, 42, p. 42-50, 2017. DOI: 10.1016/j.dendro.2017.01.004.

JEREZ-RICO, M.; COUTINHO, S. d. A. Planted Teak Forests. *In*: KOLLERT, W. e KLEINE, M. (Ed.). **The Global Teak Study**. Vienna: International Union of Forest Research Organizations (IUFRO), 2017. v. 36, cap. 5, p. 49-65.

JOSHI, V. C.; SUNDRIYAL, R. C.; CHANDRA, N.; ARYA, D. Unlocking nature's hidden treasure: Unveiling forest status, biomass and carbon wealth in the Binsar Wildlife Sanctuary, Uttarakhand for climate change mitigation. **Environmental Challenges**, 14, 2024. DOI: 10.1016/j.envc.2023.100825.

KALLARACKAL, J.; RAMÍREZ, F. Wood and Wood Density. *In*: **Functional Trait in Plants**: Springer, Cham, 2024.

KOLLERT, W.; KLEINE, M. Introduction. *In*: KOLLERT, W. e KLEINE, M. (Ed.). **The Global Teak Study**. Vienna: International Union of Forest Research Organizations (IUFRO), 2017. v. 36, cap. 2, p. 15-16.

KOLLERT, W.; SANDEEP, S.; SREELAKSHMY, M. P. **Global teak resources and market assessment 2022**. Vienna: IUFRO, 2024. (IUFRO World Series, v. 41).

KREITLOW, J. P.; NEVES, S. M. A. d. S.; NEVES, R. J.; SERAFIM, M. E. Avaliação geoambiental das terras do município brasileiro de Cáceres para o cultivo da teca. **RA'E GA**, 31, p. 53-68, 2014.

KUMI, J. A.; KYEREH, B.; ANSONG, M.; ASANTE, W. Influence of management practices on stand biomass, carbon stocks and soil nutrient variability of teak plantations in a dry semi-deciduous forest in Ghana. **Trees, Forests and People**, 3, 2021. DOI: 10.1016/j.tfp.2020.100049.

KWAME, O.B.; ADJEI, L. E.; RICHMOND, O. Assessing the growth performance of teak (*Tectona grandis* Linn. f.) coppice two years after clearcut harvesting. **International Journal of Agronomy and Agricultural Research (IJAAR)**, 5, n. 6, p. 36-41, 2014.

LARSON, P. R. **The Vascular Cambium Development and Structure**. Springer-Verlag, 1994. DOI: 10.1007/978-3-642-78466-8.

LIMA, I. L. d.; RANZINI, M.; LONGUI, E. L.; BARBOSA, J. d. A. Wood characterization of *Tectona grandis* L. F. cultivated in Brazil: a review of the last 30 years. **Research, Society and Development**, 10, n. 14, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i14.21549.

LOCOSSELLI, G. M. The cambium activity in a changing world. **Trees**, 32, n. 1, p. 1-2, 2017. DOI: 10.1007/s00468-017-1616-5.

LUKMANDARU, G.; TAKAHASHI, K. Variation in the natural termite resistance of teak (*Tectona grandis* Linn. fil.) wood as a function of tree age. **Annals of Forest Science**, 65, n. 7, p. 708-708, 2008.

MARQUES, J. D. **Compreensão dos efeitos da adubação, bifurcação e textura de solo no crescimento das árvores e qualidade do lenho de *Tachigali vulgaris* para bioenergia**. 2024. 162 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2024.

MARSCHNER, H. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. Academic press, 2012.

MARTHA, R.; ADIKURNIA, I. K.; BULCKE, J. Van den; ACKER, J. Van; DEKEGELEER, M.; GEORGE, B.; RAHAYU, I. S.; DARMAWAN, W.; GÉRARDIN, P. Investigating sapwood and heartwood density changes of short rotation teak wood after chemical and thermal modification using X-ray computed tomography. **Holzforschung**, 2025. DOI: 10.1515/hf-2025-0014.

MASCARENHAS, A. R. P.; SCCOTI, M. S. V.; MELO, R. R. de; CORRÊA, F. L. de O.; SOUZA, E. F. M. de; PIMENTA, A. S. Quality assessment of teak (*Tectona grandis*) wood

from trees grown in a multi-stratified agroforestry system established in an Amazon rainforest area. **Holzforschung**, 75, n. 5, p. 409-418, 2021. DOI: 10.1515/hf-2020-0082.

MICCO, V. De; CAMPELO, F.; LUIS, M. De; BRÄUNING, A.; GRABNER, M.; BATTIPAGLIA, G.; CHERUBINI, P. Intra-Annual Density Fluctuations in Tree Rings: How, When, Where, and Why? **IAWA Journal**, 37, n. 2, p. 232-259, 2016. DOI 10.1163/22941932-20160132.

MIRANDA, I.; SOUSA, V.; PEREIRA, H. Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from a mature unmanaged stand in East Timor. **Journal of Wood Science**, 57, n. 3, p. 171-178, 2011. DOI 10.1007/s10086-010-1164-8.

MOHAPATRA, A.; NAYAK, H.; DAS, O. Factors influencing establishment of teak (*Tectona grandis* Linn. f) plantation: A review. **e-planet**, 18, n. 1, p. 85-94, 2020.

MONTEUUIS, O.; GOH, D. Origin and global dissemination of clonal material in planted teak forests *In*: KOLLERT, W. e KLEINE, M. (Ed.). **The Global Teak Study**. Vienna: International Union of Forest Research Organizations (IUFRO), 2017. v. 36, cap. 3, p. 30-36.

MORAES, L. G.; LIMA, M. D. R.; ASSIS-PEREIRA, G.; GONÇALVES, D. de A.; VIDAURRE, G. B.; BUFALINO, L.; GUEDES, F. T. P.; TOMAZELLO-FILHO, M.; PROTÁSIO, T. de P. Forking and planting spacing impacts on wood density, X-ray density, and heartwood proportion of *Tachigali vulgaris*. **Trees**, 37, n. 5, p. 1567-1581, 2023. DOI: 10.1007/s00468-023-02443-z.

MORAES-NETO, S. P. d. Compilação de alguns estudos sobre *Tectona grandis* (Teca). **Embrapa Cerrados**, p. 1-59, 2021.

MOREIRA, M. F.; CARVALHO, P. B. N.; SILVA, E. D. C.; MENDONÇA, A.; ANTUNES C. D. Teca: Implantação e Produção no Brasil. **Revista Arrudea - A revista do Jardim Botânico do Recife**, 7, n. 1, 2021.

MOULIN, J. C.; NUTTO, S. R. S. L.; VIDAURRE, G. B. Influência do espaçamento de plantio nas propriedades da madeira de eucalipto. *In*: VIDAURRE, G. B.; SILVA, J. G. M. d., et al (Ed.). **Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil**. Vitória: UFES, 2020. v. 1, cap. 6, p. 171-195.

MOYA, R.; BOND, B.; QUESADA, H. A review of heartwood properties of *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations. **Wood Science and Technology**, 48, n. 2, p. 411-433, 2014. DOI 10.1007/s00226-014-0618-3.

MOYA, R.; TENORIO, C. Wood Properties and Their Variations in Teak. *In*: RAMASAMY, Y.; GALEANO, E., et al (Ed.). **The Teak Genome**: Springer Cham, 2021. cap. 8, p. 103-137. (Compendium of Plant Genomes).

NIAMKÉ, F. B.; AMUSANT, N.; AUGUSTIN, A. A.; CHAIX, G. Teakwood chemistry and natural durability. *In*: **The Teak Genome**. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 83-102.

NICOLETTI, M. F.; MACHADO, S. do A.; CARVALHO, S. de P. C. e; FIGUEIREDO FILHO, A.; SANQUETTA, C. R. Descrição do perfil do fuste de árvores por meio das funções de afilamento. **Scientia Agraria Paranaensis**, 15, n. 4, p. 365-372, 2016. DOI: 10.18188/1983-1471/sap.v15n4p365-372.

NOCETTI, M.; ROZENBERG, P.; CHAIX, G.; MACCHIONI, N. Provenance effect on the ring structure of teak (*Tectona grandis* L.f.) wood by X-ray microdensitometry. **Annals of Forest Science**, 68, n. 8, p. 1375-1383, 2011. DOI 10.1007/s13595-011-0145-4.

NÖLTE, A.; MEILBY, H.; YOUSEFPOUR, R. Multi-purpose forest management in the tropics: Incorporating values of carbon, biodiversity and timber in managing *Tectona grandis* (teak) plantations in Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, 422, p. 345-357, 2018. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.04.036.

PAES, J. B.; SANTOS, L. L. dos; SILVA, L. F. da; MOTTA, J. P.; BRAZ, R. L.; LOMBARDI, L. R. Caracterização tecnológica da madeira juvenil de teca (*Tectona grandis*) visando à produção de móveis. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, 10, n. 3, p. 437-442, 2015. DOI:10.5039/agraria.v10i3a3906.

PELISSARI, A. L.; GUIMARÃES, P.; BEHLING, A.; EBLING, Â. Cultivo da teca: características da espécie para implantação e condução de povoamentos florestais. **Agrarian Academy**, v. 1, n. 1, p. 127-145, 2014.

PELISSARI, A. L.; **Silvicultura de precisão aplicada ao desenvolvimento de *Tectona grandis* L.f. na região sul do estado de Mato Grosso**. 2012. 88 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal de Mato Grosso.

PUMIJUMNONG, N.; MUANGSONG, C.; BUAJAN, S.; SONGTRIRAT, P.; CHATWATTHANA, R.; CHAREONWONG, U. Factors affecting cambial growth periodicity and wood formation in tropical forest trees: a review. **Forests**, 14, n. 5, 2023. DOI: 10.26525/jtfs2023.35.2.141.

PUTRO, G. S.; MARSOEM, S. N.; SULISTYO, J.; HARDIWINOTO, S. The growth of three teak (*Tectona grandis*) clones and its effect on wood properties. **BIODIVERSITAS**, 21, p. 2814-2821, 2020. DOI: 10.13057/biodiv/d210658.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Versão 4.4.2. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

RAMANANANTOANDRO, T.; RAMANAKOTO, M. F.; RAJOELISON, G. L.; RANDRIAMBOAVONJY, J. C.; RAFIDIMANANTSOA, H. P. Influence of tree species, tree diameter and soil types on wood density and its radial variation in a mid-altitude rainforest in Madagascar. **Annals of Forest Science**, 73, n. 4, p. 1113-1124, 2016. DOI 10.1007/s13595-016-0576-z.

REATEGUI-BETANCOURT, J. L.; ARRIEL, D. A. A.; CALDEIRA, S. F.; HIGA, A. R.; FLÔRES JUNIOR, P. C.; ARAUJO, S. P.; MARQUES, R. M.; CORRÊA, B. M. B.; MARTINEZ, D. T. Morphological descriptors for the characterization of teak clones (*Tectona grandis* L.f.) in plantations. **Forest Systems**, 29, n. 2, 2020. DOI: 10.5424/fs/2020292-15634.

RESTREPO, H.; ORREGO, S.; TORRES, D. Analysis and Modeling of Teak Growth: New Perspectives for Productivity Evaluation. *In*: RAMASAMY, Y.; GALEANO, E., et al (Ed.). **The Teak Genome**: Springer Cham, 2021. cap. 4, p. 45-56. (Compendium of Plant Genomes).

RIBEIRO, C.; SOUZA, H.; CAIXETA, D.; BARREIRA, S. Modelos volumétricos para *Tectona grandis* L. f. no distrito federal. **Enciclopédia Biosfera**, 16, n. 29, p. 1092-1101, 2019.

ROCHA, K. J. d.; FINGER, C. A. G.; FAVALESSA, C. M. C.; CALDEIRA, S. F. *et al.* Form and volume of the stem of *Tectona grandis* L.f. in the Central-Western region of Brazil. **Forests**, 13, n. 11, 2022. DOI: 10.3390/f13111818.

ROCHA, K. J. da; FINGER, C. A. G.; FAVALESSA, C. M. C.; CALDEIRA, S. F.; FLEIG, F. D. Do the growing conditions of trees influence the wood properties? **Floresta e Ambiente**, 26, n. 3, 2019. DOI: 10.1590/2179-8087.035318.

RODRÍGUEZ-ANDA, R.; FUENTES-TALAVERA, F. J.; SILVA-GUZMÁN, J. A.; PALACIOS-JUÁREZ, H.; TURRADO-SAUCEDO, J. Relación de la estructura celular de la madera de teca (*Tectona grandis* L. f.) con diferentes edades y sitios de crecimiento. **Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**, 24, n. 1, p. 101-114, 2017. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2017.07.050.

RUSLIM, Y.; SANDALAYUK, D.; KRISTININGRUM, R.; ALAM, A. S. Estimation of Above Ground Biomass and carbon stocks of *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* stands in Gorontalo Province, Indonesia. **Biodiversitas Journal of Biological Diversity**, 22, n. 3, 2021. DOI: 10.13057/biodiv/d220354.

SARANPÄÄ, P. Wood density and growth *In*: **Wood Quality and its Biological Basis**: CRC Press, 2003. cap. 1, p. 87-117.

SASIDHARAN, S. Teak Plantations and Wood Production. *In*: RAMASAMY, Y.; GALEANO, E.; WIN, T. T. (Ed.). **The Teak Genome**. New Delhi: Springer, 2021. cap. 2, p. 13-26.

SASIDHARAN, S.; RAMASAMY, Y. Teak: the king of timbers. *In*: RAMASAMY, Y.; GALEANO, E.; WIN, T. T. (Ed.). **The Teak Genome**. New Delhi: Springer, 2021. cap. 1, p. 1-11.

SAVIDGE, R. A. Tree growth and wood quality. *In*: BARNETT, J. R. e JERONIMIDIS, G. (Ed.). **Wood Quality and its Biological Basis**: CRC Press, 2003. cap. 1, p. 1-29.

SCHUBERT, M.; PANZARASA, G.; BURGERT, I. Sustainability in Wood Products: A New Perspective for Handling Natural Diversity. **Chem Rev**, 123, n. 5, p. 1889-1924, Mar 8 2023. DOI: 10.1021/acs.chemrev.2c00360.

SCHUHLLI, G. S. e.; PALUDZYSZYN FILHO, E. O cenário nacional da silvicultura de teca (*Tectona grandis* L. f.) e perspectivas de melhoramento. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 30, n. 63, p. 217-230, 2010.

SCHWEINGRUBER, F. H. **Wood structure and environment**. Springer Science & Business Media, 2007.

SEGURA, A. E. C.; ROCHA, M. P. d.; KLITZKE, R. J.; MORA, H. E. G. Caracterización anatómica radial y axial de la madera de teca (*Tectona grandis* L. f.) plantada en Chanchamayo – Perú. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, 11, n. 2, p. 107-120, 2020. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v11n2p107-120.

SERRANO, S. M.V.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. **Journal of Climate**, 23, n. 7, p. 1696-1718, 2010. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.

SETA, G. W.; WIDIYATNO; HIDAYATI, F.; NA' IEM, M. Impact of thinning and pruning on tree growth, stress wave velocity, and pilodyn penetration response of clonal teak (*Tectona grandis*) plantation. **Forest Science and Technology**, 17, n. 2, p. 57-66, 2021. DOI: 10.1080/21580103.2021.1911865.

SHUKLA, S. R.; VISWANATH, S. Comparative financial analysis of plantation teak (*Tectona grandis* L.f.) under different management practices in farmlands. **Indian Journal of Agroforestry**, 23, n. 2, p. 107-117, 2021.

SHUKLA, S. R.; VISWANATH, S. Comparison of growth and few wood quality parameters of 24–25-year-old *Tectona grandis* (teak) trees raised under three agroforestry practices. **Agroforestry Systems**, 97, n. 4, p. 631-645, 2023. DOI: 10.1007/s10457-023-00815-5.

SILVA, J. E. C. D. **Morfologia do fuste e propriedades da madeira de *Tectona grandis* L.f. de plantações em idade de corte final**. 2024. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2024.

SINHA, S. K.; RAO, R. V.; RATHORE, T. S.; BORGAONKAR, H. P. Growth Ring Structure and Specific Gravity Variation in Juvenile and Mature Wood of Natural-Grown Teak (*Tectona grandis* L.f.). In: PANDEY, K.; RAMAKANTHA, V., et al (Ed.). **Wood is Good**. Singapore: Springer, 2017.

SOUSA, V. B.; CARDOSO, S.; QUILHÓ, T.; PEREIRA, H. Growth rate and ring width variability of teak, *Tectona grandis* (Verbenaceae) in an unmanaged forest in East Timor. **Rev. Biol. Trop.**, 60, n. 1, p. 483-494, 2012.

SOUZA, J. B. de; DEMARTELAERE, A. C. F.; PRESTON, H. A. F.; COUTINHO, P. W. R.; MATA, T. C. da; PAIVA, L. L. de; FERREIRA, M. dos S.; SILVA, T. P. de P.; MEDEIROS, D. C. de; LIRA, V. M. de; LAZZARINI, L. E. S.; FERREIRA, A. dos S.; CARVALHO, N. F. de O.; CADORIN, D. A.; NASCIMENTO, E. B. do; ROSSETTI JUNIOR, F. C.; ALVES, T. N.; REGO, C. A. R. de M.; SILVA, D. F. da. O cenário nacional da silvicultura da *Tectona grandis* e suas perspectivas econômicas. **Brazilian Journal of Development**, 7, n. 6, p. 60486-60506, 2021.

SOUZA, L. V. C. de; SILVA, J. E. C. da; AZEVEDO, T. L. B.; MASCARENHAS, A. R. P.; ARIAS, L. A. U.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C. Wood quality of young *Tectona*

grandis L. f. trees and its relationship with genetic material and planting site in Mato Grosso, Brazil. **Forests**, 15, n. 5, 2024. DOI; 10.3390/f15050860.

SOUZA, R. S.; GONÇALEZ, J. C.; RIBEIRO, E. S.; GONTIJO, A. B. Anatomical characteristics of *Tectona grandis* L.f from different sites in Mato Grosso state. **Ciência Florestal**, 29, n. 4, p. 1528-1537, 2019. DOI: 10.5902/1980509834563.

SOUZA JUNIOR, C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L. G.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; OLIVEIRA, S. W. de; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VÉLEZ-MARTIN, E.; WEBER, E. J.; LENTI, F. E. B.; PATERNOST, F. F.; PAREYN, F. G. C.; SIQUEIRA, J. V.; VIERA, J. L.; FERREIRA NETO, L. C.; SARAIVA, M. M.; SALES, M. H.; SALGADO, M. P. G.; VASCONCELOS, R.; GALANO, S.; MESQUITA, V. V.; AZEVEDO, T. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. **Remote Sensing**, 12, n. 17, 2020. DOI: 10.3390/rs12172735.

SREEKUMAR, V. B.; SANIL, M. S. Teak Biology and Ecology. *In*: RAMASAMY, Y.; GALEANO, E., et al (Ed.). **The Teak Genome**. Springer Cham, 2021. cap. 6, p. 67-81.

TAVARES, F.; LOUZADA, J. L.; PEREIRA, H. Variation in wood density and ring width in *Acacia melanoxylon* at four sites in Portugal. **European Journal of Forest Research**, 133, n. 1, p. 31-39, 2013. DOI 10.1007/s10342-013-0733-y.

TOMASELLI, I.; HIRAKURI, S. R. Mercado mundial da madeira de teca. *In*: REIS, C. A. F.; OLIVEIRA, E. B. d., et al (Ed.). **Teca (*Tectona grandis* L. f.) no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Florestas, 2023. v. 1, cap. 2, p. 46-78.

TOMAZELLO-FILHO, M.; BRAZOLIN, S.; CHAGAS, M. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; BALLARIN, A. W.; BENJAMIN, C. A. Application of x-ray technique in nondestructive evaluation of eucalypt wood. **Maderas. Ciencia y tecnología** 10, n. 2, p. 139-149, 2008.

TRIPATI, S.; SHUKLA, S. R.; SHASHIKALA, S.; SARDAR, A. Teak (*Tectona grandis* Lf): a preferred timber for shipbuilding in India as evidenced from shipwrecks. **Current science**, p. 2160-2165, 2016.

UGULINO, B.; LATORRACA, J. V. d. F.; FILHO, M. T. Tree-ring growth response of teak (*Tectona grandis* L.f.) to climatic variables in central-west region of Brazil. **Scientia Forestalis**, 42, n. 104, p. 473-482, 2014.

VIEIRA, L. S. **Manual da ciência do solo**: com ênfase aos solos tropicais. Editora Agronômica, 1988.

WIEDENHOEFT, A. C.; MILLER, R. B. Structure and function of wood. *In*: ROWELL, Roger M. (Org.). **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005. p. 9-33.

WIRABUANA, P. Y. A. P.; HENDRATI, R. L.; BASKOROWATI, L.; SUSANTO, M.; MASHUDI; SULISTIADI, H. B. S.; SETIADI, D.; SUMARDI; ALAM, S. Growth

performance, biomass accumulation, and energy production in age series of clonal teak plantation. **Forest Science and Technology**, 18, n. 2, p. 67-75, 2022. DOI: 10.1080/21580103.2022.2063952.

WORBES, M. Growth Rings, Increment and Age of Trees in Inundation Forests, Savannas and a Mountain Forest in the Neotropics. **IAWA Journal**, 10, n. 2, p. 109-122, 1989.

WORBES, M. Wood Anatomy and Tree-Ring Structure and Their Importance for Tropical Dendrochronology. *In*: JUNK, W.; PIEDADE, M., et al (Ed.). **Amazonian Floodplain Forests**: Springer, Dordrecht, 2010. v. 210, p. 329-346. (Ecological Studies).

ZAHABU, E.; RAFAEL, T.; CHAMSHAMA, S. A. O.; IDDI, D.; MALIMBWI, R. E. Effect of spacing regimes on growth, yield, and wood properties of *Tectona grandis* at Longuza Forest Plantation, Tanzania. **International Journal of Forestry Research**, 2015, p. 1-6, 2015. DOI: 10.1155/2015/469760.

ZHANG, F. Y.; QUAN, Q.; MA, F.; TIAN, D.; HOOVER, D. L.; ZHOU, Q.; NIU, S. When does extreme drought elicit extreme ecological responses? **Journal of Ecology**, 107, n. 6, p. 2553-2563, 2019. DOI: 10.1111/1365-2745.13226.

ZHANG, Y.; FANG, S.; TIAN, S.; WANG, L.; LV, Y. Responses of radial growth, wood density and fiber traits to planting space in poplar plantations at a lowland site. **Journal of Forestry Research**, 33, n. 3, p. 963-976, 2022. DOI: 10.1007/s11676-021-01382-0.

ZHOU, Z.; LIANG, K.; XU, D.; ZHANG, Y.; HUANG, G.; MA, H. Effects of calcium, boron and nitrogen fertilization on the growth of teak (*Tectona grandis*) seedlings and chemical property of acidic soil substrate. **New Forests**, 43, n. 2, p. 231-243, 2011. DOI 10.1007/s11056-011-9276-6.

ZHU, Y.; LI, L. Wood of trees: Cellular structure, molecular formation, and genetic engineering. **Journal of Integrative Plant Biology**, 66, n. 3, p. 443-467, Mar 2024. DOI: 10.1111/jipb.13589.

ZOBEL, B. J.; BUIJTENEN, J. P. v. **Wood Variation: Its Causes and Control**. Springer Berlin, Heidelberg, 1989. (Springer Series in Wood Science, v. 1).

APÊNDICE I

Tabela 14 - Largura e densidade aparente médias dos lenhos inicial e tardio ao longo dos anéis de crescimento em diferentes alturas de *Tectona grandis* provenientes do sítio de Mato Grosso

Parâmetro	Altura	Idade cambial (anos)														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Largura do lenho inicial (mm)	0,1 m	8,58 (4,24)	20,55 (8,14)	20,02 (8,11)	18,33 (7,32)	13,50 (5,09)	11,69 (3,45)	10,80 (2,05)	9,02 (0,99)	11,35 (2,80)	9,77 (3,91)	13,68 (4,99)	12,21 (4,31)	10,13 (3,32)	7,94 (3,38)	9,07 (4,15)
	2,7 m	12,03 (4,48)	16,92 (6,69)	15,70 (5,46)	12,30 (3,64)	9,57 (2,08)	8,92 (1,82)	6,36 (1,66)	7,29 (2,31)	6,61 (1,88)	8,32 (2,49)	7,80 (3,48)	6,41 (2,12)	5,40 (1,41)	4,82 (1,67)	-
	5,4 m	8,15 (3,74)	16,05 (5,59)	14,32 (6,35)	11,29 (2,49)	9,49 (3,15)	6,85 (0,78)	6,93 (1,70)	7,35 (2,85)	8,27 (2,50)	7,21 (2,89)	5,03 (1,62)	4,86 (1,32)	4,88 (1,59)	-	-
	8,1 m	6,81 (1,97)	12,48 (6,85)	14,45 (5,95)	11,18 (2,49)	8,44 (1,68)	6,86 (1,61)	7,35 (1,38)	7,12 (1,75)	7,65 (2,99)	6,00 (2,59)	4,47 (1,16)	4,63 (1,59)	-	-	-
Largura do lenho tardio (mm)	0,1 m	0,52 (0,33)	0,35 (0,10)	0,36 (0,10)	0,35 (0,08)	0,39 (0,19)	0,30 (0,05)	0,36 (0,09)	0,36 (0,10)	0,32 (0,06)	0,33 (0,05)	0,33 (0,05)	0,34 (0,06)	0,36 (0,06)	0,34 (0,05)	0,34 (0,11)
	2,7 m	0,49 (0,23)	0,37 (0,07)	0,34 (0,07)	0,34 (0,08)	0,32 (0,11)	0,28 (0,03)	0,30 (0,03)	0,29 (0,05)	0,28 (0,03)	0,33 (0,06)	0,31 (0,05)	0,35 (0,04)	0,31 (0,03)	0,30 (0,04)	-
	5,4 m	0,38 (0,08)	0,47 (0,27)	0,36 (0,07)	0,32 (0,02)	0,31 (0,04)	0,36 (0,07)	0,34 (0,04)	0,35 (0,04)	0,41 (0,22)	0,32 (0,04)	0,34 (0,04)	0,34 (0,08)	0,30 (0,04)	-	-
	8,1 m	0,37 (0,06)	0,52 (0,21)	0,35 (0,06)	0,33 (0,04)	0,37 (0,10)	0,35 (0,04)	0,35 (0,05)	0,34 (0,15)	0,34 (0,03)	0,32 (0,04)	0,35 (0,03)	0,30 (0,04)	-	-	-
Densidade do lenho inicial (g/cm ³)	0,1 m	0,627 (0,068)	0,586 (0,024)	0,602 (0,042)	0,606 (0,047)	0,597 (0,034)	0,592 (0,023)	0,585 (0,020)	0,575 (0,019)	0,596 (0,032)	0,606 (0,022)	0,632 (0,028)	0,650 (0,025)	0,676 (0,031)	0,679 (0,037)	0,691 (0,037)
	2,7 m	0,524 (0,033)	0,551 (0,039)	0,535 (0,033)	0,519 (0,028)	0,518 (0,045)	0,506 (0,035)	0,500 (0,022)	0,507 (0,019)	0,499 (0,020)	0,524 (0,031)	0,538 (0,031)	0,557 (0,020)	0,555 (0,023)	0,598 (0,031)	-
	5,4 m	0,572 (0,033)	0,573 (0,043)	0,560 (0,047)	0,542 (0,044)	0,538 (0,057)	0,539 (0,045)	0,544 (0,042)	0,548 (0,054)	0,569 (0,051)	0,559 (0,027)	0,577 (0,024)	0,569 (0,026)	0,580 (0,035)	-	-
	8,1 m	0,589 (0,045)	0,594 (0,039)	0,552 (0,048)	0,544 (0,053)	0,542 (0,056)	0,554 (0,044)	0,565 (0,072)	0,548 (0,051)	0,549 (0,042)	0,566 (0,037)	0,570 (0,039)	0,567 (0,040)	-	-	-
Densidade do lenho tardio (g/cm ³)	0,1 m	0,582 (0,070)	0,638 (0,034)	0,673 (0,068)	0,666 (0,058)	0,663 (0,061)	0,631 (0,033)	0,632 (0,033)	0,618 (0,043)	0,639 (0,041)	0,658 (0,044)	0,665 (0,051)	0,698 (0,032)	0,711 (0,053)	0,687 (0,050)	0,730 (0,029)
	2,7 m	0,589 (0,030)	0,592 (0,081)	0,576 (0,065)	0,580 (0,055)	0,566 (0,066)	0,552 (0,037)	0,548 (0,033)	0,557 (0,034)	0,579 (0,043)	0,577 (0,031)	0,605 (0,033)	0,576 (0,021)	0,615 (0,042)	0,693 (0,091)	-
	5,4 m	0,587 (0,056)	0,616 (0,090)	0,626 (0,098)	0,585 (0,090)	0,577 (0,065)	0,583 (0,052)	0,583 (0,069)	0,596 (0,069)	0,597 (0,068)	0,594 (0,027)	0,565 (0,043)	0,597 (0,026)	0,659 (0,095)	-	-
	8,1 m	0,613 (0,052)	0,590 (0,046)	0,612 (0,092)	0,582 (0,064)	0,579 (0,052)	0,573 (0,095)	0,578 (0,087)	0,589 (0,041)	0,592 (0,033)	0,575 (0,042)	0,565 (0,035)	0,617 (0,065)	-	-	-

Tabela 15 - Largura e densidade aparente médias dos lenhos inicial e tardio ao longo dos anéis de crescimento em diferentes alturas de *Tectona grandis* provenientes do sítio do Pará

Parâmetro	Altura	Idade cambial (anos)														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Largura do lenho inicial (mm)	0,1 m	4,41 (2,02)	11,22 (7,03)	21,51 (7,66)	18,71 (3,46)	16,20 (2,91)	18,80 (6,19)	12,63 (3,21)	11,77 (2,89)	9,19 (2,17)	8,84 (2,25)	8,47 (2,74)	5,88 (2,26)	8,65 (3,37)	8,43 (4,37)	-
	2,7 m	7,30 (1,91)	13,15 (7,92)	18,90 (6,71)	17,80 (1,62)	14,28 (3,66)	10,39 (3,25)	11,24 (2,86)	8,89 (2,86)	7,51 (1,49)	6,28 (1,81)	5,04 (1,29)	7,71 (2,95)	6,69 (2,19)	5,48 (1,95)	-
	5,4 m	8,48 (2,19)	15,69 (6,76)	15,53 (4,54)	14,85 (4,99)	9,80 (1,70)	10,73 (1,78)	7,94 (2,03)	9,09 (2,99)	6,56 (1,85)	5,27 (2,36)	8,20 (2,85)	6,87 (3,25)	5,34 (2,95)	-	-
	8,1 m	7,06 (2,62)	17,41 (5,87)	15,74 (5,59)	12,16 (2,97)	11,45 (1,45)	9,95 (2,31)	8,33 (3,07)	5,61 (1,43)	4,18 (1,94)	5,68 (2,26)	5,90 (3,57)	4,45 (2,49)	-	-	-
Largura do lenho tardio (mm)	0,1 m	0,44 (0,08)	0,44 (0,19)	0,35 (0,06)	0,35 (0,07)	0,36 (0,06)	0,42 (0,08)	0,40 (0,10)	0,38 (0,05)	0,35 (0,06)	0,42 (0,06)	0,36 (0,03)	0,31 (0,04)	0,36 (0,06)	0,33 (0,05)	-
	2,7 m	0,49 (0,14)	0,33 (0,04)	0,39 (0,11)	0,34 (0,05)	0,76 (1,15)	0,39 (0,04)	0,39 (0,06)	0,38 (0,05)	0,38 (0,04)	0,36 (0,03)	0,36 (0,02)	0,34 (0,04)	0,35 (0,03)	-	-
	5,4 m	0,39 (0,11)	0,39 (0,18)	0,38 (0,05)	0,40 (0,07)	0,39 (0,05)	0,39 (0,14)	0,40 (0,08)	0,36 (0,03)	0,34 (0,04)	0,39 (0,05)	0,38 (0,08)	0,36 (0,08)	-	-	-
	8,1 m	0,38 (0,12)	0,40 (0,05)	0,42 (0,09)	0,39 (0,04)	0,35 (0,04)	0,41 (0,07)	0,39 (0,04)	0,37 (0,06)	0,34 (0,05)	0,35 (0,05)	0,38 (0,07)	-	-	-	-
Densidade do lenho inicial (g/cm ³)	0,1 m	0,637 (0,050)	0,645 (0,041)	0,658 (0,022)	0,676 (0,025)	0,651 (0,021)	0,632 (0,027)	0,616 (0,027)	0,631 (0,040)	0,626 (0,029)	0,627 (0,027)	0,626 (0,025)	0,625 (0,028)	0,647 (0,029)	0,650 (0,025)	-
	2,7 m	0,567 (0,019)	0,576 (0,025)	0,603 (0,005)	0,591 (0,031)	0,605 (0,038)	0,597 (0,034)	0,629 (0,049)	0,623 (0,046)	0,613 (0,041)	0,595 (0,046)	0,574 (0,029)	0,594 (0,029)	0,616 (0,031)	-	-
	5,4 m	0,595 (0,015)	0,615 (0,023)	0,603 (0,015)	0,604 (0,010)	0,587 (0,020)	0,604 (0,028)	0,602 (0,029)	0,614 (0,019)	0,581 (0,016)	0,569 (0,022)	0,585 (0,026)	0,602 (0,015)	-	-	-
	8,1 m	0,628 (0,035)	0,633 (0,044)	0,608 (0,068)	0,602 (0,046)	0,658 (0,050)	0,640 (0,045)	0,637 (0,069)	0,603 (0,032)	0,577 (0,057)	0,600 (0,043)	0,631 (0,081)	-	-	-	-
Densidade do lenho tardio (g/cm ³)	0,1 m	0,669 (0,072)	0,623 (0,077)	0,662 (0,038)	0,676 (0,061)	0,659 (0,037)	0,669 (0,055)	0,651 (0,059)	0,665 (0,037)	0,645 (0,062)	0,631 (0,056)	0,627 (0,041)	0,640 (0,052)	0,666 (0,042)	0,668 (0,050)	-
	2,7 m	0,587 (0,072)	0,591 (0,042)	0,596 (0,064)	0,619 (0,042)	0,640 (0,058)	0,599 (0,035)	0,638 (0,052)	0,636 (0,052)	0,580 (0,067)	0,578 (0,055)	0,582 (0,032)	0,616 (0,032)	0,644 (0,036)	-	-
	5,4 m	0,606 (0,047)	0,589 (0,065)	0,600 (0,073)	0,606 (0,041)	0,596 (0,052)	0,611 (0,034)	0,614 (0,036)	0,591 (0,032)	0,563 (0,030)	0,586 (0,036)	0,622 (0,027)	0,620 (0,030)	-	-	-
	8,1 m	0,628 (0,035)	0,633 (0,044)	0,608 (0,068)	0,602 (0,046)	0,658 (0,050)	0,640 (0,045)	0,637 (0,069)	0,603 (0,032)	0,577 (0,057)	0,600 (0,043)	0,631 (0,081)	-	-	-	-

APÊNDICE II

Tabela 16 - Comparações das médias ajustadas para largura e densidade do lenho inicial e tardio entre as alturas avaliadas

Largura do Lenho inicial		
Altura	Estimado	p-valor
Altura 0,1 – Altura 2,7	2,374	0,0008 *
Altura 0,1 – Altura 5,4	3,003	< 0,0001*
Altura 0,1 – Altura 8,1	3,569	< 0,0001*
Altura 2,7 – Altura 5,4	0,629	0,7069 ^{ns}
Altura 2,7 – Altura 8,1	1,195	0,1845 ^{ns}
Altura 5,4 – Altura 8,1	0,566	0,7690 ^{ns}
Largura do Lenho tardio		
Altura	Estimado	p-valor
Altura 0,1 – Altura 2,7	0,001774	0,9992 ^{ns}
Altura 0,1 – Altura 5,4	0,002609	0,9974 ^{ns}
Altura 0,1 – Altura 8,1	0,001488	0,9995 ^{ns}
Altura 2,7 – Altura 5,4	0,000835	0,9999 ^{ns}
Altura 2,7 – Altura 8,1	-0,000286	1,0000 ^{ns}
Altura 5,4 – Altura 8,1	-0,001122	0,9998 ^{ns}
Densidade do Lenho inicial		
Altura	Estimado	p-valor
Altura 0,1 – Altura 2,7	0,0687	< 0,0001*
Altura 0,1 – Altura 5,4	0,0554	< 0,0001*
Altura 0,1 – Altura 8,1	0,0411	0,0003 *
Altura 2,7 – Altura 5,4	-0,0133	0,4975 ^{ns}
Altura 2,7 – Altura 8,1	-0,0276	0,0232*
Altura 5,4 – Altura 8,1	-0,0144	0,4274 ^{ns}
Densidade do Lenho tardio		
Altura	Estimado	p-valor
Altura 0,1 – Altura 2,7	0,04760	0,0004 *
Altura 0,1 – Altura 5,4	0,05678	< 0,0001*
Altura 0,1 – Altura 8,1	0,05262	0,0001 *
Altura 2,7 – Altura 5,4	0,00918	0,8436 ^{ns}
Altura 2,7 – Altura 8,1	0,00502	0,9694 ^{ns}
Altura 5,4 – Altura 8,1	-0,00416	0,9822 ^{ns}

^{ns}: Não significativo ao nível de 5% de significância; *: Significativo ao nível de 5% de significância pelo método de comparações múltiplas de Tukey.