



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS – PPGCF**

JONATHAN DIAS MARQUES

**COMPREENSÃO DOS EFEITOS DA ADUBAÇÃO, BIFURCAÇÃO E TEXTURA DE
SOLO NO CRESCIMENTO DAS ÁRVORES E QUALIDADE DO LENHO DE
Tachigali vulgaris PARA BIOENERGIA**

**BELÉM
2024**

JONATHAN DIAS MARQUES

**COMPREENSÃO DOS EFEITOS DA ADUBAÇÃO, BIFURCAÇÃO E TEXTURA DE
SOLO NO CRESCIMENTO DAS ÁRVORES E QUALIDADE DO LENHO DE
Tachigali vulgaris PARA BIOENERGIA**

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

Orientador: Dr. Thiago de Paula Protásio
Coorientadores: Dr. Gabriel de Assis Pereira
Dr. Marciel José Ferreira

**BELÉM
2024**

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

M357c Marques, Jonathan Dias

Compreensão dos efeitos da adubação, bifurcação e textura de solo no crescimento das árvores e qualidade do lenho de *Tachigali vulgaris* para bioenergia / Jonathan Dias Marques. - 2024.
161 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Ciências Florestais (PPGCF), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio

Coorientador: Prof. Dr. Marciel José Ferreira e Dr. Gabriel de Assis Pereira.

1. florestas energéticas. 2. métodos não destrutivos. 3. Amazônia. I. Protásio, Thiago de Paula, *orient.* II. Título

333.95390981

CDD

JONATHAN DIAS MARQUES

**COMPREENSÃO DOS EFEITOS DA ADUBAÇÃO, BIFURCAÇÃO E TEXTURA DE
SOLO NO CRESCIMENTO DAS ÁRVORES E QUALIDADE DO LENHO DE
Tachigali vulgaris PARA BIOENERGIA**

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

Data da aprovação: 28/08/2024

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente



THIAGO DE PAULA PROTÁSIO
Data: 23/09/2024 11:33:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Thiago de Paula Protásio – Orientador
Universidade Federal de Lavras – UFLA

Documento assinado digitalmente



ANA CAROLINA MAIOLI CAMPOS BARBOSA
Data: 25/09/2024 08:48:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Ana Carolina Maioli Campos Barbosa – 1º Examinador
Universidade Federal de Lavras – UFLA

Documento assinado digitalmente



PAULO RICARDO GHERARDI HEIN
Data: 25/09/2024 10:54:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein – 2º Examinador
Universidade Federal de Lavras – UFLA

Documento assinado digitalmente



FLAVIO HENRIQUE SILVEIRA RABELO
Data: 25/09/2024 11:17:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Flávio Henrique Silveira Rabelo – 3º Examinador
Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP

A DEUS e às duas pessoas mais importantes em minha vida: minha esposa, Thalia Carvalho, e minha mãe, Varneleia Marques. DEDICO!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por todas as suas bênçãos, misericórdia e maravilhas que ocorreram em minha vida. Graças a Ele, consegui vencer todos os obstáculos.

À minha família, em especial à minha esposa, Thalia Carvalho, por me incentivar, acreditar no meu potencial e estar sempre ao meu lado nos momentos mais difíceis e importantes da minha vida. À minha mãe, Varneleia Marques, pelo amor incondicional e por todos os sacrifícios, ensinando-me o valor da vida e dos estudos. Amo vocês!

Ao meu comitê de orientação, formado pelos pesquisadores Thiago Protásio, Gabriel Pereira, Marciel Ferreira e Mário Tommasiello Filho, por serem o exemplo de profissionais que desejo me tornar. Obrigado pelos valiosos ensinamentos, pela confiança, pelas oportunidades e pelo apoio ao longo do mestrado.

Ao Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (LTPF/UFRA) e ao Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeiras (LAIM/ESALQ-USP) por proporcionarem suporte e oferecerem um ambiente de alegria e tranquilidade para o desenvolvimento desta dissertação.

Às Professoras Marcela Gomes, Lina Bufalino e Gracialda Ferreira, pelos ensinamentos, contribuições, confiança e acolhimento durante o desenvolvimento desta dissertação.

Aos pesquisadores, Michael Douglas Lima e Elesandra Araújo, por todo o apoio. Vocês foram fundamentais para a finalização desta dissertação. Muito obrigado!

Ao pesquisador Ricardo Rodriguez pela parceria e pelos ensinamentos sobre a técnica de fluorescência de raios X, e ao pesquisador Hudson Carvalho por disponibilizar o equipamento para a realização da técnica.

Aos meus amigos Gustavo Borges, Thamyres Aguiar, Gabriela Olmedo, Norma Senna, Maycon Silva e Davi Lemos, pela amizade e por proporcionarem momentos de riso e felicidade durante este período, tornando essa caminhada mais leve.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos (código de financiamento 001).

Ao PROCAD-AMAZÔNIA pelo suporte acadêmico e financeiro (processo nº 88887.799141/2022-00), que permitiram a mobilidade acadêmica e grande parte das análises realizadas nesta dissertação.

A todos aqueles que ajudaram direta ou indiretamente, o meu muito obrigado!

RESUMO GERAL

Utilizar espécies nativas com potencial para finalidade energética em plantações florestais é importante para contribuir na sustentabilidade da região amazônica. O *Tachigali vulgaris* vem demonstrando ser promissor para a região, pois apresenta características físicas, químicas e térmicas da madeira adequadas para bioenergia. Todavia, vários aspectos silviculturais e suas relações com a qualidade do lenho e crescimento das árvores necessitam de investigações para utilização da espécie de forma mais eficiente. O objetivo desse estudo é investigar quais são os efeitos da presença de adubação e bifurcação em diferentes texturas do solo na qualidade do lenho e crescimento das árvores de *T. vulgaris* para fins energéticos. A área de estudo está localizada na empresa Jari Celulose S.A., no distrito de Monte Dourado, Almeirim (PA). Os experimentos foram implantados sobre Latossolos amarelos de diferentes texturas (textura franco arenosa e muito argilosa) e foram avaliados dois tratamentos: sem adubação e com adubação (320 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 199 kg ha⁻¹ de K₂O). A presente dissertação está dividida em três capítulos. **Capítulo 1:** Foram avaliados os efeitos combinados do diâmetro, altura, adubação, bifurcação e textura do solo na variação da densidade aparente da madeira de *T. vulgaris*. **Capítulo 2:** Foi gerada uma equação populacional para estimar a densidade básica do lenho de *T. vulgaris* a partir da densidade aparente (12% de umidade) e realizada a classificação de densidade básica (baixa densidade e média densidade) para as árvores de *T. vulgaris*. **Capítulo 3:** Foi realizada a caracterização dos anéis de crescimento e variação de perfis químicos em árvores de *T. vulgaris*. Os resultados obtidos no capítulo 1 mostraram que a densidade aparente média foi de 0,632 g cm⁻³. Foi verificado que a variação de densidade entre árvores representa 39% e entre seções longitudinais 69% da variação total. Ainda, os fatores diâmetro do fuste e bifurcação influenciaram positiva e negativamente a densidade média da espécie, respectivamente. Os resultados do capítulo 2 mostram que a equação populacional foi adequada para estimar a densidade básica a partir da densidade aparente do lenho de *T. vulgaris*. Por fim, o capítulo 3 trouxe informações importantes sobre a influência dos fatores testados sobre 3 elementos químicos: cálcio (Ca), enxofre (S) e silício (Si). Árvores bifurcadas apresentaram maior concentração de Ca, enquanto que árvores em solo argiloso apresentaram maior concentração de Si. Para o elemento S não houve influência dos fatores testados. Os resultados obtidos nesses três capítulos contribuirão para uma interpretação mais ampla do potencial bioenergético dessa espécie para uso em plantações comerciais na Amazônia.

Palavras-chave: florestas energéticas; métodos não destrutivos; Amazônia.

ABSTRACT

Using native species with potential for energy purposes in forest plantations is important for contributing to the sustainability of the Amazon region. *Tachigali vulgaris* has shown promise for the region, as it has the physical, chemical and thermal characteristics of wood suitable for bioenergy. However, various silvicultural aspects and their relationship with wood quality and tree growth need to be investigated in order to use the species more efficiently. The aim of the study is to investigate the effects of fertilization and forking in different soil textures on the wood quality and growth of *T. vulgaris* trees for energy purposes. The study area is located at the company Jari Celulose S.A., in the district of Monte Dourado, Almeirim (PA). The experiments were carried out on yellow latosols of different textures (sandy loam and very clayey) and two treatments were evaluated: without fertilization and with fertilization (320 kg ha⁻¹ of P₂O₅ and 199 kg ha⁻¹ of K₂O). This dissertation is divided into three chapters. **Chapter 1:** The combined effects of diameter, height, fertilization, bifurcation and soil texture on the variation in the apparent density of *T. vulgaris* wood were evaluated. **Chapter 2:** A population equation was generated to estimate the basic density of *T. vulgaris* wood from the bulk density (12% moisture content) and the basic density classification (low density and medium density) was carried out for the *T. vulgaris* trees. **Chapter 3:** The characterization of growth rings and variation in chemical profiles in *T. vulgaris* trees was carried out. The results obtained in Chapter 1 showed that the average apparent density was 0.632 g cm⁻³. It was found that the variation in density between trees represents 39% and between longitudinal sections 69% of the total variation. In addition, the factors stem diameter and forking had a positive and negative influence on the species average apparent density, respectively. The results of Chapter 2 show that the population equation was suitable for estimating basic density from the apparent density of *T. vulgaris* wood. Finally, Chapter 3 provided important information on the influence of the factors tested on 3 chemical elements: calcium (Ca), sulphur (S) and silicon (Si). Forked trees had a higher concentration of Ca, while trees in clay soil had a higher concentration of Si. For the element S, there was no influence from the factors tested. The results obtained in these three chapters have contributed to a broader interpretation of the bioenergy potential of this species for use in commercial plantations in the Amazon.

Keywords: energy forests; non-destructive methods; Amazonia.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Organograma geral da presente dissertação.....	22
Figura 2 - Fluxograma geral da dissertação.....	23
Figura 3 - Árvores de <i>T. vulgaris</i> de 11 anos de idade em plantação experimental, distrito de Monte Dourado, Almeirim, Pará, Brasil (a) e seção transversal do lenho de <i>T. vulgaris</i> com marcação dos anéis de crescimento anuais (b).	28
Figura 4 - Perfil de variação radial da densidade aparente de <i>T. vulgaris</i> em plantio de 8, 5 anos distrito de Monte Dourado, Almeirim, Pará, Brasil.	37

CAPÍTULO 1

Figure 1 - Location of the study area, on yellow oxisols with a sandy loam (A1) and very clayey (A2) texture, in Monte Dourado, district of the municipality of Almeirim, Pará, Brazil (a); climograph of the study area (b).....	54
Figure 2 - Wood sampling of non-forked and forked <i>T. vulgaris</i> trees in Monte Dourado, district of the municipality of Almeirim, Pará, Brazil (a), the cross-section of <i>T. vulgaris</i> disks taken in different relative positions (b), sampling for X-ray densitometry analysis (red rectangle represents cross-sectional radius) (c), saturation of samples before cutting (d), precision metallographic cutter ISOMET™ 5000 Buehler (e), specimen to be X-rayed (f), Faxitron X-ray, model LX 60 for digital images (g), and sample measurement in WinDendro™ software (h)	58
Figure 3 - <i>T. vulgaris</i> wood apparent density data per tree, considering soil textural classes and fertilization	62
Figure 4 - Variation in the average apparent density of <i>T. vulgaris</i> wood as a function of the selected predictors	65
Figure 5 - Radial variation of apparent density in the DBH position of trees from the experiment with and without forking and fertilization in two different soil textural classes.....	68
Figure 6 - Apparent density variation obtained by X-ray densitometry showing the intra-annual density variation and the limit of earlywood (EW) and latewood (LW) (a) and three categories of intra-annual density variation found in the density profiles of <i>T. vulgaris</i> : uniform (b), stable (c), and unstable (d).....	69
Figure 7 - The average width of annual growth rings (%) over 10 years (2012 to 2021) by groups and general average in the position of the DBH of <i>T. vulgaris</i> trees (a) and the relationship between annual growth ring width (GRW) and average growth ring density (WRD) over 10 years (2012 to 2021) of <i>T. vulgaris</i> trees (b).....	71

Figure 8 - Comparison between two soil textural classes, presence, or absence of fertilization, and forking for each year (a) and along the longitudinal direction (b) for <i>T. vulgaris</i> trees.....	73
Figure 9 - Longitudinal and radial variation profile of X-ray density of <i>T. vulgaris</i> trees for different soil textural classes, absence or presence of fertilization and forking.....	76

CAPÍTULO 2

Figura 1 - Localização da área de estudo, no distrito de Monte Dourado, Almeirim, Pará, Brasil (a); climograma da área de estudo (b)	92
Figura 2 - Plantios experimentais de <i>T. vulgaris</i> avaliados em solo franco-arenoso e muito argiloso, no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, Pará, Brasil (a), amostragem de discos ao longo do fuste de árvores não bifurcadas e bifurcadas (b), discos divididos ao meio gerando duplicatas com ≈ 2.5 cm de espessura (c), análise de densidade básica (d), e análise de densitometria de raios X (e)	94
Figura 3 - Modelo de regressão linear simples ajustado por máximo verossimilhança entre densidade aparente e densidade básica, com resíduos do modelo ajustado e estatística de qualidade para árvores de <i>T. vulgaris</i>	98
Figura 4 - Comparação da frequência relativa da densidade básica classificada como baixa densidade ($< 0.500 \text{ g cm}^{-3}$) e média densidade ($\geq 0.500 \text{ g cm}^{-3}$) entre o método de imersão em água e pela equação populacional para os discos amostrados para as diferentes posições dentro do fuste (a) e para a densidade média das árvores (b)	101
Figura 5 - Valores de densidade média básica obtidos pela equação populacional ao longo das idades cambiais nas diferentes posições relativas das árvores de <i>T. vulgaris</i> . As linhas em vermelho representam a faixa de classificação em baixa e média densidade.	102
Figura 6 - Frequência relativa da densidade básica obtidas pela equação populacional classificadas como baixa densidade ($< 0.500 \text{ g cm}^{-3}$) e média densidade ($\geq 0.500 \text{ g cm}^{-3}$) ao longo das idades cambiais nas diferentes posições relativas das árvores de <i>T. vulgaris</i>	104

CAPÍTULO 3

Figura 1 - Localização da área de estudo, Monte Dourado, distrito do município de Almeirim, Pará, Brasil (a); climograma da área de estudo (b); plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> do estudo (c); amostragem dos discos para análises com auxílio de motosserra (d); discos amostrados (e)	116
Figura 2 - Árvores não bifurcadas e bifurcadas de <i>T. vulgaris</i> de experimentos analisadas no estudo (a), secção transversal de discos de <i>T. vulgaris</i> (o retângulo vermelho pontilhado	

representa o raio da secção transversal selecionado para análises) (b), esquema de análise de densitometria de raios X (d) e fluorescência de raios X (e)	120
Figura 3 - Seção transversal da madeira de <i>T. vulgaris</i> com anéis anuais bem demarcados delimitados por fibras de paredes espessas e achatadas do lenho tardio (setas brancas)	124
Figura 4 - Largura dos anéis de crescimento das árvores de <i>T. vulgaris</i> por idade cambial para as posições amostradas da base (a), DAP (b), 25% da altura comercial (c), 50% da altura comercial (d), 75% da altura comercial (e) e 100% da altura comercial (f). As linhas cinzas representam a largura dos anéis de crescimento das árvores analisadas e as linhas pretas representam a largura média. n é o número de árvores avaliadas por altura.	125
Figura 5 - Proporção entre lenho inicial e lenho tardio por idade cambial para as posições amostradas da base (a), DAP (b), 25% da altura comercial (c), 50% da altura comercial (d), 75% da altura comercial (e) e 100% da altura comercial (f).	127
Figura 6 - Largura dos anéis de crescimento em função das variáveis preditoras: tipo de fuste (a), adubação e textura do solo (b)	128
Figura 7 - Concentração média de cálcio (Ca) em função das variáveis preditoras avaliadas (a, b e c) e concentração da seção radial (medula-casca) (d) mensuradas na posição do DAP em árvores de <i>T. vulgaris</i> . CPS = contagens por segundo (60 s).	130
Figura 8 - Perfil de variação longitudinal e radial média de cálcio (Ca) em árvores não bifurcadas e bifurcadas de <i>T. vulgaris</i> . CPS = contagens por segundo (30 s).	131
Figura 9 - Concentração média de enxofre (S) em função das variáveis preditoras avaliadas (a, b e c) e concentração da seção radial (medula-casca) (d) mensuradas na posição do DAP em árvores de <i>T. vulgaris</i> . CPS = contagens por segundo (60 s).	132
Figura 10 - Perfil de variação longitudinal e radial média de enxofre (S) em árvores não bifurcadas e bifurcadas de <i>T. vulgaris</i> . CPS = contagens por segundo (30 s).	132
Figura 11 - Concentração média de silício (Si) em função das variáveis preditoras avaliadas (a, b e c) e concentração da seção radial (medula-casca) (d) mensuradas na posição do DAP em árvores de <i>T. vulgaris</i> . CPS = contagens por segundo (60 s).	133
Figura 12 - Perfil de variação longitudinal e radial média de enxofre (S) em árvores não bifurcadas e bifurcadas de <i>T. vulgaris</i> . CPS = contagens por segundo (30 s).	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Espécies nativas do bioma Amazônia e Mata Atlântica selecionadas para compor o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento em Silvicultura com Espécies Nativas (PP&D-SEN) no Brasil.....	25
Tabela 2 - Propriedades físico-químicas do lenho de <i>T. vulgaris</i> reportadas na literatura nos últimos 40 anos.....	29
Tabela 3 - Propriedades físico-químicas do lenho de <i>T. vulgaris</i> reportadas na literatura nos últimos 40 anos.....	33

CAPÍTULO 1

Table 1 - Literature on <i>T. vulgaris</i> plantations	53
Table 2 - Chemical and granulometric characterization of the two experimental areas of <i>T. vulgaris</i> in Monte Dourado, municipality of Almeirim, Pará, Brazil.....	55
Table 3 - Fertilization experiments in two areas with <i>T. vulgaris</i> evaluated in Monte Dourado, municipality of Almeirim, Pará, Brazil	56
Table 4 - Percentage of forking, mortality, and dendrometric information of the experimental areas of <i>T. vulgaris</i> evaluated in Monte Dourado, district of the municipality of Almeirim, Pará, Brazil	59
Table 5 - The generalized linear model (GLM) analyses using the selected complete model (a) and the simplified model removing predictors that do not influence ($p > 0.05$) the average apparent density of <i>T. vulgaris</i> wood (b).....	64
Table 6 - Variation of X-ray density in the radial direction, considering different positions of the commercial height (meters and relative) of sampling in <i>T. vulgaris</i> trees.....	73

CAPÍTULO 2

Tabela 1 - Informações dendrométricas das árvores amostras para as duas classes texturais do solo com ausência e presença de adubação	93
Tabela 2 - Valores médios de densidade básica da madeira (DB) para as 32 árvores de <i>T. vulgaris</i> avaliadas no estudo obtidos pelo método de imersão em água, pela equação populacional, pelo fator de conversão e a diferença entre as médias para cada árvore em porcentagem (%). A diferença (%) positiva indica que a equação e o fator de conversão superestimaram os valores e a diferença negativa indica que a equação e o fator de conversão subestimaram os valores.....	99
Tabela 3 - Estudo com densidade do lenho da espécie <i>T. vulgaris</i> realizados nos últimos 40 anos.....	100

Tabela 4 - Variação da densidade básica estimada na direção radial, considerando diferentes posições da altura comercial (metros e relativa) de amostragem em árvores de <i>T. vulgaris</i>	103
---	-----

CAPÍTULO 3

Tabela 1 - Caracterização química e granulométrica das duas áreas experimentais de <i>T. vulgaris</i> em Monte Dourado, município de Almeirim, Pará, Brasil.....	117
Tabela 2 - Informações dendrométricas, porcentagem de bifurcação e de mortalidade das áreas experimentais de <i>T. vulgaris</i> avaliadas em Monte Dourado, distrito do município de Almeirim, Pará, Brasil	119
Tabela 3 - Largura do lenho inicial e tardio para diferentes posições amostradas ao longo do fuste	126
Tabela 4 - Análise dos preditores que influenciam a largura dos anéis de crescimento através de modelos lineares de efeitos mistos.....	128
Tabela 5 - Análise dos preditores que influenciam os elementos químicos (Ca, S, Si) através de modelos lineares de efeitos mistos	129

SUMÁRIO

1	APRESENTAÇÃO GERAL DO PROJETO	16
1.1	Pesquisas em andamento	16
1.1.1	Doutorado	16
1.2	Pesquisas concluídas.....	16
1.2.1	Dissertações de mestrado	16
1.2.2	Trabalhos de conclusão de curso – TCC	17
1.3	Publicações	17
2	CONTEXTUALIZAÇÃO	19
2.1	Questões científicas e hipóteses	20
3	OBJETIVOS	21
3.1	Objetivo geral.....	21
3.2	Objetivos específicos.....	21
4	REVISÃO DE LITERATURA.....	24
4.1	Espécies nativas para fins energéticos	24
4.2	O <i>Tachigali vulgaris</i>	26
4.3	Adubação e seus efeitos na qualidade da madeira	29
4.4	Textura do solo e seus efeitos na qualidade da madeira	33
4.5	Dendrocronologia e avaliação da qualidade da madeira por meio da densitometria de raios X.....	35
	REFERÊNCIAS	37
5	CAPÍTULO 1	49
5.1	Introduction	50
5.2	Material and methods	54
5.2.1	Characterization and history of the study area	54
5.2.2	Experimental design and sampling of <i>Tachigali vulgaris</i> wood.....	55
5.2.3	Determination of apparent density by X-ray densitometry	59

5.2.4 Statistical analysis	59
5.3 Results and discussion	62
5.3.1 The apparent density of <i>T. vulgaris</i> wood and influence predictors	62
5.3.2 Radial and longitudinal variation of the apparent density of <i>T. vulgaris</i>	67
5.4 Practical implications of the research and prospects	79
5.5 Conclusions	80
References	80
6 CAPÍTULO 2	87
6.1 Introdução	88
6.2 Material e métodos	91
6.2.1 Caracterização da área experimental	91
6.2.2 Desenho experimental e amostragem da madeira de <i>Tachigali vulgaris</i>	92
6.2.3 Determinação da densidade básica da madeira	94
6.2.4 Determinação da densidade aparente por densitometria de raios X	95
6.2.5 Determinação da densidade básica da madeira a partir da densidade aparente por densitometria de raios X	95
6.2.6 Análise estatística	96
6.2.7 Validação da equação de conversão e classificação de densidade básica	97
6.3 Resultados	98
6.3.1 Estimativa de densidade básica a partir da densidade aparente	98
6.3.2 Validação da equação de conversão e classificação de densidade básica	99
6.3.3 Classificação da densidade básica média e anual de árvores de <i>T. vulgaris</i> a partir da equação populacional	101
6.4 Discussão	105
6.4.1 Estimativa de densidade básica a partir da densidade aparente	105
6.4.2 Validação da equação de conversão e classificação de densidade básica	106
6.4.3 Classificação da densidade básica média e anual de árvores de <i>T. vulgaris</i> a partir da equação populacional	106

6.5	Implicações práticas e limitações da pesquisa	108
6.6	Conclusão	108
	Referências	109
7	CAPÍTULO 3	112
7.1	Introdução	113
7.2	Materiais e métodos.....	116
7.2.1	Caracterização da área experimental	116
7.2.2	Desenho experimental	117
7.2.3	Amostragem e preparação da madeira de <i>Tachigali vulgaris</i>	118
7.2.4	Análise de densitometria de raios X	120
7.2.5	Análise de fluorescência de raios X	121
7.2.6	Análise estatística	122
7.3	Resultados	123
7.3.1	Caracterização anatômica e dos anéis de crescimento de árvores de <i>T. vulgaris</i>	123
7.3.2	Quantificação e distribuição de elementos químicos	129
7.4	Discussão	134
7.4.1	Caracterização anatômica e dos anéis de crescimento de árvores de <i>T. vulgaris</i>	134
7.4.2	Quantificação e distribuição de elementos químicos	136
7.5	Conclusão	139
	Referências	140
8	CONCLUSÕES GERAIS	147
	APÊNDICE A	148
	APÊNDICE B.....	156

1 APRESENTAÇÃO GERAL DO PROJETO

O presente trabalho está inserido no projeto “Rede brasileira de pesquisa em crescimento e qualidade da madeira da espécie *Tachigali vulgaris* (tachi branco) proveniente de plantios homogêneos para a geração de bioenergia na Amazônia”, com parceria entre a Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e Empresa Jari Celulose S.A. com apoio de diversas instituições brasileiras, no qual está sendo subsidiada pelo programa Nacional de Cooperação Acadêmica na Amazônia – PROCAD AMAZÔNIA (processo nº 88881.199859/2018–01).

O objetivo do projeto é contribuir nos estudos do crescimento e qualidade da madeira de árvores de *Tachigali vulgaris*, oriundas de plantações homogêneas para fins energéticos na Amazônia, com o propósito de aprofundar o conhecimento sobre os aspectos silviculturais da espécie, por meio de ações de ensino e pesquisa, envolvendo alunos de pós-graduação e graduação.

1.1 Pesquisas em andamento

1.1.1 Doutorado

Larissa Gonçalves Moraes: Programa de Pós – Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira da Universidade Federal de Lavras (PPGCTM/UFLA); orientador: Dr. Thiago de Paula Protásio; título: “Qualidade da madeira e assimilação de carbono: implicações no uso energético de *Tachigali vulgaris*”; defesa: primeiro semestre de 2026.

1.2 Pesquisas concluídas

1.2.1 Dissertações de mestrado

Até o ano de 2024, foram desenvolvidas 8 dissertações no âmbito do projeto.

- Crescimento e qualidade da madeira da espécie *Tachigali vulgaris* cultivada em diferentes espaçamentos para uso bioenergético (Silva, 2018);
- *Tachigali vulgaris* em plantios homogêneos na Amazônia: parâmetros de crescimento, madeira e carvão vegetal para fins energéticos (Barros Júnior, 2020);
- Influência do espaçamento, posição radial e tipo de fuste na anatomia do lenho do tachi branco (*Tachigali vulgaris*) em plantações experimentais na Amazônia (Ceretta, 2021);
- Produtividade e qualidade da madeira da espécie amazônica *Tachigali vulgaris*, em diferentes níveis de adubação, para geração de bioenergia (Teixeira, 2021);

- Efeitos da bifurcação, espaçamento e idade na qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris* proveniente de plantações homogêneas para geração de bioenergia na Amazônia (Moraes, 2022);
- Qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H.C. Lima para produtos de celulose (Josino, 2023);
- Efeitos do solo, adubação e tipo de fuste nos parâmetros de produção e qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris* visando fins energéticos (Santos, 2024);
- Compreensão dos efeitos da adubação, bifurcação e textura de solo no crescimento das árvores e qualidade do lenho de *Tachigali vulgaris* para bioenergia (Presente estudo).

1.2.2 Trabalhos de conclusão de curso – TCC

Até o ano de 2024, foram desenvolvidos 5 trabalhos de conclusão de curso dentro do projeto.

- Variações da densidade básica do lenho de *Tachigali vulgaris* em diferentes espaçamentos de plantio (Rosário, 2019);
- Caracterização dendrométrica e estimação da altura total de tachi branco (*Tachigali vulgaris*) em um plantio no Pará, um estado da Amazônia brasileira (Koury Sobrinho, 2019);
- Variabilidade dendrométrica e qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris* para produção de biomassa para energia na Amazônia (Silva, 2019);
- Compreensão dos efeitos de espaçamento e idade na produtividade e ocorrência de bifurcação em plantações de *Tachigali vulgaris* com finalidade energética (Patrício, 2021);
- Composição inorgânica da madeira de *Tachigali vulgaris* (tachi branco): implicações na geração de energia e na sustentabilidade da produção florestal na Amazônia (Santos, 2022).

1.3 Publicações

Dentre as dissertações e trabalhos de conclusão de curso desenvolvidos foram publicados 7 artigos.

- Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachi-branco trees planted at different spacings for bioenergy purposes (Silva *et al.*, 2021a);

- Características termogravimétricas e combustão da madeira de *Tachigali vulgaris* proveniente de plantios com diferentes espaçamentos (Silva *et al.*, 2021b);
- Effects of tree spacing and forking on the modification of wood density in a trial plantation of *Tachigali vulgaris* for energy in Amazonia (Barros-Junior *et al.*, 2022)
- Forking and planting spacing impacts on wood density, X-ray density, and heartwood proportion of *Tachigali vulgaris* (Moraes *et al.*, 2023);
- *Tachigali vulgaris* energy forests: understanding spacing, age, and stem type effects on tree growth patterns and wood density (Lima *et al.*, 2023)
- Dynamics of experimental plantations of *Tachigali vulgaris* in response to fertilization and soil texture (Teixeira *et al.*, 2023);
- The inorganic composition of *Tachigali vulgaris* wood: implications for bioenergy and nutrient balances of planted forests in the Amazonia (Santos *et al.*, 2024).

2 CONTEXTUALIZAÇÃO

O aumento da demanda por fontes renováveis para uso energético está relacionado à redução da disponibilidade de combustíveis fósseis e aos grandes problemas ambientais ocasionados pelo seu uso (Civitarese *et al.*, 2019; Picchio *et al.*, 2020). Neste contexto, a bioenergia vem sendo discutida como fonte potencial, uma vez que é capaz de auxiliar na proteção e conservação de recursos naturais, garantir a segurança energética, a manutenção da sociedade rural, além de reduzir a emissão de gases do efeito estufa (GEE) (Coelho Junior *et al.*, 2020). Assim, o uso da madeira, principalmente proveniente de plantios para fins energéticos, pode ser uma alternativa viável para substituir os combustíveis fósseis na indústria siderúrgica e usinas termelétricas (Massuque *et al.*, 2023).

A obtenção de biomassa para fins energéticos é proveniente principalmente de povoamentos florestais (Olba-Ziety *et al.*, 2020). Nesse sentido, no Brasil a bioenergia pode ocupar papel de destaque em suprir a demanda energética primária, devido a significativa disponibilidade de biomassa provenientes, principalmente, de plantações florestais (Welfle, 2017; Ibá, 2022; Fialho *et al.*, 2022). A maior parte dos estudos no país são voltados a classificação e seleção de genótipos de *Eucalyptus* para o carvão vegetal e a lenha (Sanquetta *et al.*, 2019; Loureiro *et al.*, 2021). No entanto, espécies nativas apresentam potencial para serem utilizadas para bioenergia (Moraes *et al.*, 2023; Ucella-Filho *et al.*, 2023), sendo necessário o desenvolvimento de estudos para conhecer suas propriedades tecnológicas (Lavoranti *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a espécie arbórea nativa, *Tachigali vulgaris*, vem sendo indicada como potencial para substituir o eucalipto em plantios energéticos na Amazônia e no Cerrado (Farias *et al.*, 2016). Com rápido crescimento, pode ser plantada em ampla faixa territorial ao longo dos trópicos. No entanto, pouco se sabe sobre os aspectos silviculturais e suas relações com a qualidade da madeira no contexto de bioenergia. Dessa forma, realizar pesquisas em relação a qualidade da madeira de *T. vulgaris* é importante para a compreensão dos efeitos das intervenções silviculturais e metodologias aplicadas ao plantio, permitindo assim, definir estratégias para aumentar a produção energética (Lima *et al.*, 2023).

Estudos para avaliação da potencialidade da espécie para fins energéticos estão sendo desenvolvidos ao longo dos anos, com resultados promissores. Sabe-se que *T. vulgaris* apresenta crescimento rápido em altura e diâmetro e densidade média a baixa, além de características adequadas à produção de carvão e lenha (Silva *et al.*, 2021a; Barros-Junior *et al.*, 2022; Lima *et al.*, 2023). No entanto, a avaliação de características físicas, químicas e

anatômicas do lenho do tronco da espécie, sobretudo considerando a variação da idade entre esses fatores, podem afetar a qualidade da lenha e são pouco exploradas.

2.1 Questões científicas e hipóteses

Capítulo 1

Questão: Como a densidade da madeira de *T. vulgaris* varia em função do diâmetro, altura, adubação, bifurcação e textura do solo?

Hipótese 1: Árvores com maiores diâmetros e alturas possuem densidades da madeira mais elevadas (Lima *et al.*, 2023). Dessa forma, espera-se que árvores de *T. vulgaris* com maiores diâmetros e alturas apresentem maior densidade da madeira, independente da textura do solo e adubação;

Hipótese 2: Árvores fertilizadas apresentam densidades da madeira mais baixas nos primeiros anos após fertilização, posteriormente a densidade anual entre árvores com e sem fertilização não irão variar (Kohler *et al.*, 2019; Ortega Rodriguez; Tomazello-Filho 2019);

Hipótese 3: Árvores bifurcadas possuem densidades mais baixas e maiores variações de densidade na direção medula-casca e base-topo, conforme estudos prévios realizados com a espécie para árvores mais jovens (Barros-Junior *et al.*, 2022; Lima *et al.*, 2023; Moraes *et al.*, 2023).

Capítulo 2

Questão 1: É possível ajustar uma equação para estimar a densidade básica da madeira a partir da densidade aparente para plantios homogêneos de *T. vulgaris* na Amazônia com alta acurácia?

Hipótese 1: A densidade aparente está diretamente relacionada com a densidade básica (Dias Júnior *et al.*, 2021), havendo estudos que ajustaram equações de conversão entre essas densidades (Costa; Rezende; Rodrigues, 2014; Vieilledent *et al.*, 2018). Logo, é possível ajustar uma equação de alta acurácia para estimar a densidade básica a partir da densidade aparente para plantios homogêneos de *T. vulgaris* na Amazônia.

Questão 2: Como classificar as árvores de *T. vulgaris* para fins energéticos utilizando a densidade da madeira?

Hipótese 2: A densidade básica da madeira influencia na densidade energética da madeira, densidade aparente e resistência mecânica do carvão vegetal (Assis *et al.*, 2016; Protásio *et al.*, 2019; Lima *et al.*, 2020a), sendo um dos principais parâmetros para indicação de uso, em que,

árvores com densidade básica $> 0.500 \text{ g cm}^{-3}$ podem ser indicadas para uso siderúrgico (Protásio *et al.*, 2021). Assim, classificar as árvores de *T. vulgaris* em baixa densidade básica da madeira ($< 0.500 \text{ g cm}^{-3}$) e média densidade básica da madeira ($\geq 0.500 \text{ g cm}^{-3}$), ajudará na melhor destinação para usos energéticos.

Capítulo 3

Questão: A largura dos anéis de crescimento e perfis químicos da madeira de *T. vulgaris* variam em função da adubação, bifurcação e textura do solo?

Hipótese 1: A adubação promove o rápido crescimento das árvores (Sette Jr *et al.*, 2014; Simões *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2022), em geral, nos primeiros anos após aplicação (Ortega Rodriguez; Tomazello-Filho, 2019). Logo, os anéis de crescimento das árvores de *T. vulgaris* irão apresentar maiores larguras nos anos iniciais, independente da bifurcação e textura do solo;

Hipótese 2: A adubação influencia na concentração de elementos químicos (cálcio, fósforo, potássio, entre outros) no xilema secundário das árvores (Ortega Rodriguez; Carvalho; Tomazello-Filho, 2018; Kohler *et al.* 2019; Durand *et al.*, 2020). Logo, árvores adubadas de *T. vulgaris* irão apresentar maiores concentrações de elementos químicos na madeira, independente da bifurcação e textura do solo.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

O objetivo deste estudo foi avaliar como a adubação, textura do solo e bifurcação influenciam a qualidade do lenho e crescimento das árvores de *Tachigali vulgaris* em plantios homogêneos para fins energéticos na Amazônia.

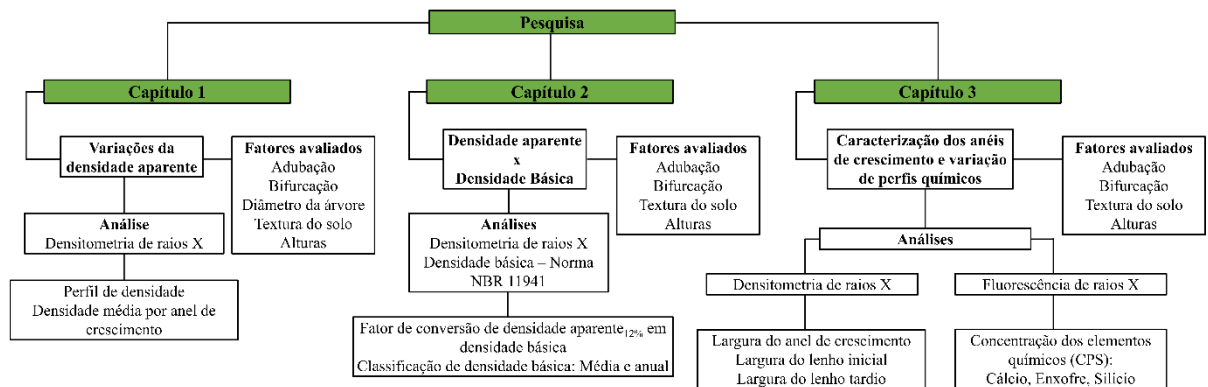
3.2 Objetivos específicos

- Compreender os efeitos combinados do diâmetro, altura, adubação, bifurcação e textura do solo na variação da densidade aparente da madeira de *T. vulgaris* em plantios homogêneos da Amazônia;
- Ajustar equação para estimar a densidade básica da madeira a partir da densidade aparente para plantios homogêneos de *T. vulgaris* na Amazônia e avaliar a melhor destinação da madeira da espécie para fins energéticos;
- Compreender os efeitos da adubação e bifurcação em duas diferentes texturas do solo nos anéis de crescimento e variação de elementos químicos (cálcio, enxofre, silício) na

madeira de *T. vulgaris* utilizando técnicas não destrutivas em plantios homogêneos da Amazônia.

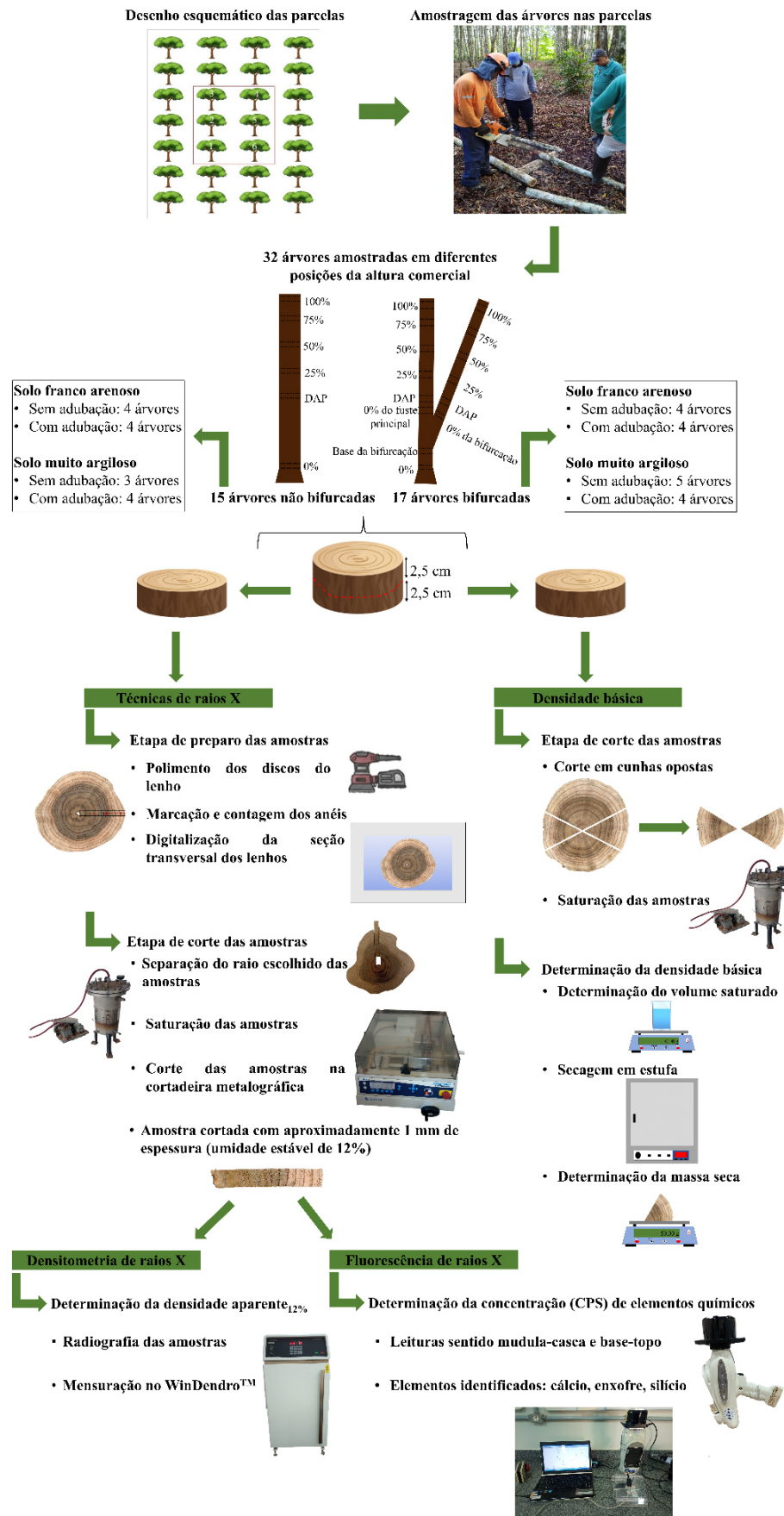
Os resultados obtidos pela presente dissertação irão contribuir com informações de suma importância para o entendimento da qualidade da madeira de *T. vulgaris* para finalidade energética. Nas figuras 1 e 2 podem ser observados o organograma e fluxograma geral da pesquisa, respectivamente.

Figura 1 - Organograma geral da presente dissertação



Fonte: Autor (2024)

Figura 2 - Fluxograma geral da dissertação



Fonte: Autor (2024)

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Espécies nativas para fins energéticos

A utilização de combustíveis fósseis ocasiona diversos problemas, principalmente, ambientais, devido a isso, houve o aumento na busca de combustíveis oriundos de fontes renováveis que causem uma menor poluição. Nesse cenário, a madeira tem ganhado destaque (Carneiro *et al.*, 2014; Brito, 2007), sendo a principal fonte de biomassa, oriunda da produção florestal e indústria madeireira (Slupinska *et al.*, 2022). A utilização desse tipo de biomassa está sendo fomentada ao longo das últimas décadas devido aos seus aspectos ambientais, econômicos e energéticos (Ribeiro; Isbaex; Valverde, 2017).

O principal uso da madeira para fins energéticos no Brasil está ligado a produção de carvão vegetal, isso é devido, principalmente, as indústrias de siderúrgicas. Desse modo, a qualidade da madeira (características físicas, químicas, mecânicas e anatômicas) está intimamente ligada a qualidade do carvão vegetal, todavia, fatores externos à madeira, também influenciam no produto final, como exemplo: condições do processo, dimensões do forno, entre outros fatores que podem ocasionar a heterogeneidade das características do carvão vegetal (Donato *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2016).

No Brasil, em 2022, 95% dos plantios eram compostos por eucalipto e pinus, ocupando aproximadamente 7,6 milhões e 1,9 milhão de hectares, respectivamente (IBÁ, 2023), sendo o eucalipto um dos gêneros mais utilizados para bioenergia, por apresentar características da madeira necessária para a produção de carvão vegetal (Rodrigues; Braghini Junior, 2019). Ao longo das últimas cinco décadas diversos estudos foram realizados para verificação da qualidade do eucalipto para fins energéticos (Rockwood; Dippon, 1989; Órfão; Antunes; Figueiredo, 1999; Almeida; Brito; Perré, 2010; Costa; Trugilho; Hein, 2018; Protásio *et al.*, 2021).

O aumento da busca por madeira está impulsionando o setor de base florestal a realizar maiores investimentos em pesquisa e em práticas silviculturais, com o objetivo de obter maiores produtividades e redução do período de corte (Costa *et al.*, 2020; Carneiro *et al.*, 2017). Além disso, estudos com plantações de eucalipto no Brasil apresentaram redução no incremento médio anual (IMA) com o aumento da temperatura e redução da precipitação (Binkley *et al.*, 2020; Costa *et al.*, 2020; Ryan *et al.*, 2020). Dessa forma, utilizar espécies nativas para plantios florestais, pode ser uma forma de aumentar a diversificação e quantidade de produtos madeireiros, principalmente na Amazônia (Neves *et al.*, 2022), sobretudo, devido a sua adaptabilidade ambiental (Orellana *et al.*, 2018).

Nas bases de indexação são encontrados diversos estudos que demonstram o potencial de espécies nativas para fins energéticos no Brasil. Dentre eles, tem-se aqueles que avaliaram o potencial de resíduos madeireiros de espécies nativas provenientes de indústrias (Fortaleza, *et al.*, 2019) ou da atividade de manejo florestal sustentável da Amazônia (Lima *et al.* 2020a, 2020b).

Com o objetivo geral de desenvolver a silvicultura de espécies nativas, em escala semelhante aos principais setores da agroindústria no Brasil, em 2016, o movimento Coalizão Brasil Clima, Florestas e Agricultura difundiu o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento em Silvicultura com Espécies Nativas (PP&D-SEN), envolvendo universidades, setor privado, instituições de pesquisa, governos e a sociedade civil, realizando pesquisas na área de Produção Florestal; Meio Ambiente e Paisagismo; e Dimensões humanas (Piotto *et al.*, 2021). Nesse programa, foram escolhidas 15 espécies do bioma Mata Atlântica e Amazônia (Tabela 1), no qual, o *T. vulgaris* não foi selecionado para compor o projeto na região amazônica. É importante destacar que esse programa tinha como finalidade a produção de produtos florestais não madeireiros (PFNMs), madeira serrada e lâminas para a produção de compensados. Dessa forma, a seleção das espécies não foi realizada com o objetivo de suprir o setor de bioenergia do país com matéria-prima lenhosa e por isso não havendo a seleção da espécie *T. vulgaris*.

Tabela 1 - Espécies nativas do bioma Amazônia e Mata Atlântica selecionadas para compor o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento em Silvicultura com Espécies Nativas (PP&D-SEN) no Brasil

Bioma	Nome científico	Nome comum
Amazônia	<i>Bagassa guianensis</i> Aubl.	tatajuba
	<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.	castanha-da-Amazônia
	<i>Carapa guianensis</i> Aubl.	andiroba
	<i>Copaifera multijuga</i> Hayne	copaíba
	<i>Cordia goeldiana</i> Huber	freijó-cinza
	<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	angelim-vermelho
	<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Willd.	cumarú
	<i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) S.Grose	ipê-amarelo
	<i>Jacaranda copaia</i> (Aubl.) D.Don	parapará
	<i>Schefflera morototoni</i> (Aubl.) Maguire et al.	morototó
	<i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> (Huber ex Ducke) Barneby	paricá
	<i>Simarouba amara</i> Aubl.	marupá
	<i>Swietenia macrophylla</i> King	mogno
	<i>Virola surinamensis</i> (Rol. ex Rottb.) Warb.	ucuúba
	<i>Vochysia maxima</i> Ducke	quaruba-verdadeira
	<i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze	araucaria

Mata Atlântica	<i>Astronium graveolens</i> Jacq.	guaritá
	<i>Balfourodendron riedelianum</i> (Engl.) Engl.	pau-marfim
	<i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.	guanandi
	<i>Cariniana legalis</i> (Mart.) Kuntze	jequitibá-rosa
	<i>Cordia trichotoma</i> (Vell.) Arráb. ex Steud.	louro-pardo
	<i>Dalbergia nigra</i> (Vell.) Allemao ex Benth.	jacarandá-da-bahia
	<i>Genipa americana</i> L.	jenipapo
	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	jatobá
	<i>Myracrodruon urundeuva</i> Allemao	aroeira-do-sertão
	<i>Peltophorum dubium</i> (Spreng.) Taub.	canafístula
	<i>Plathymenia reticulata</i> Benth.	vinhático
	<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	ipê-roxo
	<i>Paubrasilia echinata</i> (Lam.) E. Gagnon, H.C. Lima & G.P. Lewis	pau-brasil
	<i>Zeyheria tuberculosa</i> (Vell.) Bureau ex Verl.	ipê-felpudo

Fonte: Piotto *et al.* (2021).

Para plantações florestais com finalidade energética, as pesquisas de Barros *et al.* (2009) e Eloy *et al.* (2014), avaliaram potenciais energéticos de espécies exóticas e nativas em suas regiões, obtendo resultados positivos para as espécies nativas. O *T. vulgaris* tem ganhado espaço como espécie promissora para fins energéticos, devido a isso, ao longo dos anos, estudos vêm evidenciando que a produtividade, qualidade da madeira e outras características da espécie são adequadas para essa finalidade (Tomaselli *et al.*, 1983; Farias *et al.*, 2016; Orellana *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2021b; Barros-Junior *et al.*, 2022).

A maior visibilidade do *T. vulgaris* para fins energéticos ocorreu a partir do projeto intitulado “Florestas Energéticas na Matriz de Agroenergia Brasileira” da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária no ano de 2007, que teve como objetivo diversificar a matriz energética brasileira, no qual, foram selecionadas cinco espécies para realizar testes experimentais na região amazônica, e entre as espécies, o *T. vulgaris* (Embrapa, 2007). Os sítios experimentais instalados no Distrito de Monte Dourado compreendem a fonte de matéria-prima da presente pesquisa e do projeto citado no item 1.

4.2 O *Tachigali vulgaris*

Tachigali vulgaris L. G. Silva & H.C. Lima (Figura 3), com nomes vernaculares de tachi branco, taxi-branco-da-terra-firme, carvão-de-ferreiro, cachamorra-branca, carvoeiro, entre outros nomes dependendo da região (Carvalho, 2005), pertence as eudicotiledôneas, ordem Fabales, Família Fabaceae (APG IV, 2016). Devido a semelhança houve a inclusão do gênero

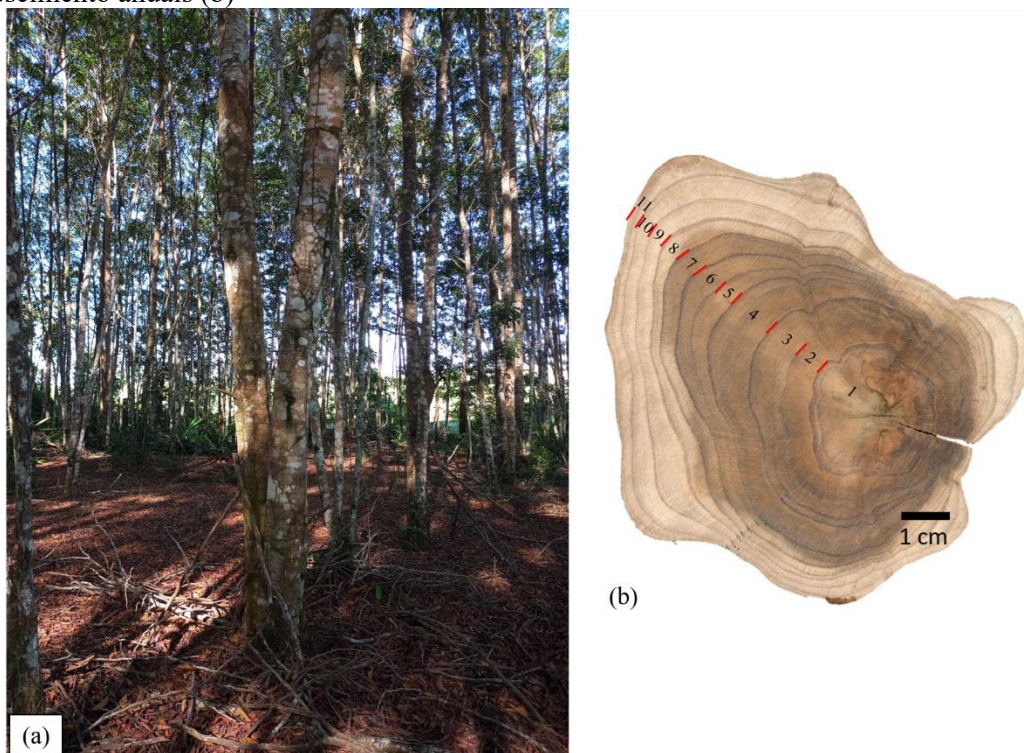
Sclerolobium ao *Tachigali* e, devido a isso, a espécie antes chamada de *Sclerolobium paniculatum* Vogel, passou a ser sinônimo de *Tachigali vulgaris* (Silva; Lima, 2007).

Conforme abordado por Carvalho (2005) e Sousa et al. (2016), a espécie tem uma ampla faixa de distribuição geográfica no Brasil podendo ser encontrado nas regiões norte, nordeste, centro-oeste e sudeste. O *T. vulgaris* apresenta ocorrência em todos os estados pertencentes a Amazônia Legal (Martorano *et al.*, 2018), podendo ocorrer em vegetação secundária de terra firme, em floresta ombrófila densa (Cruz *et al.*, 2020). Além disso, a espécie pode ser encontrada no Peru, Suriname, Venezuela e nas Guianas.

O *T. vulgaris* é uma espécie heliófila, encontrada em áreas recém abertas, apresentando em média 20 m de altura, com tronco reto e cilíndrico e a casca lisa a quase lisa, de coloração variando entre branca e cinza com espessura de até 10 mm e suas folhas lisas, alternadas, estipuladas, compostas imparipinadas, com comprimento entre 15 cm a 20 cm. Possui inflorescências com flores amarelas e ligeiramente zigomorfas, com dimensões de 7 mm x 5 mm, florescendo entre outubro e dezembro com amadurecimento dos frutos entre julho e setembro. É uma árvore de grande crescimento com a formação de nódulos (simbiose com bactérias fixadoras de nitrogênio) disponibilizando nitrogênio para o solo (Carpanezzi; Marques; Kanashiro, 1983; Campos Filho, 2009; Sousa *et al.*, 2016).

A espécie apresenta cerne e alburno distintos, cerne castanho, odor característico, gosto indistinto, grã irregular e madeira de baixa a média densidade (Rolim; Piotto, 2018; Barros-Junior *et al.*, 2022). A espécie possui grande deposição de serrapilheira ($9.646 \text{ kg}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), sendo indicada na recuperação de áreas degradadas, auxiliando na melhoria da atividade biológica do solo, principalmente em solos com alto grau de intemperismo (Mochiutti; Queiroz; Melém Junior, 2006), contribuindo para compreender as interações ecológicas de florestas tropicais (Pilon; Melo; Durigan, 2012). Além disso, é uma espécie promissora para fins energéticos, sendo de rápido crescimento (até $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e com poder calorífico superior similar à madeira de eucalipto produzida no Brasil (Sousa *et al.*, 2016).

Figura 3 - Árvores de *T. vulgaris* de 11 anos de idade em plantação experimental, distrito de Monte Dourado, Almeirim, Pará, Brasil (a) e seção transversal do lenho de *T. vulgaris* com marcação dos anéis de crescimento anuais (b)



Fonte: Autor (2024)

Para o *T. vulgaris*, entre os espaçamentos mais indicados para fins energéticos tem-se o de 3 m x 3 m (9,0 m²). Nos estudos de Rodrigues *et al.* (2020), a plantação avaliada aos 5 anos e 6 anos de idade apresentou maiores volumes e áreas basais, além disso, aos 6 anos houve maior produção de biomassa e menor porcentagem de mortalidade. Aos 7 anos, esse espaçamento é o mais indicado para o corte, pois permite bom crescimento das árvores sem trazer prejuízos a qualidade da madeira para fins energéticos (Silva *et al.*, 2021a). Além disso, as árvores provenientes do espaçamento 3 x 3 m apresentaram maiores massas residuais provenientes da pirólise, sendo um indicativo de maior rendimento para a produção de carvão vegetal (Silva *et al.*, 2021b).

O *T. vulgaris* possui usos múltiplos, sendo indicado para produção de carvão vegetal, lenha, álcool, construção civil, confecção de mourões, esteios e utilização na arborização urbana (Oliveira *et al.*, 2008; Piolon; Melo; Durigan, 2012). Nos estudos de Souza *et al.* (2008) foi demonstrado o grande potencial da espécie para plantios comerciais na Amazônia, no qual, apresentou os melhores resultados dentre 10 espécies (nativas e exóticas) avaliadas, com valores médios de 22,4 cm, 16,5 m e 475,6 m³ ha⁻¹, para DAP, altura e volume, respectivamente, aos 11 anos de idade. Segundo Protásio *et al.* (2022) o *T. vulgaris* demonstra potencial para produção de carvão vegetal com características físico-químicas semelhantes ao

carvão vegetal de espécies do gênero *Eucalyptus*. Na Tabela 2 é apresentado resultados dos últimos 40 anos de estudos com a madeira de árvores de *T. vulgaris* nativas e em plantios.

Tabela 2 - Propriedades físico-químicas do lenho de *T. vulgaris* reportadas na literatura nos últimos 40 anos

Db (g cm ⁻³)		PCS (Kcal kg ⁻¹)		MV (%)		Cz (%)		CF (%)		Referências
N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	
0,60	0,63	4580	4390	-	-	-	-	-	-	Tomaselli <i>et al.</i> (1983)
0,72	-	4849	-	78,61	-	0,39	-	21	-	Vale; Brasil; Leão (2002)
-	0,65	-	4305	-	81,44	-	0,57	-	18	Tonini <i>et al.</i> (2018)
-	0,58	-	4.539	-	84,99	-	0,56	-	-	Orellana <i>et al.</i> (2018)
-	0,49	-	4705	-	78,54	-	0,49	-	21	Silva <i>et al.</i> (2021a)
-	0,44 – 0,53	-	-	-	-	-	-	-	-	Barros-Junior <i>et al.</i> (2022)
-	0,44 – 0,60	-	-	-	-	-	-	-	-	Lima <i>et al.</i> (2023)
-	0,53	-	-	-	-	-	-	-	-	Moraes <i>et al.</i> (2023)

Db: densidade básica, PCS: poder calorífico superior, MV: materiais voláteis, Cz: cinzas, CF: carbono fixo, N: árvores nativas, P: árvores de plantio.

4.3 Adubação e seus efeitos na qualidade da madeira

Nos plantios florestais, diversos fatores afetam o seu desenvolvimento, dentre eles o clima, o manejo e o solo, sendo esse último fator muito demandado em relação a disponibilidade hídrica e de nutrientes, principalmente em plantios com rápida taxa de crescimento (Bellote *et al.*, 2008). Ainda segundo os autores, a disponibilidade de nutrientes minerais, interfere no desenvolvimento das árvores. Diante disso, realizar a adubação das plantas, de forma correta, faz-se importante para promover o aumento e desenvolvimento da produção (Meneghette *et al.*, 2017).

Contudo, esse aumento de produtividade e rápido crescimento, pode provocar alterações na qualidade da madeira, devendo dessa forma, realizar avaliações de qualidade desse lenho (Sette Jr, *et al.*, 2012). A formação da madeira é um processo de crescimento da árvore viva e fatores extrínsecos podem influenciar no seu crescimento e, consequentemente, em suas propriedades, assim, deve ser avaliado a influência de práticas silviculturais na qualidade do lenho (Castro *et al.*, 2020). Entre essas práticas, a adubação mineral permite a melhoria da qualidade do sítio e, consequentemente, ocasionar mudanças nas características da madeira e taxa de crescimento das árvores (Sette Jr. *et al.*, 2014; Lima; Garcia, 2011).

Dessa forma, é importante melhorar e realizar a manutenção da fertilidade do solo, sendo crucial para maior rentabilidade (Van Maarschalkerweerd; Husted, 2015). Existem 17 elementos minerais essenciais as plantas conhecidos como nutrientes, divididos em macronutrientes (exigidos em maior quantidade): carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S); e micronutrientes (exigidos em menor quantidade): boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni) e zinco (Zn) (Dechen; Nachtigall, 2018). Esses elementos essenciais são importantes para o ciclo completo de vida dos vegetais (Bang *et al.*, 2020). Dentre os macronutrientes, tem-se o P e K, nutrientes de grande importância sendo alvos da pesquisa, por meio da aplicação de fertilizantes minerais.

O P é importante para a síntese das moléculas de DNA, RNA, ATP, NADPH, entre outras importâncias, sendo o segundo macronutriente mais limitante para o crescimento das plantas, devido a sua baixa disponibilidade no solo (Bucher *et al.*, 2018). Essa baixa disponibilidade está ligada ao processo de adsorção do fósforo em solos tropicais, principalmente relacionada a textura do solo, pH e alumínio trocável (Al^{3+}) (Vinha *et al.*, 2021). Uma característica da deficiência do P é expressiva diminuição na assimilação de CO_2 e redução da produção de biomassa (Bang *et al.*, 2020).

O K não compõe nenhuma estrutura ou molécula orgânica da planta (Torres; Pereira, 2008), todavia, tem importância na função energética, na translocação e armazenamento de assimilados, assim como na manutenção de água nos tecidos vegetais (Meurer *et al.*, 2018). Esse nutriente é importante para a eletroneutralidade, regulação osmótica, estado bioquímico do pH e equilíbrio ânion-cátion (Bang *et al.*, 2020). Biagiotti *et al.* (2017), ao avaliar fertilização potássica em plantios de *Corymbia citriodora* observaram que no primeiro ano de plantio, o potássio favoreceu o crescimento e produção de biomassa da espécie.

Estudos realizados em uma plantação de *Pinus taeda* L. com adubação de lodo de fábrica de celulose compostada, promoveram um crescimento mais rápido e um aumento da produção de biomassa (até 108%), e tiveram menores valores de densidade da madeira, quando comparadas ao tratamento controle (Ortega Rodriguez; Tomazello-Filho, 2019). Além disso, nesse experimento foram observados que a fertilização promoveu o aumento na concentração de K, Ca, Fe e S e diminuição na concentração de P e Mn, nos anéis de crescimento da madeira da espécie entre o 2º e 5º ano de plantio (Ortega Rodriguez; Carvalho; Tomazello-Filho, 2018).

Estudos com os efeitos das fertilizações foram amplamente reportados para o gênero *Eucalyptus* na literatura, como nos estudos de Barros *et al.* (1981), que verificaram que a aplicação de NPK proporcionou o aumento entre 30% a 350% do volume ($m^3 ha^{-1}$) nas plantas

de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus saligna*, respectivamente. Nos estudos de Barros *et al.* (1984), analisando o crescimento de *Eucalyptus saligna*, no Vale do Jequitinhonha (MG), verificaram que o maior volume de madeira ao final do experimento ($133,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) foram encontrados em doses de 32g de N, 40g de P_2O_5 e 16g de K_2O por planta, recomendando uso de adubações para essa espécie em condições ambientais semelhantes ao do estudo. Todavia, Oliveira; Moraes; Buzetti (2001) ao avaliarem o efeito de NPK em plantas de *Eucalyptus citriodora* Hook não encontraram efeito da adubação nas variáveis analisadas (altura, diâmetro a altura do peito e volume).

Lima e Garcia (2011) ao avaliarem o efeito de NPK (1000 kg ha^{-1} na proporção de 12:06:12) nas propriedades mecânicas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden de 21 anos de idade, verificaram que a fertilização reduziu a resistência à compressão paralela às fibras e o módulo de elasticidade da madeira. Yang *et al.* (2023), ao avaliarem plantações subtropicais de clones de *E. urophylla* $\times$ *E. grandis* verificaram os efeitos da adubação de NPK (aproximadamente 175 kg ha^{-1} de N, $81,7 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5 e $93,4 \text{ Kg ha}^{-1}$ de K_2O) e irrigação em estação seca, no qual, proporcionaram o aumento da produção de madeira e armazenamento de estoque de carbono no sistema ($138,3 \text{ Mg ha}^{-1}$). Em seus estudos, Chambi-Legoas *et al.* (2023), verificaram que a adubação com potássio (335 kg ha^{-1} de KCl) proporcionou a recuperação do crescimento plasticidade do xilema de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em resposta a mudanças na disponibilidade hídrica.

Em relação as doses aplicadas, observa-se que, não há um padrão na indicação de adubação. Por exemplo, para o Estado do Pará, as doses máximas de NPK para o gênero *Eucalyptus* são de: 70 kg ha^{-1} de N, 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 130 kg ha^{-1} de K_2O , sendo necessário ter como base a análise química do solo antes da recomendação (Rocha *et al.*, 2020), se diferenciando das doses dos estudos supracitados. Assim, nota-se que, até mesmo espécies com amplos estudos, como o as espécies de eucalipto, não possuem um consenso sobre doses ideais de adubação, sempre sendo necessário levar em consideração o tipo de solo, clima, temperatura, os diferentes genótipos entre outros fatores.

Do mesmo modo, outras espécies não possuem definido um padrão de adubação, a exemplo do *T. vulgaris*, em que, entre os estudos realizados com a espécie não existe consenso para a escolha da melhor adubação. Silva, Gonçalves e Sales (2016), ao avaliar o efeito da combinação de diferentes doses de fósforo e potássio compondo 12 tratamentos, em plantio de *T. vulgaris*, verificaram que não houve diferença entre os tratamentos para variáveis sobrevivência, bifurcação e circunferência a altura do peito (CAP), demonstrando que a espécie é pouco exigente a esses nutrientes em relação a essas características.

Nos estudos de Simões *et al.* (2022) avaliando uma plantação de *T. vulgaris* nos primeiros anos de plantio utilizando doses 0 kg ha⁻¹, 65,22 kg ha⁻¹ e 130,43 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo e doses 0 kg ha⁻¹, 100 kg ha⁻¹ e 200 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio, bem como suas combinações, promoveram uma maior eficiência do uso de nutrientes em plantios da espécie, além disso, a combinação das doses com 65,22 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo e 200 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio foram os mais eficientes no crescimento em altura, proporcionando um aumento de 11,1% em comparação com o tratamento sem adubação aos 2 anos do plantio. Já nos estudos de Simões *et al.* (2023), avaliando a influência da adubação e sazonalidade na ecofisiologia das plantas, no mesmo experimento, a combinação das doses de 130,43 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo e 100 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio foram as que apresentaram maiores taxas fotossintéticas.

Nos estudos de palheta *et al.* (2019), que avaliaram o efeito de nitrogênio, fósforo e potássio no crescimento de *T. vulgaris* durante os dois primeiros anos de plantio verificou que a combinação de adubação nitrogenada e potássica em doses de 44,5 kg ha⁻¹ e 50 kg ha⁻¹, respectivamente, foi a que apresentou os maiores resultados em diâmetro e altura. Assim, estudos como esses, contribuem para adotar estratégias e metodologias visando plantações de *T. vulgaris*. Teixeira *et al.* (2023) avaliaram a combinação de quatro níveis de fósforo (superfosfato triplo; 0, 80, 160 e 320 kg ha⁻¹) com três níveis de potássio (cloreto de potássio; 0, 100 e 199 kg ha⁻¹) em solos de diferentes texturas (Latossolos) e verificaram que a espécie possui baixa exigência de fósforo e potássio, recomendando as doses de 0 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo e 172 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio para solo com a textura franco-arenosa, e 195 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo e 343 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio para solo de textura argilosa. A Tabela 3 traz um resumo das melhores doses de adubação com NPK encontrada para os diferentes estudos.

Assim, ainda que existam estudos sobre o efeito da adubação com características de crescimento, produção e fisiologia da espécie *T. vulgaris*, essas informações são contrastantes. Dessa forma, são necessários estudos mais aprofundados para avaliar o efeito da adubação fosfatada e potássica na espécie, principalmente em relação a qualidade da madeira, visto que, até o momento nenhum estudo encontrado abordou essa temática.

Tabela 3 - Propriedades físico-químicas do lenho de *T. vulgaris* reportadas na literatura nos últimos 40 anos

Espaçamento	Idade (anos)	Adubação (kg ha ⁻¹)			Efeitos	Referências
		N	P	K		
2m x 3m	2	44,5	-	50,00	Maior diâmetro e altura*	Palheta <i>et al.</i> (2019)
2m x 3m	2	-	65,2	200,0	Crescimento em altura de 11.1%*	Simões <i>et al.</i> (2022)
2m x 3m	2	-	130,4	100,0	Maiores taxas fotossintéticas*	Simões <i>et al.</i> (2023)
2m x 3m	10	21,0	-	172,0	Aumento do DAP aos 2 anos**	Teixeira <i>et al.</i> (2023)
		21,0	195,0	343,0	Aumento do DAP aos 2 anos e aumento do volume comercial com casca***	

Estudos realizados em *latossolo vermelho-amarelo de textura média, **latossolo amarelo de textura franco arenosa, ***latossolo amarelo de textura muito argilosa.

4.4 Textura do solo e seus efeitos na qualidade da madeira

A qualidade do solo pode ser definida como a capacidade de funcionamento do solo dentro de um ecossistema, de modo a sustentar a produtividade biológica, manter a sustentabilidade ambiental e promover a saúde animal (Doran; Parkin, 1994). Para avaliar a qualidade do solo, os chamados indicadores de qualidade do solo são utilizados. Estes são divididos em indicadores, biológicos, químicos e físicos (Doran; Sarrattonio; Liebig, 1996; Murphy *et al.*, 2006; Araújo; Monteiro, 2007).

Os indicadores físicos de qualidade do solo, influenciam nos indicadores químicos e biológicos, assim, tem um papel de grande importância nos estudos de qualidade do solo (Dexter, 2004). Esses indicadores são de grande importância para o estabelecimento de relações essenciais com processos hidrológicos (taxa de infiltração, escoamento superficial, drenagem e erosão) e são indispensáveis para o armazenamento e fornecimento de água, oxigênio e nutrientes no solo (Gomes; Filizola, 2006).

Os principais indicadores físicos do solo que podem ser destacados são: densidade do solo, resistência a penetração, porosidade, capacidade de retenção de água, condutividade hidráulica, estabilidade de agregados e textura do solo (Araújo *et al.*, 2012). A textura do solo é a proporção relativa das classes de tamanho das partículas do solo (areia, silte e argila) (Silva; Fay, 2004), sendo essencial para a caracterização do solo (Silva *et al.*, 2020).

Nos estudos de Carneiro *et al.* (2017), avaliaram 5 diferentes clones de eucalipto (1 clone de *Eucalyptus grandis* e 4 clones de híbridos das espécies *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*) denominados clones I, II, III, IV e V. A pesquisa ocorreu em três

localidades diferentes de Minas Gerais: Santa Bárbara com solo de textura argilo-arenosa e de baixa fertilidade natural (pluviosidade anual entre 1400-1600 mm); Ipaba com solo de textura argilo-arenosa de alta fertilidade natural (pluviosidade anual entre 1000-1200 mm); e em Guanhães com solo de textura argilosa e baixa fertilidade natural (pluviosidade anual entre 1100-1200 mm), e os autores verificaram que a variação nos valores de densidade básica, teor de extrativos totais, teor de lignina total, teor de holocelulose e poder calorífico superior tiveram efeito significativo tanto dos clones quanto dos sítios avaliados. Os autores constataram que para a produção de carvão vegetal, o clone II é mais indicado para a região de Ipaba, enquanto que o clone V é o mais indicado para as outras regiões.

Gava e Gonçalves (2008) avaliando clones de *Eucalyptus grandis* verificaram que o aumento do teor de argila influenciou na diminuição do teor de lignina total e aumento do teor de holocelulose. Segundo os autores, a disponibilidade de água que está diretamente relacionada com o teor de argila (quanto maior o teor de argila, maior a disponibilidade de água), influenciou na diminuição da lignina total, pois por ser importante para o transporte de água no tecido vascular, com a restrição hídrica verificada a produção de lignina deve ter sido maior para aumentar a condutividade da água nas árvores, assim como para reforçar a estrutura da árvore. Enquanto que, o aumento do teor de holocelulose está relacionado a maior produção de fotoassimilados que pode ter ocorrido com o aumento da disponibilidade de água aumentando o teor de argila. Rigatto, Dedek e Mattos (2005), verificaram que *Pinus taeda* apresentou maior produtividade em solos argilosos. Da mesma forma, nos estudos de Bognola *et al.* (2010), solos com dominância do teor de argila proporcionaram maiores desenvolvimentos para o *Pinus taeda*.

Para o *T. vulgaris* efeitos de diferentes texturas foram verificados nos estudos de Orellana (2015) que avaliando as propriedades químicas, físicas e mecânicas da espécie em duas plantações, localizadas sobre Latossolos amarelos, sendo um de textura média e o outro de textura argilosa, constataram a ausência ou pouca influência nas propriedades tecnológicas. Silva, Gonçalves e Sales (2016), avaliando o desempenho do *T. vulgaris* em resposta a diferentes combinações de fósforo e potássio em dois diferentes Latossolos amarelos, um de textura média arenosa e outro de textura argilosa, verificaram que em solo arenoso a espécie apresentou maior crescimento em altura e menor ocorrência de bifurcação em relação ao solo de textura argilosa.

Nos estudos de Teixeira (2021), avaliando variáveis dendrométricas em plantações de *T. vulgaris* em Latossolos Amarelos de diferentes texturas (textura argilosa e textura franco-arenosa), verificou que a espécie apresentou melhor desempenho em textura franco-arenosa

para DAP, altura total, percentual de fuste único, volume comercial com casca ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e sobrevivência. Sendo a classe dos Latossolos amarelos uma das mais predominantes na Amazônia e que pode apresentar variação no teor de argila no horizonte B (Vieira, 1988), novos estudos com o objetivo de avaliar o efeito da textura nas características da espécie devem ser realizados, principalmente visando a influência na qualidade da madeira para fins energéticos.

4.5 Dendrocronologia e avaliação da qualidade da madeira por meio da densitometria de raios X

A dendrocronologia é o estudo de datação das árvores, por meio de anéis anuais de crescimento, buscando informações registradas nesses anéis, para aplicações ambientais e históricas (Cahuana, 2019). As camadas de crescimento podem fornecer informações do crescimento de árvores em diferentes ambientes em escalas temporais que podem chegar a vários séculos, sendo utilizadas para estudos de impacto de mudanças em ecossistemas florestais em nível global (Babst *et al.*, 2018). A largura do anel o parâmetro mais utilizado na avaliação da taxa de crescimento da árvore e formação da madeira (Dobner Jr.; Huss; Tomazello Filho, 2018).

Para regiões tropicais, os estudos de dendrocronologia são poucos (Islam; Rahman; Bräuning, 2018) devido à falta de identificação do sinal de crescimento das árvores dessas regiões (Worbes, 2002), devido a grande maioria das árvores tropicais não produzirem anéis de crescimento distintos, características contrárias às encontradas em espécies de clima temperado (Wheeler; Baas; Rodgers, 2007). As dificuldades em estudos dendrocronológicos em regiões tropicais estão relacionados por exemplo, oscilações climáticas, que podem causar a formação de anéis falsos (Prya; Bhat, 1998).

A análise de anéis de crescimento é de grande importância no entendimento das florestas tropicais, sendo necessários a realização de novos estudos, para que, o conhecimento dendrocronológico dessas regiões não sejam limitados, uma vez que, sofrem diretamente as mudanças climáticas globais (Silva; Funch; Silva, 2019). A variação dos limites dos anéis de crescimento nas regiões tropicais sofre variação tanto anatômica, quanto em relação a visibilidade e clareza da madeira (Islam; Rahman; Bräuning, 2018). Além disso, segundo os autores, realizar a detecção desses limites, geralmente não é feito de forma direta, sendo necessário utilizar diferentes abordagens para isso.

Dentre as metodologias dendrocronológicas, tem-se a densitometria de raios X, que pode ser utilizada na demarcação dos limites de anéis de crescimento (Ferreira; Tomazello-Filho, 2009). Esse método permite obter o perfil de densidade da madeira ao longo da amostra

avaliada de maneira anual e/ou intra-anual, e a largura anual dos anéis de crescimento (Jacquin *et al.*, 2017). Além disso, os perfis de densidade intra-anuais permitem a caracterização do anel de crescimento e a determinação exata de onde inicia e termina o lenho inicial e lenho tardio dentro de cada anel (Schweingruber *et al.*, 1978; Koubaa; Zhang; Makni, 2002). A densidade é medida por meio de intervalos de microns e com alta resolução e propicia que seja verificada a variação entre os anéis e dentro de cada anel, assim, sendo possível a identificação dos limites dos anéis de crescimento das árvores (Pagotto *et al.*, 2017).

A utilização de técnicas de densitometria de raios-X foi realizada em espécies tropicais, como o estudo de Ortega Rodriguez *et al.* (2022), que descreveram a formação de anéis de crescimento de doze espécies amazônicas combinando características anatômicas e químicas, com a densitometria de raios X. Quintilhan *et al.* (2021), combinando a técnica de densitometria com as análises quantitativas de raios X, conseguiram visualizar, delimitar e caracterizar de forma precisa anéis de seis árvores tropicais.

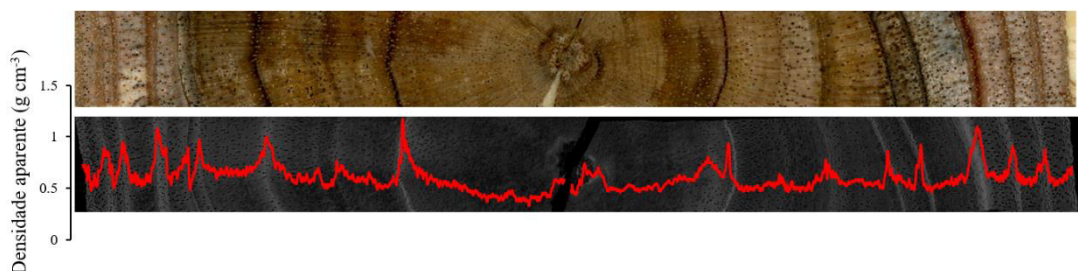
Estudos dendroclimáticos foram avaliados por Gonçalves *et al.* (2021) com a espécie *Nectandra amazonum*, no qual os autores por meio da densitometria de raios X e datação cruzada, construíram a cronologia dos anéis de crescimento das árvores e verificaram que evapotranspiração potencial e a temperatura mínima influenciam no crescimento da espécie. Ainda, estudos de densitometria com espécies comerciais foram desenvolvidas, entre elas, *Gmelina arborea* (Roque; Tomazello-Filho, 2007), *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Ferreira; Tomazello-Filho, 2009; Castro; Tomazello Filho; Surdi, 2014), *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (Câmara *et al.*, 2018), *Tectona grandis* (Gaitan-Alvarez; Moya; Berrocal, 2019), *Pinus taeda* (Ortega Rodriguez; Tomazello-Filho, 2019).

Estudos de densitometria de raios X (Figura 4) para *T. vulgaris* foram desenvolvidos por Barros-Junior (2020), em experimento de diferentes espaçamentos em plantação homogênea da espécie com 8,5 anos de idade com o objetivo de avaliar se diferentes espaçamentos de plantio, tipo de fuste e a idade influenciam na qualidade da madeira de *T. vulgaris* para fins energéticos, identificando o aumento da densidade do lenho no sentido medula-casca, maior diferenciação dos lenhos iniciais e tardios conforme se afasta da medula, além de verificar maior variação de densidade no primeiro anel de crescimento acompanhada da estabilização dessa variação nos anéis posteriores, concluindo que o uso dessa metodologia dendrocronológica é importante para estudos mais precisos da qualidade da madeira de *T. vulgaris*.

Da mesma forma, nos estudos de Moraes *et al.* (2023), avaliando o mesmo experimento com 8,5 anos de idade, com o objetivo de avaliar o efeito da bifurcação, idade e espaçamento

no padrão de variação da densidade e dos anéis de crescimento do lenho de *T. vulgaris* para fins energéticos, verificou que os fustes principais possuem maior densidade aparente e todas as camadas de crescimento referentes a idade de plantação. Já os fustes da bifurcação (fuste secundário) apresentam menor densidade aparente e menor número de anéis.

Figura 4 - Perfil de variação radial da densidade aparente de *T. vulgaris* em plantio de 8, 5 anos distrito de Monte Dourado, Almeirim, Pará, Brasil



Fonte: Banco de dados do projeto (2024).

Diante do exposto nessa revisão de literatura, observa-se o grande potencial que a espécie *T. vulgaris* possui para fins energéticos. Todavia, são necessários mais estudos para melhores entendimentos acerca da espécie, para assim, recomendar seu uso em escala comercial. Entre os novos estudos, é importante entender mais sobre quais os efeitos da adubação em diferentes texturas de solo e a presença de bifurcação sobre a qualidade da madeira. Para isso, o presente estudo visa avaliar a influência desses fatores na densidade da madeira da espécie, visto que, a densidade é um importante parâmetro para indicação de uso de uma espécie para geração de bioenergia (Assis *et al.*, 2016; Protásio *et al.*, 2021).

REFERÊNCIAS

- APG IV. 2016. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. **Botanical Journal of the Linnean Society** 181: 1-20.
- ALMEIDA, G.; BRITO, J. O.; PERRÉ, P. Alterations in energy Properties of Eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: The potencial of mass loss as a synthetic indicator. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 24, p. 9778-9784, 2010.
- ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal [online]**, v. 23, n. 3, p. 66-75, 2007.
- ARAÚJO, E. A. *et al.* Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v.5, n.1, p.187-206, 2012.
- ASSIS, M. R. *et al.* Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**, v. 50, p. 519–536, 2016.

BABST, F. *et al.* When tree rings go global: Challenges and opportunities for retro- and prospective insight. **Quaternary Science Reviews**, v. 197, p. 1-20, 2018.

BAGNOLA, I, A. *et al.* Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus taeda*, v. 30, n. 61, p. 37-49, 2010.

BANG, T. C. *et al.* The molecular–physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. **New Phytologist**, v. 229, p. 2446–2469, 2021.

BARROS JUNIOR, U. O. *Tachigali vulgaris* em plantios homogêneos na Amazônia: parâmetros de crescimento, madeira e carvão vegetal para fins energéticos. 2020. 117 p. Dissertação. (Mestrado em ciências florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2020.

BARROS JUNIOR, U. O. *Tachigali vulgaris* em plantios homogêneos na Amazônia: parâmetros de crescimento, madeira e carvão vegetal para fins energéticos. 2020. 117 f. Dissertação (Mestrado em ciências florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2020.

BARROS-JÚNIOR, U. O. *et al.* Effects of tree spacing and forking on the modification of wood density in a trial plantation of *Tachigali vulgaris* for energy in Amazonia. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 34, n. 1, p. 11-23, 2022.

BARROS, N. F. *et al.* Produção de eucalipto em solos de Cerrado em resposta à aplicação de NPK e de B e Zn. **Revista Árvore**, v.5, n. 1, p. 90-103, 1981.

BARROS, N. F. *et al.* Análise do crescimento de *Eucalyptus saligna* em solo de cerrado sob diferentes níveis de N. P. e K. no Vale do Jequitinhonha, MG. **IPEF**, n.26, p.13-17, 1984.

BARROS, S. V. S. *et al.* Avaliação do potencial energético das espécies florestais *Acacia auriculiformis* e *Ormosia paraensis* cultivadas no município de Iranduba/Amazonas, Brasil. **Madera y bosques**, v. 15, n. 2, p. 59-69, 2009.

BELLOTE, A. F. J. *et al.* Nutrientes minerais, biomassa e deposição de serapilheira em plantio de *Eucalyptus* com diferentes sistemas de manejo de resíduos florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 56, p. 31-41, 2008.

BIAGIOTTI, G. *et al.* Fertilização potássica na implantação de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Jonhson. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 113, p. 129-137, 2017.

BINKLEY, D. *et al.* Variation in whole-rotation yield among *Eucalyptus* genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS project. **Forest Ecology and Management**, v. 462, 2020.

BONASSA, G. *et al.* Scenarios and prospects of solid biofuel use in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2365-2378, 2018.

BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Est. Avançados**, v. 21, p. 185-193, 2007.

BUCHER, C. A. *et al.* Fósforo. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. (org.). **Nutrição Mineral de Plantas**. 2. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2018.p. 401-428.

CAHUANA, L. A. P. **Potencial dendrocronológico de la especie *Tachigali vasquezii* Pipoly y la relación con el cambio climático, en un bosque de terraza baja en el sur oriente del Perú**. Tesis (Título de Ingeniero Forestal y Mediambiental). Madre de Dios: Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, 2019.

CÂMARA, A. P. *et al.* Physiological disorders affecting dendrometric parameters and eucalyptus wood quality for pulping wood. **Cerne**, v. 24, n. 1, p. 27-34, 2018.

CAMPOS FILHO, E. M. **Coleção plante as árvores do Xingu e Araguaia: volume II, guia de identificação**. São Paulo: Instituto Socioambiental, 2009.

CARNEIRO, A. C. O. *et al.* Caracterização energética das madeiras de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes localidades. **Brazilian Journal of Wood Science**, v. 8, n. 3, p. 127-135, 2017.

CARNEIRO, A. C. O. *et al.* Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 375-381, 2014.

CARPANEZZI, A. A.; MARQUES, L. C. T.; KANASHIRO, M. **Aspectos ecológicos e silviculturais de taxi-branco da-terra-firme (*Sclerolobium paniculatum* Vogel)**. Curitiba: EMBRAPA–URPFCS, 1983. 8p. (EMBRAPA URPFCS. Circular Técnica, 8).

CARVALHO, P. E. R. Taxi-branco. Colombo: Embrapa Florestas, 2005. 11 p. (Embrapa Florestas. Circular técnica, 111).

CASTRO, A. F. N. M. *et al.* Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.48, n.6, p.627-635, 2013.
CASTRO, V. R. *et al.* The effect of soil nutrients and moisture during ontogeny on apparent wood density of *Eucalyptus grandis*. **Scientific Reports**, v. 10, p. 1-9, 2020.

CASTRO, V. R.; TAMAZELLO FILHO, M.; SURDI, P. G. Avaliação do perfil radial do lenho de árvores de Pinus (*Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf.) por densitometria de raios X. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 353-360, 2014.

CENTENO, L.N. *et al.* Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v.4, n.1, p. 31-37, 2017.

CERETTA, R. P. S. **Influência do espaçamento, posição radial e tipo de fuste na anatomia do lenho do tachi branco (*Tachigali vulgaris*) em plantações experimentais na Amazônia**. 2021.90 f. Dissertação (Mestrado em ciências florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2021.

CHAMBI-LEGOAS, R. *et al.* Potassium fertilization enhances xylem plasticity and growth recovery of *Eucalyptus grandis* trees in response to drastic changes in water availability. **Forest Ecology and Management**, v. 528, p. 1-12, 2023.

CIVITARESE, V. *et al.* Produção de pellets de madeira a partir de choupos manejados como talhadas com diferentes ciclos de colheita. **Energies**, v. 12, p. 2973–2988, 2019.

COELHO JUNIOR, L. M. *et al.* O desenvolvimento brasileiro das florestas de rápido crescimento com fins energéticos. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 28111–28125, 2020.

COSTA, V. E.; REZENDE, M. A.; RODRIGUES, V. A. Conversion between basic density and apparent density at any moisture content in *Eucalyptus grandis*. **Holzforschung**, v. 68, n. 8, p. 981-986, 2014.

COSTA, L. R.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G. Evaluation and classification of eucalypt charcoal quality by near infrared spectroscopy. **Biomass and Bioenergy**, v. 112, p. 85-92, 2018.

COSTA, S. E. L. *et al.* The effects of contrasting environments on the basic density and mean annual increment of wood from eucalyptus clones. **Forest Ecology and Management**, v. 458, p. 1-10, 2020.

CRUZ, S. L. *et al.* Parâmetros genéticos e seleção inicial de procedências e progênies de taxi-branco (*Tachigali vulgaris*) em Roraima. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 1, p. 258-269, 2020.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, p. 201-214, 2004.

DIAS JÚNIOR, A. F. *et al.* Integrating species and successional classes for wood production in a mixed forest restoration system in a neotropical region. **Journal of Forestry research**, v. 32, p. 2313-2321, 2021.

DOBNER Jr. M.; HUSS, J.; TOMAZELLO FILHO, M. Wood density of loblolly pine trees as affected by crown thinnings and harvest age in southern Brazil. **Wood Science and Technology**, v. 52, p. 465–485, 2018.

DONATO, D. B. *et al.* Influência do diâmetro da madeira de eucalipto na produtividade e propriedades do carvão vegetal. **Brazilian Journal of Wood Science**, v. 11, n. 2, p. 63-73, 2020.

DORAN, J. W.; SARRATONIO, M.; LIEBIG, M. A. Soil health and sustainability. **Advances in agronomy**, v. 56, p. 1-54, 1996.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Org.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA, 1994. p. 3-21.

DURAND, M. *et al.* Do tree rings record changes in soil fertility? Results from a *Quercus petraea* fertilization trial. **Science of the Total Environment**, v. 712, 2020.

ELOY, E. *et al.* Influência do espaçamento nas características energéticas de espécies arbóreas em plantios de curta rotação. **Revista Árvore**, v.38, n.3, p.551-559, 2014.

EMBRAPA. Projetos “Florestas Energéticas na Matriz de Agroenergia Brasileira”. Plano direcional. 2007.

FANZO, J. *et al.* The effect of climate change across food systems: Implications for nutrition outcomes. **Global Food Security**, v. 18, p. 12-19, 2018.

FARIAS, J. *et al.* Survival and growth of native *Tachigali vulgaris* and exotic *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* trees in degraded soils with biochar amendment in southern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 368, p. 173-182, 2016.

FERREIRA, A. T. B.; TAMAZELLO FILHO, M. Caracterização dos anéis de crescimento de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf. por densitometria de raios X. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 83, p. 287-298, 2009.

FIALHO, L. F. *et al.* Application of univariate and multivariate statistical analyzes in clonal selection of *Eucalyptus* spp. for charcoal production. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 3, p. 1659-1683, 2022.

FOLTRAN, E. C. *et al.* Phosphorus pool responses under different P inorganic fertilizers for a eucalyptus plantation in a loamy Oxisol. **Forest Ecology and Management**, v.435, p. 170–179, 2019.

FORTALEZA, A. P. *et al.* Biomassa de espécies florestais para produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1436-1451, 2019.

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

GAVA, J. L.; CONÇALVES, J. L. M. Soil attributes and wood quality for pulp production in plantations of *Eucalyptus grandis* clone. **Scientia Agricola**, v.65, n.3, p.306-313, 2008.

GOMES, M.A.F.; FILIZOLA, H.F. **Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola**. 1. ed. Jaguariúna: EMBRAPA, 2006. 36 p.

GONÇALEZ, J. C. *et al.* Influência do sítio nas propriedades da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Cerne**, v. 15, n. 2, p. 251-255, 2009.

GONÇALVES, J. Q. Minimum temperature and evapotranspiration in Central Amazonian floodplains limit tree growth of *Nectandra amazonum* (Lauraceae). **Trees**, v. 35, p. 1367–1384, 2021.

HATFIELD, J. L.; WALTHALL, C. L. Climate Change: Cropping System Changes and Adaptations. **Encyclopedia of Agriculture and Food Systems**, v. 2, p. 256-265, 2014.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório Anual IBÁ. 2023, 91 p. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2024.

ISLAM, M.; RAHMAN, M.; BRÄUNING, A. Growth-ring boundary anatomy and dendrochronological potential in a moist tropical forest in northeastern Bangladesh. **Tree-Ring Research**, v. 74, n.1, p. 76-93, 2018.

JACQUIN, P. *et al.* X-ray microdensitometry of wood: A review of existing principles and devices. **Dendrochronologia**, v. 42, p. 42-50, 2017.

JOSINO, P. R. S. **Qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima para produtos de celulose**. 2023. 79 f. Dissertação. (Mestrado em ciências florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2023.

KOHLER, M. *et al.* Using tree rings to reconstruct changes in soil P availability – Results from forest fertilization trials. **Dendrochronologia**, v. 54, p. 11-19, 2019.

KOUBAA, A.; ZHANG, S. Y. T.; MAKNI, S. Defining the transition from earlywood to latewood in black spruce based on intra-ring wood density profiles from X-ray densitometry. **Annals of Forest Science**, v. 59, p. 511-518, 2002.

LAVORANTI, O. J. *et al.* Florestas energéticas. In: OLIVEIRA, E. B.; PINTO JÚNIOR, J. E. (org.). **O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**. 1. ed. Brasília - DF: Embrapa Florestas, 2021. p. 941-980.

LIMA, I. L.; GARCIA, J. N. Efeito da fertilização em propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3, p. 601-608, 2011.

LIMA, M. D. R. *et al.* Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. **Biomass and Bioenergy**, v. 140, 2020a.

LIMA, M. D. R. *et al.* Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. **Biomass and Bioenergy**, v. 140, 2020b.

LIMA, M. D. R. *et al.* *Tachigali vulgaris* energy forests: understanding spacing, age, and stem type effects on tree growth patterns and wood density. **New forests**, v. 54, p. 491-513, 2023.

LOUREIRO, B. A. *et al.* Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia* spp para uso industrial. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 1, p. 214-232, 2021.

LOVE-MYERS, K. R. *et al.* Specific gravity responses of 42lash and loblolly pine following mid-rotation fertilization. **Forest Ecology and Management**, v. 257, n. 12, p. 2342-2349, 2009.

MARTORANO, L. G. *et al.* **Zoneamento Topoclimático do Taxi-branco (*Tachigali vulgaris* L.F.) na Amazônia Legal: Estratégias de Planejamento com Metas de Desenvolvimento Sustentável**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2018. 70 p.

MASSUQUE, J. *et al.* Evaluating the Potential of Non-commercial *Eucalyptus* spp. and *Corymbia* spp. for Bioenergy in Brazil. **BioEnergy Research**, v. 16, p. 1592-1603, 2023.

MENEGHETTE, H. H. A. *et al.* Doses de fósforo e potássio em plantas de amendoim na presença e ausência de adubação foliar. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 11, n. 2: 125-134, 2017.

MEURER, E. J. Potássio. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. (org.). **Nutrição Mineral de Plantas**. 2. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2018.p. 429-464.

MOCHIUTTI, S.; QUEIROZ, J. A. L.; MELÉM JUNIOR, N. J. M. Produção de serapilheira e retorno de nutrientes de um povoamento de taxi-branco e de uma floresta secundária no Amapá. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 52, p. 3-20, 2006.

MORAES, L. G. **Efeitos da bifurcação, espaçamento e idade na qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris* proveniente de plantações homogêneas para geração de bioenergia na Amazônia**. 2022. 98 f. Dissertação (Mestrado em ciências florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2022.

MORAES, L. G. *et al.* Forking and planting spacing impacts on wood density, X-ray density, and heartwood proportion of *Tachigali vulgaris*. **Trees**, v. 37, p. 1567-1581, 2023.

MURPHY, C. A. *et al.* Effects of cultivation history and current grassland management on soil quality in northeastern Kansas. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.61, p.75-89, 2006.
NEVES, A.H. B. *et al.* Biomassa e carbono em plantio comercial de paricá na Amazônia. **Nativa**, v. 10, n. 2, p. 154-162, 2022.

OLBA-ZIETY, E. *et al.* Willow Cultivation as Feedstock for Bioenergy-External Production Cost. **Energies**, v. 13, p. 4799-2815, 2020.

OLIVEIRA, S. A.; MORAES, M. L.T.; BUZETTI, S. Efeito da adubação NPK com e sem boro no crescimento de *Eucalyptus citriodora* Hook. **Revista do Instituto Florestal**, v. 13, n. 2, p. 115-120, 2001.

OLIVEIRA, I. R. M. *et al.* Biomass and wood characteristics of the *Scherolobium paniculatum* in different levels of fertilization. **Cerne**, v. 14, n. 4, p. 351-357, 2008.

ÓRFÃO, J. J. M.; ANTUNES, F. J. A.; FIGUEIREDO, J. L. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials - three independent reactions model. **Fuel**, v. 78, p. 349-358, 1999.

ORELLANA, J. B. P. **Valorização tecnológica da madeira de *Tachigali vulgaris* proveniente de plantios de dois sítios distintos localizados no Estado do Amapá**. 2015. 74f. Dissertação (Mestrado em ciências florestais) – Universidade de Brasília, 2015.

ORTEGA RODRIGUEZ, D. R.; CARVALHO, H. W. P.; TOMAZELLO-FILHO. Nutrient concentrations of 17- year-old *Pinus taeda* annual tree-rings analyzed by X-ray fluorescence microanalysis. **Dendrochronologia**, v. 52, p. 67-79, 2018.

ORTEGA RODRIGUEZ, D. R.; TOMAZELLO-FILHO, M. Clues to wood quality and production from analyzing ring width and density variabilities of fertilized *Pinus taeda* trees. **New Forests**, v. 50, p. 821–843, 2019.

ORTEGA RODRIGUEZ, D. R. *et al.* Exploring wood anatomy, density and chemistry profiles to understand the tree-ring formation in Amazonian tree species. **Dendrochronologia**, v. 71, p. 1-17, 2022.

PAGOTTO, M. A. *et al.* Evaluation of X-ray densitometry to identify tree-ring boundaries of two deciduous species from semi-arid forests in Brazil. **Dendrochronologia**, v. 42, p. 94-103, 2017.

PALHETA, L. F. *et al.* Effect of NPK Fertilization on *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima Plants. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 9, p. 188-197, 2019.

PATRÍCIO, E. P. S. **Compreensão dos efeitos de espaçamento e idade na produtividade e ocorrência de bifurcação em plantações de *Tachigali vulgaris* com finalidade energética.** 2021. 45 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2019.

PICCHIO, R. *et al.* Pellet Production from Woody and Non-Woody Feedstocks: A Review on Biomass Quality Evaluation. **Energies**, v. 13, p. 2937-2956, 2020.

PILON, N. A. L.; MELO, A. C. G.; DURIGAN, G. Comparação de métodos para quebra de dormência das sementes de carvoeiro – *Tachigali vulgaris* L.F. Gomes da Silva e H.C. Lima (Família: Fabaceae – Caesalpinioideae). **Revista do Instituto Florestal**, v. 24, n. 1, p.133-138, 2012. Nota científica.

PIOTTO, D. *et al.* Programa de Pesquisa e Desenvolvimento em Silvicultura de Espécies Nativas. p. 20, 2021.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Assessing Proximate Composition, Extractive Concentration, and Lignin Quality to Determine Appropriate Parameters for Selection of Superior Eucalyptus Firewood. **BioEnergy Research**, v. 12, p. 626-641, 2019.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, v. 164, p. 34–45, 2021.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris* visando à produção de carvão vegetal siderúrgico. In: REIS, C. A. F.; GONÇALVES, D. A.; PROTÁSIO, T. P. (org.). **Anais do I Workshop Online Florestas de *Tachigali vulgaris*.** Colombo: Embrapa Florestas, 2022. p. 113-124.

PRYA, P. B.; BHAT, K. M. False ring formation in teak (*Tectona grandis* L.f.) and the influence of environmental factors. **Forest Ecology and Management**, v. 108, p. 215-222, 1998.

QUINTILHAN, M. T. *et al.* Growth-ring boundaries of tropical tree species: Aiding delimitation by long histological sections and wood density profiles. **Dendrochronologia**, v. 69, p. 1-10, 2017.

RIBEIRO, G. B. D; ISBAEX, C.; VALVERDE, S. R. Produção de biomassa florestal para energia em sistemas agroflorestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 92, p. 605-618, 2017.

RIGATTO, P. A.; DEDECK, R. A.; MATTOS, J. L. M. Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda*. **Revista Árvore**, v. 29, n. 5, p. 701-709, 2005.

ROCHA, J. E. C. *et al.* Recomendações de calagem e adubação para espécies florestais: Eucalipto. In: BRASIL, E. C.; CRAVO, M. S.; VIÉGAS, I. J. M. (org.). **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. 2. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, p. 399-401, 2020.

RODRIGUES, R. P. *et al.* Crescimento e mortalidade de *Tachigali vulgaris* L.G. Silva & H.C. Lima em diferentes espaçamentos de plantio para a produção de biomassa. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, p. 1-11, 2020.

ROCKWOOD, D. L.; DIPPON, D. R. Biological and Economic Potentials of Eucalyptus grandis and Slash Pine as Biomass Energy Crops. **Biomass**, v. 20, p. 155-165, 1989.

RODRIGUES, T.; BRAGHINI JUNIOR, A. Technological prospecting in the production of charcoal: A patent study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 111, p. 170-183, 2019.

ROLIM, S. G.; PIOTTO, D. Silvicultura e Tecnologia de Espécies da Mata Atlântica. Editora Rona. 2018. 160 p.

ROQUE, R. M.; TAMAZELLO FILHO, M. Relationships between anatomical features and intra-ring wood density in *Gmelina arborea* applying x-ray densitometry. **Cerne**, v. 13, n. 4, p. 384-392, 2007.

ROSÁRIO, W. A. S. **Variações da densidade básica do lenho de *Tachigali vulgaris* em diferentes espaçamentos de plantio**. 2019. 36 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2019.

RYAN, M. G. *et al.* Cross-site patterns in the response of Eucalyptus plantations to irrigation, climate and intra-annual weather variation. **Forest Ecology and Management**, v. 475, p. 1-10, 2020.

SANQUETTA, C. R. *et al.* Produção e consumo de energéticos de madeira no Brasil entre 2012 e 2017. **Enciclopédia Biosfera**, v. 16, n. 29, p. 1261-1267, 2019.

SANTOS, R. C. *et al.* Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 657-669, 2016.

SANTOS, E. V. **Composição inorgânica da madeira de *Tachigali vulgaris* (tachi branco): implicações na geração de energia e na sustentabilidade da produção florestal na Amazônia**. 2022. 37 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2022.

SANTOS, E. V. **Efeitos do solo, adubação e tipo de fuste nos parâmetros de produção e qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris* visando fins energéticos**. 2024. 110 f. Dissertação (Mestrado em ciência e tecnologia da madeira) – Universidade Federal de Lavras, 2024.

SANTOS, E. V. *et al.* The inorganic composition of *Tachigali vulgaris* wood: implications for bioenergy and nutrient balances of planted forests in the Amazonia. **BioEnergy Research**, v. 17, p. 114-128, 2024.

SAVCI, S. Investigation of Effect of Chemical Fertilizers on Environment. **Apbee Procedia**, v. 1, p. 287-292, 2012.

SCHWEINGRUBER, F. H. The x -ray technique as applied to dendroclimatology. **Tree-Ring Bulletin Tree-Ring**, v. 38, p. 61-91, 1978.

SEDJO, R. A.; BOTKIN, D. Using Foret Plantations TO SPARE Natural Forests. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, v. 39, n. 10, p. 14-30, 1997.

SETTE Jr., C. R. *et al.* Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v.36, n.6, p.1183-1190, 2012.

SETTE JR, C. R. *et al.* Alterações na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação mineral. **Cerne**, v. 20, n2, p. 251-258, 2014.

SETTE JR, C. R. *et al.* Does the Presence of Bark in the Wood of Fast-Growing Forest Species Significantly Change the Energy Potential? **BioEnergy Research**, v. 13, p. 222-228, 2020.

SILVA, A. R.; GONÇALVES, A.; SALES, A. Desempenho do tachi-branco em resposta à adubação combinada de fósforo e potássio em Latossolos. **Acta Iguazu**, v.5, n.2, p. 37-48, 2016.

SILVA, L. F. G.; DE LIMA, H. C. Nomenclatural changes in the genus *Tachigali* Aubl. (Leguminosae - Caesalpinioideae) in Brazil. **Rodriguesia**, v. 58, n. 2, p. 397–491, 2007.

SILVA, M. O. S. **Crescimento e qualidade da madeira da espécie *Tachigali vulgaris* cultivada em diferentes espaçamentos para uso bioenergético**. 2018. 65f. Dissertação (Mestrado em ciências florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2018.

SILVA, R. C. C. **Variabilidade dendrométrica e qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris* para produção de biomassa para energia na Amazônia**. 2019. 45 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2019.

SILVA, M. O. S. *et al.* Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachi-branco trees planted at different spacing for bioenergy purposes. **Journal of Forestry Research**, v. 32, p. 211-224, 2021a.

SILVA, M. O. S. *et al.* Características termogravimétricas e combustão da madeira de *Tachigali vulgaris* proveniente de plantios com diferentes espaçamentos. **Scientia Forestalis**, v. 49, p. 3164, 2021b.

SILVA, M. S.; FUNCH, L. S.; SILVA, L. B. The growth ring concept: seeking a broader and unambiguous approach covering tropical species. **Biological Reviews**, p.000-000, 2019.

SILVA, S.H.G. *et al.* Soil texture prediction in tropical soils: A portable X-ray fluorescence spectrometry approach. **Geoderma**, v. 362, 2020.

SILVA, C. M. M.S.; FAY, E. F. Características do ambiente solo. *In*: SILVA, C. M. M.S.; FAY, E. F. **Agrotóxicos e Ambiente**. 1. ed. Brasília – DF: Embrapa Meio Ambiente, 2004. p. 75-106.

SIMIONI, F. J. *et al.* cadeia produtiva de energia de biomassa florestal: O caso da lenha de eucalipto no polo produtivo de Itapeva - SP. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p. 310-323, 2018.

SIMÕES, P. H. O. *et al.* Ecophysiological aspects of *Tachigali vulgaris* seedlings using different sources and doses of nitrogen. **Australian journal of Crop Science**. v. 12, n. 9, p. 1512-1518, 2018.

SIMÕES, P. H. O. *et al.* Biological use coefficient of biomass of *Tachigali vulgaris* under phosphorus and potassium fertilization: Management technologies for sustainable production of bioenergy in tropical countries. **Australian journal of Crop Science**, v. 16, n. 5, p. 637-648, 2022.

SIMÕES, P. H. O. *et al.* Ecophysiology and multivariate analysis for production of *Tachigali vulgaris* in Brazil: Influence of rainfall seasonality and fertilization. **Journal of Forestry Research**, 2023.

SLUPINSKA, K. *et al.* Public Perception of the Use of Woody Biomass for Energy Purposes in the Evaluation of Content and Information Management on the Internet. **Energies**, v. 15, p. 6888-6898, 2022.

SOARES, J. C. *et al.* Preserving the nutritional quality of crop plants under a changing climate: importance and strategies. **Plant and Soil**, v. 443, p. 1-26, 2019.

KOURY SOBRINHO, R. M. **Caracterização dendrométrica e estimação da altura total de tachi branco (*Tachigali vulgaris*) em um plantio no Pará, um estado da Amazônia brasileira**. 2019. 35 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2019.

SOUSA, V. G. *et al.* Taxi-branco (*Tachigali vulgaris* LF Gomes da Silva & HC Lima): botânica, ecologia e silvicultura. Embrapa Amazônia Oriental-Documents (INFOTECA-E), 2016.

SOUZA, C. R. *et al.* Desempenho de espécies florestais para uso múltiplo na Amazônia. **Scientia Forestalis**, v. 36, n. 77, p. 7-14, 2008.

TEIXEIRA, R. A. C. **Dinâmica de plantações experimentais de *Tachigali vulgaris* L. F. Gomes da Silva & H. C. Lima em resposta à adubação e textura de solo**. 2021. 79 f. Dissertação. (Mestrado em ciências florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2021.

TEIXEIRA, R. A. C. *et al.* Dynamics of experimental plantations of *Tachigali vulgaris* in response to fertilization and soil texture. **New Forests**, v. 55, p. 713-733, 2023.

TOMASELLI, I. *et al.* Caracterização da madeira de Taxi-branco-da-terra-firme (*Sclerolobium paniculatum* Vogel) para energia. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 6/7, p. 33-44, 1983.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G. Dinâmica do potássio nos resíduos vegetais de plantas de cobertura no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 32, p.1609-1618, 2008.

UCELLA-FILHO, J. G. M. *et al.* Clues about wood density and trace-element variability of *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby for bioenergy use. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, p. 56161-56173, 2023.

VAN MAARSCHALKERWEERD, M.; HUSTED, S. Recent developments in fast spectroscopy for plant mineral analysis. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 1-14, 2015.

VIEIRA, L. S. **Manual da ciência do solo**: com ênfase aos solos tropicais. 2. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1988. 464 p.

VIEILLEDENT, G. *et al.* New formula and conversion factor to compute basic wood density of tree species using a global wood technology database. **American Journal of Botany**, v. 105, n. 10, p. 1653-1661, 2018.

VINHA, A. P. C. *et al.* Adsorção de fósforo em solos de regiões tropicais. **Nativa**, v. 9, n. 1, p. 30-35, 2021.

WELFLE, A. Balancing growing global bioenergy resource demands - Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. **Biomass and Bioenergy**, v.105, p.83-95, 2017.

WHEELER, E. A.; BAAS, P.; RODGERS, S. Variations in dicot wood anatomy: a global analysis based on the insidewood database. **IAWA Journal**, v. 28, n.3, p. 229-258, 2007.

WORBES, M. One hundred years of tree-ring research in the tropics – a brief history and an outlook to future challenges. **Dendrochronologia**, v. 20, p. 217-231, 2002.

YANG, L. *et al.* Effects of fertilization and dry-season irrigation on the timber production and carbon storage in subtropical Eucalyptus plantations. **Industrial Crops and Products**, v. 192, p. 1-12, 2023.

ZHANG, Q. *et al.* The Application of Mixed Organic and Inorganic Fertilizers Drives Soil Nutrient and Bacterial Community Changes in Teak Plantations. **Microorganisms**, v. 10, n. 958, p. 2-18, 2022.

5 CAPÍTULO 1

Understanding the variation of wood apparent density of *Tachigali vulgaris* in relation to tree size and forking under different soil conditions in planted forests in the Amazonia

Submetido: Wood Science and Technology (JCR = 3.1; Qualis Capes = A1)

Abstract

Tachigali vulgaris has potential for energy purposes in Amazonia, but several silvicultural aspects and their relationship with wood quality need to be investigated. This study sought to evaluate the combined effects of diameter, height, fertilization, forking, and soil texture on the variation in the apparent density of *T. vulgaris* wood in homogeneous plantations in Amazonia. The study took place in two experimental fertilization test plantations located on yellow oxisols of texture sandy loam and very clayey. The treatments assessed included: without fertilization and with fertilization. Discs were sampled along the height of the stem and the apparent density was determined using the X-ray densitometry technique. We found no effect for fertilization treatments in the wood density at both soil texture conditions. The variation in density between trees accounts for 31% of the total variation, while 69% of the variation is attributed to the longitudinal section of the trees. Diameter at breast height without bark (DBHwob) and forking influences density. Increasing the DBHwob of trees increases density, while trees that are forked tend to reduce density. X-ray densitometry indicated an increase in density in the radial direction (0.389 g cm^{-3} - 0.995 g cm^{-3}), with a reduction in these values from the base (0.724 g cm^{-3}) to the mid-height regions of the trees (0.545 g cm^{-3}), generally followed by an increase towards the top (0.618 g cm^{-3}). The results show large variations in the wood density of *T. vulgaris* trees and provide important information for the sustainable management of plantations for bioenergy in Amazonia.

Keywords: Energy forests, silviculture, wood quality, x-ray densitometry

List of symbols and abbreviations			
BDMEP	Meteorological Database for Teaching and Research	K ₂ O	potassium oxide
INMET	National Institute of Meteorology	DBH	diameter at breast height
pH	hydrogen potential	DBHeq	equivalent diameter at breast height
SOM	soil organic matter	DBHwob	diameter at breast height without bark
P	phosphorus	TH	total height
K	potassium	WRD	weighted apparent density of the growth ring
Ca	calcium	WWD	weighted average apparent wood density
Mg	magnesium	g	transversal area
H	hydrogen	GRW	growth ring width
Al	aluminum	EW	earlywood
CEC	cation exchange capacity	EWD	earlywood density
BS	base saturation	LW	latewood
AS	aluminum saturation	LWD	latewood density
N	Nitrogen	GRD	Growth ring diameter
P ₂ O ₅	phosphorus pentoxide		

5.1 Introduction

Brazil has approximately 9.94 million ha of planted forests. However, the distribution is not homogeneous in the country, with a greater concentration of plantations in the southeast, south, and center-west regions. On the other hand, they are scarce in the northern region (Ibá 2023). 76% (7.60 million ha) of plantations contain exotic species of the genera *Eucalyptus* and *Corymbia* (Ibá 2023).

The dependence on exotic species could bring future problems for the national forest scenario concerning climate change. It has already been reported that climate change could cause eucalypt plantations in Brazil to become vulnerable, making up to 47% of plantations economically unviable (Florêncio et al. 2022). Significant loss of eucalypt productivity has already been reported in the literature in environments with higher temperatures and lower precipitation rates (Binkley et al. 2020).

Eucalyptus plantations are the main sources of wood converted into charcoal used to produce pig iron and steel in Brazil and the Amazonia (Pena-Vergara et al. 2022). However, these energy forests are incipient in the Carajás region, located between the states of Pará and Maranhão. The Carajás complex comprises the second-largest steel pole in the country, with 9.5% of the pig iron produced in 2021 (Sindifer 2022). The Brazilian Amazonia needs sustainable biomass to supply the region's industrial enterprises with heat and to meet the demand for charcoal in the region's steel complex to produce pig iron (Santos et al. 2023). Thus,

the energetic potential of native species with broad phenotypic plasticity needs to be studied to meet the needs of the region.

Using native species in plantations for energy purposes has many benefits, as follows: (I) adaptability to the environment (Moraes et al. 2023); (II) reduced pressure on native forests and mitigation of the climate change effects (Teixeira et al. 2023); and (III) greater biodiversity conservation (Calviño-Cancela et al. 2012). In this context, the expansion of forest plantations for energy purposes with species native to the region can provide high productivity and quality wood for bioenergy (Santos et al. 2023).

A species with great energy potential is the *Tachigali vulgaris* L.F Gomes da Silva & H.C Lima, commonly called “tachi branco”, “cachamorra-branca” or “carvoeiro” (charcoal tree in Portuguese), belonging to the Fabaceae family. The species has a wide territorial distribution in South American countries, such as Bolivia and Brazil, mainly in Amazonia and Cerrado biomes (Van Der Werff 2008; Santos et al. 2023). It can potentially replace eucalypt in energy plantations in these biomes (Farias et al. 2016), since it has rapid growth and good adaptability to sandy and clayey textured soils, and to environments with temperatures ranging from 22 °C to 33°C and average rainfalls between 1635 mm year⁻¹ and 2293 mm year⁻¹, with well-defined rainy and dry seasons (Farias et al. 2016; Barros-Junior et al. 2022; Santos et al. 2023; Teixeira et al. 2023; Lima et al. 2023). Thus, the species has the potential to be used in a wide territorial range throughout the world's tropics.

The bioenergy potential of the species was studied over the years and showed promising results, especially about the physical, chemical, and thermal properties of the wood. *T. vulgaris* is fast-growing, with an average annual increase of 2.38 m year⁻¹ in height and 2.73 cm year⁻¹ in diameter at 102 months (Lima et al. 2023) and a volume of 25.80 m³ ha⁻¹ year⁻¹ at 120 months (Teixeira et al. 2023), with basic density ranging from 0.443 to 0.529 g cm⁻³ (Barros-Junior et al. 2022), energy density of 9151 MJ m⁻³ and a wood heating value of 19.7 MJ kg⁻¹ (Silva et al. 2021) at 87 month.

Even though native species have advantages for commercial plantations, factors related to growth can influence wood anatomy and, consequently, wood density and other physical properties (Castro et al. 2020). For this reason, research into factors that affect wood properties is important for the silviculture of Amazonian species (Moraes et al. 2023). Studies on *T. vulgaris* wood quality are crucial for understanding the impacts of silvicultural practices. This research contributes to the development of management guidelines and the definition of the most effective strategies to optimize energy production and, consequently, fill gaps in the species production chain (Lima et al. 2023).

Wood basic density stands out among the properties that can be affected by several factors, in addition to influencing the destination of the wood and energy generation, (Dias Júnior et al. 2021). Variability in wood density occurs between species, between trees belonging to the same species, and even within a tree (Billard et al. 2021). The literature discusses factors influencing the basic density of *T. vulgaris* wood. Lima et al. (2023) evaluated experimental plantations of *T. vulgaris* at 87 and 102 months and found that older trees with greater spacing had higher basic wood density. Barros-Junior et al. (2022) and Moraes et al. (2023) evaluated young plantations of the species (87 and 102 months) and found that forking has a negative influence on the density of *T. vulgaris* wood.

Dendrochronology is a powerful tool for evaluating how environmental variables affect wood quality by advantageously providing time-scale data and annual resolution based on growth rings (Bouriaud et al. 2015). However, few studies use growth rings to assess the effect of fertilization on wood quality (Ortega Rodriguez and Tomazello-Filho 2019). Furthermore, although fertilization can promote greater tree growth (Chambi-Legoas et al. 2020, 2021; Simões et al. 2022; Kulmann et al. 2023), it is important to evaluate the possible effects of interaction between fertilization and soil textures for *T. vulgaris* to increase biomass production and promote sustainable management for bioenergy (Teixeira et al. 2023), and evaluate the influences on wood density. It has already been reported that growth rings produced after fertilization (e. g. P and K) may show lower densities in the first few years (3 to 6 years after application), generally being a temporary effect (Antony et al. 2009; Love-Myers et al. 2009; Kohler et al. 2019; Ortega Rodriguez and Tomazello-Filho 2019; Chambi-Legoas et al. 2021).

X-ray densitometry is an efficient method to determine wood density at the ring or intra-ring level, and it is considered a benchmark in dendrochronology (Jacquin et al. 2017). Studies on the use of X-ray densitometry in wood are reported in the literature for *Eucalyptus* (Câmara et al. 2018; Almeida et al. 2020; Barbosa et al. 2024), *Pinus* (Castro et al. 2014; Ortega Rodriguez and Tomazello-Filho 2019), *Tectona grandis* (Gaitan-Alvarez et al. 2019; Curvo et al. 2024), *Schizolobium parahyba* (Ucella-Filho et al. 2023), and *Tachigali vulgaris* (Moraes et al. 2023).

Studies evaluating experimental plantations of *T. vulgaris* (Table 1) have focused on different aspects, such as the potential of the species to recover degraded areas and the effects of spacing and/or forking on the quality of the wood for energy purposes. However, no research has evaluated the impacts of fertilization, soil texture, and forking on the variation of wood density of the species.

In this sense, the scientific question that guided the study was: does the density of *T. vulgaris* wood vary according to diameter, height, fertilization, forking and soil texture? We tested the hypotheses that regardless of soil texture: (I) trees with larger diameters and heights have higher average densities regardless of P and K fertilization; (II) fertilized trees will have lower wood densities in the initial years; (III) forked trees will have lower wood densities and greater variations in density in the pith-bark and base-top directions. Therefore, this study aimed to understand the combined effects of diameter, height, fertilization, forking, and soil texture on the variation in the apparent density of *T. vulgaris* wood in Amazonian homogeneous plantations.

Table 1 Literature on *T. vulgaris* plantations

Tested factor	Age (months)	Objective	Methodology (density)	Reference
Restoration of degraded areas	Up to 48	To evaluate how varying levels of biochar impact the survival and growth of <i>T. vulgaris</i> trees and Eucalyptus hybrids in depleted soils.	-	Farias et al. (2016)
Spacing	87	To evaluate different spacings on the chemical, physical, anatomical, and yield properties of <i>T. vulgaris</i> .	NBR 11941 standard (ABNT, 2003)	Silva et al. (2021)
Spacing and forking	87	To evaluate the effect of spacing and forking on the basic density of <i>T. vulgaris</i> wood.	NBR 11941 standard (ABNT, 2003)	Barros-Junior et al. (2022)
Spacing and forking	87 and 102	To evaluate the effects of spacing, forking, and age on growth variables and basic density of <i>T. vulgaris</i> wood.	NBR 11941 standard (ABNT, 2003)	Lima et al. (2023)
Spacing and forking	102	To evaluate the impact of stem spacing and type on basic density, X-ray densitometry, and heartwood/sapwood ratio.	NBR 11941 standard (ABNT, 2003); X-ray densitometry	Moraes et al. (2023)
Spacing	87	To evaluate the export of nutrient in <i>T. vulgaris</i> trees and investigating the technological implications of ash deposition from wood combustion at different spacings.	-	Santos et al. (2023)
Fertilization	Up to 120	To evaluate the influence of nutritional doses on dendrometric variables in two different soil textures.	-	Teixeira et al. (2023)
Fertilization, soil texture, and forking	132	To evaluate the effects of fertilization and forking in two soil texture classes on the variation of bulk density using X-ray densitometry.	X-ray densitometry	Current study

5.2 Material and methods

5.2.1 Characterization and history of the study area

The study area is located at the Jari Celulose S.A. company, in two homogeneous *T. vulgaris* plantations of approximately 1.6 ha each, in the municipality of Almeirim, Pará, Brazil. The plantations are located on yellow oxisol. The experimental crops were implemented in soils with sandy loam (A1; geographic coordinates 0°47'17.13" S and 52°37'8.32" W) and very clayey (A2; geographic coordinates 0° 53' 29.30" S and 52°29'15.09" W). The plantations are approximately 22 km apart in a straight line (Fig. 1a).

The Köppen-Geiger climate classification for the region is the *Am* type, with intermediate characteristics between *Af* and *Aw* (Alvares et al. 2013). The study area presents a rainfall regime with a brief dry period from August to November and an average annual rainfall of 2145 mm (Fig. 1b). Average temperatures are from the meteorological station located in the municipality of Monte Alegre, Pará, since there is no data available for the study region. The data was obtained from the Meteorological Database for Teaching and Research (BDMEP) of the Brazilian National Institute of Meteorology (INMET 2023).

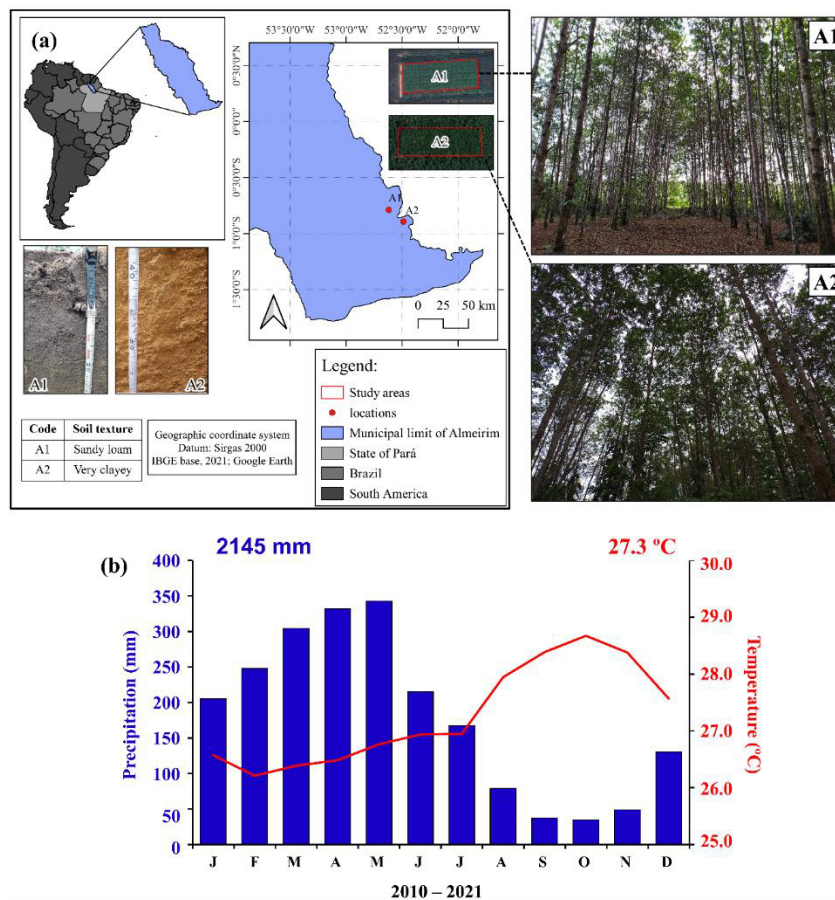


Fig. 1 Location of the study area, on yellow oxisols with a sandy loam (A1) and very clayey (A2) texture, in Monte Dourado, district of the municipality of Almeirim, Pará, Brazil (a); climograph of the study area (b)

The experimental plantations were set up in 2010 and, before their implementation, the area was occupied with *Eucalyptus* sp. plantations. The spacing of the two areas was 3 m x 2 m (1667 trees ha⁻¹). The seeds were collected in four different municipalities: Almeirim, Belterra, Santarém (Pará state), and Macapá (Amapá state).

The areas were prepared by manual chemical cleaning with post-emergence herbicide and correction of soil acidity with limestone application (1500 kg ha⁻¹) 30 days before planting the seedlings. The chemical and granulometric characterization of the soil, before the experiments were prepared and installed is depicted in Table 2 (Teixeira et al. 2023).

Table 2 Chemical and granulometric characterization of the two experimental areas of *T. vulgaris* in Monte Dourado, municipality of Almeirim, Pará, Brazil

	Texture					
	Sandy loam			Very clayey		
Depth (cm)	0-10	10-20	20-40	0-10	10-20	20-40
Soil fertility						
pH (H ₂ O)	4.0	4.1	4.2	4.2	4.1	4.0
SOM (g kg ⁻¹)	11.1	10.5	9.5	21.5	14.8	11.3
P (mg dm ⁻³)	5.6	5.9	3.3	3.1	1.9	0.7
Ca (cmolc dm ⁻³)	0.15	0.14	0.14	0.53	0.36	0.35
Mg (cmolc dm ⁻³)	0.06	0.06	0.06	0.3	0.17	0.16
K (cmolc dm ⁻³)	0.03	0.02	0.02	0.05	0.02	0.02
Al (cmolc dm ⁻³)	1.27	1.27	1.17	1.11	1.11	1.16
H (cmolc dm ⁻³)	3.4	3.5	3.1	4.5	3.9	3.3
CEC (cmolc dm ⁻³)	4.91	4.99	4.49	6.49	5.56	4.49
BS (%)	5	4	5	14	10	11
AS (%)	84	85	84	56	67	69
Particle-size						
Sand (g kg ⁻¹)	840	856	804	195	158	105
Silt (g kg ⁻¹)	55	11	26	131	108	156
Clay (g kg ⁻¹)	105	133	170	674	734	739

pH: hydrogen potential, SOM: soil organic matter, P: phosphorus, K: potassium, Ca: calcium, Mg: magnesium, H: hydrogen, Al: aluminum, CEC: cation exchange capacity, BS: base saturation, AS: aluminum saturation. Source: Adapted from Teixeira et al. (2023)

5.2.2 Experimental design and sampling of *Tachigali vulgaris* wood

The experiments were arranged in a randomized block design, in a factorial scheme, with four blocks. Each block had 12 treatments, consisting of different combinations of four doses of phosphorus (P) and three doses of potassium (K). This resulted in 48 plots for each experimental area, with each plot measuring 12 m x 14 m (168 m²), each made up of 4 rows with 7 plants (28 plants/plot). Among these, the six central trees of each plot were considered

permanent plots. They were monitored annually to conduct research into growth and mortality rates, as described in detail by Teixeira et al. (2023).

Triple superphosphate (41% P_2O_5), a fertilizer used as a source of P, was applied to the bottom of the hole during planting. Potassium chloride (58% K_2O), a fertilizer source of K, was applied in installments, 40% on the 20th day and 60% on the 90th day after planting. The species has the capacity for symbiotic association with nitrogen-fixing bacteria. An initial reinforcing nitrogen (N) support dose of 21 kg ha⁻¹ N (ammonium sulfate) was applied on the 20th day after planting for all treatments. More information about the experiment can be found in Teixeira et al. (2023).

The effect of the fertilization (phosphorus and potassium) in two textural classes of soil on the density of *T. vulgaris* wood was studied based on two treatments: no fertilization (control) and the maximum fertilization (320 kg ha⁻¹ of P_2O_5 and 199 kg ha⁻¹ of K_2O) tested in a previous study (Teixeira et al. 2023), as shown in Table 3.

Table 3 Fertilization experiments in two areas with *T. vulgaris* evaluated in Monte Dourado, municipality of Almeirim, Pará, Brazil

Fertilization	At planting dose (kg ha ⁻¹)		After planting dose (kg ha ⁻¹)					N
	Triple superphosphate	P_2O_5	Potassium chloride		K_2O		Ammonium sulfate	
	-		20th day	90th day	Total	Total	20th day	
Without	0	0	0	0	0	0	100	21
With	780	320	137	206	343	199	100	21

Source: Adapted from Teixeira et al. (2023)

In August 2021, 132 months after planting, ≈ 2.5 cm-thick discs were sampled along the commercial height (defined up to a minimum diameter of 5 cm with bark). The disks were sampled at 0%, diameter at breast height (DBH, measured at 1.30 m from the ground), 25%, 50%, 75%, and 100% of the commercial height for non-forked trees (single stem). In forked trees, the same sampling was applied to the main and secondary stems, with a further sample at the base of the fork and one at the beginning of the main stem (Figs. 2a and 2b). A total of 32 trees were sampled (16 trees in sandy loam soil and 16 trees in very clayey soil), totaling 328 wood disks collected. These disks were prepared and analyzed using the X-ray densitometry technique (Figs. 2c-2h). Information on the percentage of forking and mortality, as well as the dendrometric variables of the plantations are shown in Table 4.

The mean equivalent diameter was obtained by taking the square root of the sum of the square diameters at the breast height (DBHeq) of the tree stems, thus representing the equivalent diameter for a given segmental area (Moraes et al. 2023). The equivalent mean diameter was used due to many forked trees as a method to summarize the dimensions of the stem at the tree level (Teixeira et al. 2023).

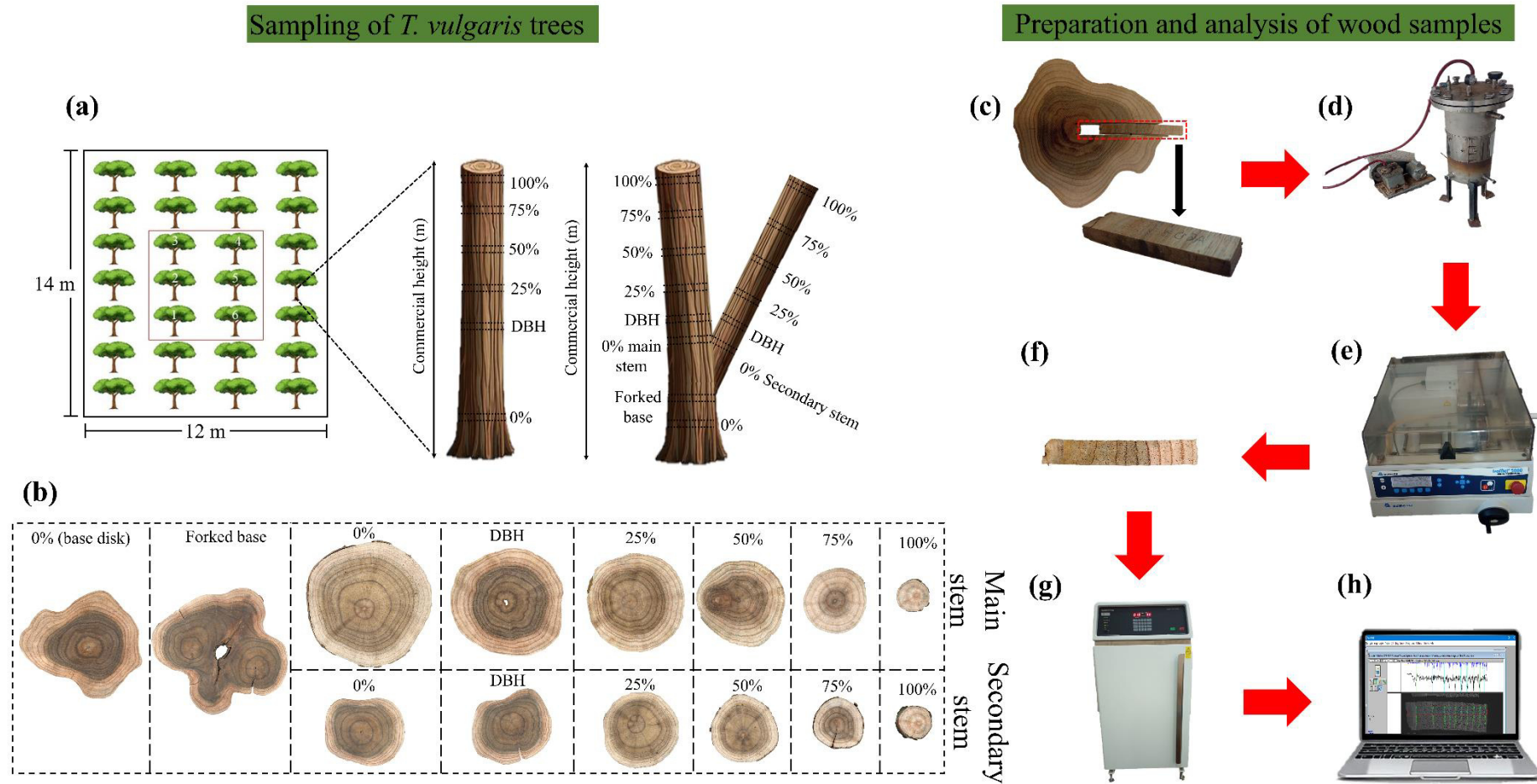


Fig. 2 Wood sampling of non-forked and forked *T. vulgaris* trees in Monte Dourado, district of the municipality of Almeirim, Pará, Brazil (a), the cross-section of *T. vulgaris* disks taken in different relative positions (b), sampling for X-ray densitometry analysis (red rectangle represents cross-sectional radius) (c), saturation of samples before cutting (d), precision metallographic cutter ISOMETTM 5000 Buehler (e), specimen to be X-rayed (f), Faxitron X-ray, model LX 60 for digital images (g), and sample measurement in WinDendroTM software (h)

Table 4 Percentage of forking, mortality, and dendrometric information of the 11-year-old experimental areas of *T. vulgaris* evaluated in Monte Dourado, district of the municipality of Almeirim, Pará, Brazil

Texture	Fertilization	Forked trees (%)	Mortality (%)	DBHeq (cm)	TH (m)	Volume with bark (m ³ ha ⁻¹)
Sandy loam	Without	75 ± 24	33 ± 20	12.74 ± 2.81	18.80 ± 4.38	251.05 ± 87.75
	With	44 ± 40	35 ± 24	13.98 ± 4.33	18.14 ± 4.61	297.97 ± 147.48
Very clayey	Without	55 ± 42	45 ± 26	13.98 ± 3.56	19.68 ± 5.06	318.03 ± 167.09
	With	26 ± 22	56 ± 28	15.01 ± 4.36	19.91 ± 5.44	248.41 ± 108.13

DBHeq: diameter at breast height equivalent, TH: total height. Average ± standard deviation.

5.2.3 Determination of apparent density by X-ray densitometry

A cross-sectional radius was selected from the disks of all heights obtained from the wood of *T. vulgaris*, with dimensions of approximately 1 cm wide x 2.5 cm thick x length equal to the chosen radius of the disk (Fig. 2c). Subsequently, all the rays of the collected wood were saturated to avoid heterogeneity in the thickness of the samples (Fig. 2d) at the time of cutting in the transverse direction on the ISOMETTM 5000 Buehler precision metallographic cutter with a diamond blade (Fig. 2e). The specimens generated had dimensions of approximately 1 cm wide x 1 mm thick x length equal to the chosen radius of the disk (Fig. 2f). A caliper was used to check the precision of the cut and the homogeneity of the sample thickness throughout the specimen. The samples were then taken to an air conditioning unit with a temperature of 20°C and 60% relative humidity to reach a stable moisture content of 12% (Tomazello et al. 2008).

The samples were subjected to X-ray imaging with a cellulose acetate calibration wedge to obtain quantitative information, using Faxitron digital X-ray equipment (model LX 60), where they were irradiated for 5 s at a voltage of 30 kv. Afterward, the digital images obtained were analyzed using WinDendroTM software (Regent Instruments Inc.) (Fig. 2h) to obtain the density profiles (pith-to-bark direction) and average density values per growth ring of the *T. vulgaris* trees. The following variables were also quantified using WinDendroTM software: growth ring width (GRW), earlywood width (EWW), latewood width (LWW), earlywood density (EWD) and latewood density (LWD).

5.2.4 Statistical analysis

Firstly, descriptive statistics (average, standard deviation, and coefficient of variation) were carried out to analyze the data. The apparent density values were evaluated in three different ways: average values per tree, average values per year (cambial age, without considering the heights), and average values for positions sampled along the stem.

Weighted averages of the apparent density of the growth ring as a function of the cross-sectional area (g) occupied by the sample (Eq. 1) were calculated to determine the weighted apparent density of the growth ring (WRD) of *T. vulgaris* discs. The value of the last growth ring represents the density of the disc since it was weighted by the total cross-sectional area of the disc. Furthermore, it is important to highlight that the weighted average was performed for each growth ring, thus, the total transversal area considered varies considering the number of growth rings (Fig. A1).

$$WRD = \frac{RD_1 * g_{ring1} + RD_2 * g_{ring2} + \dots + RD_X * g_{ringX}}{\sum g_{ring} Total} \quad \text{Eq. (1)}$$

where: WRD is the weighted apparent density of the growth ring (g cm⁻³), RD is the apparent density of the growth ring obtained by the WinDendroTM software (g cm⁻³), g_{ring} is the transversal area occupied by the growth rings (cm²), $g_{ring} Total$ is the total transversal area occupied by the growth rings (cm²).

The weighted averages between the apparent density and cross-sectional area of the discs from different longitudinal positions were performed to calculate the weighted average apparent wood density (WWD) of *T. vulgaris* trees (Eq. 2), obtaining the weighted density by sections (examples: between 0% and DBH; between DBH and 25%). Subsequently, the weighted density was performed between the density of the sections and their volumes (Eq. 3) obtaining the average apparent density of the tree.

$$WWD_{section} = \frac{WWD_{Xposition} * g_{Xposition} + WWD_{Yposition} * g_{Yposition}}{\sum g_{X,Y position}} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$WWD_{tree} = \frac{WWD_{section 1} * V_{section 1} + WWD_{section 2} * V_{section 2} + \dots + WWD_{seção n} * V_{seção n}}{\sum V Total} \quad \text{Eq. (3)}$$

where: WWD_{section} is the apparent density of the section between two sampled longitudinal positions (g cm⁻³), WWD_{Xposition} is the average apparent density of the disk sampled at position X (g cm⁻³), WWD_{Yposition} is the average apparent density of the disk sampled at the position above position (g cm⁻³). $g_{Xposition}$ is the transversal area of the disk sampled at position X (cm²), $g_{Yposition}$ is the transversal area of the disk sampled at the position above the position X (cm²). $\sum g_{X,Y position}$ is the sum of the transversal areas of position X and Y, WWD_{tree} is the weighted average apparent wood density (g cm⁻³), $V_{section}$ is the unshelled volume of the section between two sampled longitudinal positions (m³), and VTotal is the volume without bark of the tree (m³).

Subsequently, the analysis of variance (ANOVA) showed that there was no block effect ($p > 0.05$) regardless of the form of apparent density evaluated. For the average tree density values, the validity of the analysis of variance was checked using the basic assumptions of homogeneity of variances (Bartlett test), normality of residuals (Shapiro-Wilk) and

autocorrelation of residuals (Durbin-Watson test) at a 5% significance level. The variation in density within and between trees was analyzed using a multivariate analysis of variance with the Randomization Test (Pillar; Orlóci, 1996; Pillar, 2013). To assess which experimental factors influence the weighted average apparent wood density (WWD) of *T. vulgaris* trees, a complete model was adjusted using Generalized Linear Models (GLM) with WWD as the dependent variable and the following independent variables: diameter at breast height without bark (DBHwob = 1.30m), forking, commercial height, soil textural class and fertilization. The model was specified with a normal distribution (Gaussian family) and an identity link function.

For the average density values per year and per stem position (0%, DBH, 25%, 50%, 75% and 100% of commercial height), the assumptions of homogeneity of variances (Bartlett test) and normality of residuals (Shapiro-Wilk), being tested at a 5% significance level. The density dataset for the 2nd, 4th, 5th, 7th, and 8th years and DBH positions and 50% of the commercial height showed a non-normal trend, being necessary the data transformation was performed using the Box and Cox methodology (1964). Next, the data were tested using the Student's t-test ($p < 0.05$), where the means between treatments (comparison between non-forked and forked trees; comparison between without fertilization and with fertilization trees; and comparison between sandy loam and very clayey soil trees) were compared for each year and each sampled stem position. All statistical analyses were performed using the statistical software R (version 4.2.3).

Aiming to describe the variation in wood density in the radial (pith-bark) and longitudinal (base-top) directions, density profiles were created considering data obtained by X-ray densitometry of the following cross-sections: 0% (base), DBH, 25%, 50%, 75% and 100% of the commercial height. The selection of representative trees was based on the criteria of (I) trees with samples at all collection heights and (II) good quality of the digital image for reading the X-ray density.

The density dataset was interpolated to understand the distribution of X-ray density within trees and between treatments, as carried out by Moraes et al. (2023). We determined the interpolation points from (I) the sample in a longitudinal position with the radius of the greatest number of X-ray density records; (II) reducing the data set based on the amplitude of the reference sample, with 30 points being assigned as a basis for reduction; and (III) from the reduction performed on the data set, we created pairs of coordinates between the average X-ray density and the radial distance to maintain the spatiality of the data. The reduction of the data set was carried out in the R language (version 4.2.3), using the tidyverse package for data

manipulation (Wickham et al. 2019). Point interpolation was performed using QGIS software version 3.28.2 (QGIS Development Team 2022) with the tool Global Polynomial Interpolation.

5.3 Results and discussion

5.3.1 The apparent density of *T. vulgaris* wood and influence predictors

The weighted average wood apparent density (WWD) found for *T. vulgaris* trees was 0.632 g cm^{-3} (Standard Deviation; SD = 0.098 g cm^{-3}), with the lowest value found being 0.450 g cm^{-3} and the highest value being 0.725 g cm^{-3} (Fig. 3). We evidenced significant variation in density between individuals and within the individual, through the distribution of minimum and maximum density values for each tree. Multivariate analysis of variance demonstrated that the density variation between trees represents 31% of the total variation found in the data, while 69% is attributed to the density variability that occurs along the longitudinal section of the trees ($p < 0.001$; Table A1). Furthermore, the average latewood density (0.787 g cm^{-3} , SD = 0.098 g cm^{-3}) was 34% higher than the earlywood density (0.589 g cm^{-3} , SD = 0.093 g cm^{-3}) (Table A2).

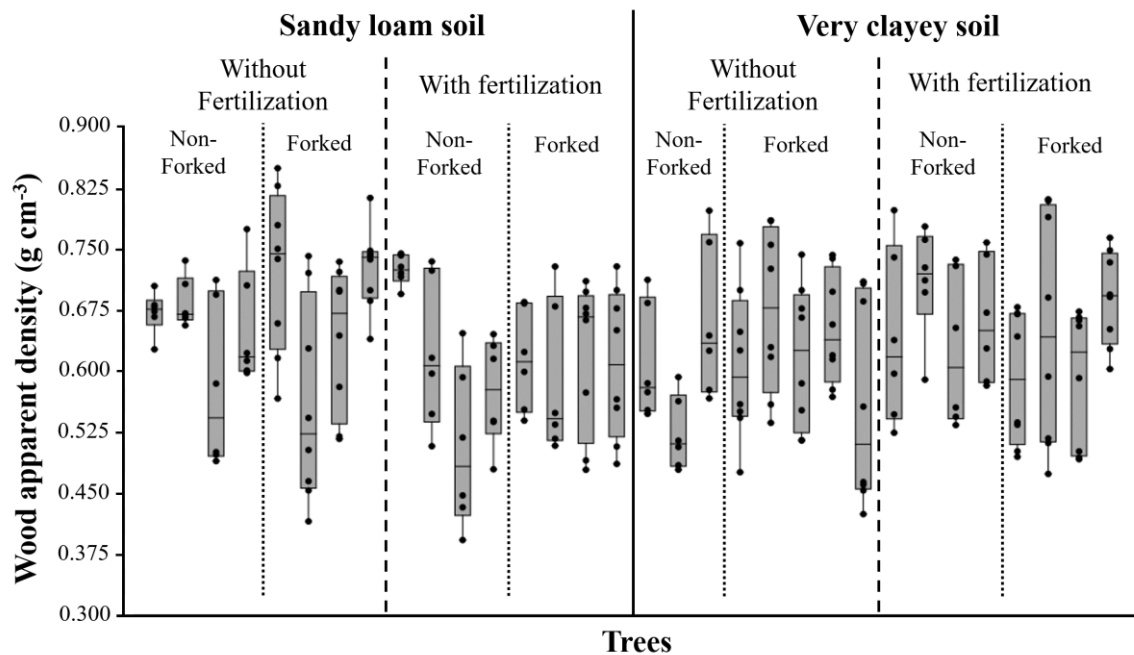


Fig. 3 *T. vulgaris* wood apparent density data per tree, considering soil textural classes and fertilization

Wood density is an important parameter for producing thermal energy since it directly influences the energy density of wood (Protásio et al. 2019) and charcoal (Lima et al. 2020), in addition to the charcoal mechanical resistance (Assis et al. 2016). As apparent density is directly related to basic density (Vieilledent et al. 2018; Dias Júnior et al. 2021), the results of this study

directly influence the energy parameters related to the wood basic density and charcoal apparent relative density.

The individual-within variation in apparent density was high and greater than the between-trees variation for *T. vulgaris*. These results suggest that, in different positions of the stem (longitudinal direction), the energy properties influenced by density will differ; hence the quality of derived charcoals also will. Therefore, the classification of density along the stem is important for the optimal use of wood (Moraes et al. 2023) and supports the management strategies for the species for the production of firewood and charcoal. For instance, in the planning and management of *T. vulgaris* energy forests, the different longitudinal positions could be considered by grouping stem regions and indicating the use of wood (firewood, charcoal for domestic use, and charcoal for steelmaking use).

Most average apparent densities found for *T. vulgaris* trees were higher than those obtained for 2-year-old (0.520 to 0.540 g cm⁻³) by Sette Júnior et al. (2009) and 4-year-old (0.520 and 0.550 g cm⁻³) by Castro et al. (2020) *Eucalyptus grandis* trees by X-ray densitometry. It is important to highlight that species of the *Eucalyptus* genus, such as *E. grandis*, are widely used and recommended for charcoal production (Massuque et al. 2023).

Likewise, the results obtained by X-ray densitometry analysis were greater than 0.470 g cm⁻³ verified by Ucella-Filho et al. (2023) when evaluating a plantation of *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* for seven years for bioenergy. Furthermore, our results were similar to the 0.600 to 0.740 g cm⁻³ variation found in fast-growing *Tectona grandis* seminal and clonal plantations evaluated at different ages (5, 10, 15 and 20 years) (Curvo et al. 2024).

The variation in density between *T. vulgaris* trees may be related to earlywood (EW) and latewood (LW) proportions were highly variable (average CV of the EW/LW ratio = 57.03%) between and within trees (Table A2). As LW is denser than EW because of thicker cell walls and smaller lumens (Carteni et al. 2018; Wang et al. 2023), such proportions probably affected the average apparent density.

However, as our results suggest, the greatest density variation in the species occurs within trees (different stem positions). This may be due to the anatomical variations that occur along the stem (Oliveira et al., 2018; Mendes et al. 2022), mainly influenced by the difference in cambial age. Over the age of trees, anatomical characteristics change, such as the length of fibers, cell wall thickness, cell wall fraction, fiber wall to lumen ratio, and tangential diameter of vessels, among other anatomical characteristics (Palermo et al. 2015; Liu et al. 2020), directly influencing the wood density.

Furthermore, it is important to highlight that the seeds came from different tree matrices (Item 2.1) and the genetic variability of *T. vulgaris* seeds has a great influence on the anatomical and physical characteristics of the wood (Silva et al., 2021). Thus, we believe that genetic variability combined with the environmental response of each individual may have influenced the different proportions of EW/LW and anatomical variables along the stem and consequently the variation in density between and within trees.

By analysis of variance (ANOVA) it was verified that there was a significant difference ($p < 0.001$), therefore, some of the predictors influence the average density of *T. vulgaris* trees. Among the five independent variables (DBHwob, presence or absence of forking, commercial height, soil textural class, and presence and absence of fertilization) evaluated (Table 5, Fig. 4), it was found that the factors DBHwob of the trees ($p = 0.0006$) and forking ($p = 0.0409$) influenced the apparent density. Increasing the DBHwob of trees increases apparent density, while trees that are forked tend to reduce apparent density. Non-forked trees with a DBHwob between 10.51 and 14.98 cm had an apparent wood density between 0.450 and 0.550 g cm⁻³, while forked trees with a higher DBHwob (18.44 to 24.50 cm) had densities between 0.666 and 0.725 g cm⁻³ (Fig. 4). The negative effect of forking can be seen in forked trees with DBHwob ranging from 18.77 to 22.85 which had lower densities (0.593 to 0.656 g cm⁻³) when compared to non-forked trees in the same diameter range.

Table 5 The generalized linear model (GLM) analyses using the selected complete model (a) and the simplified model removing predictors that do not influence ($p > 0.05$) the average apparent density of *T. vulgaris* wood (b)

Coefficients	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(a) complete model: glm (WWD ~ DBHwob + commercial height + Stem type + textural class*Fertilization, family=gaussian (link = "identity")) AIC: -88.148				
(Intercept)	0.586072	0.093599	6.262	1.50E-06***
DBHwob	0.013736	0.003474	3.955	0.000556***
Commercial height	-0.00891	0.004968	-1.794	0.084887 ^{ns}
Stem type	-0.05641	0.021708	-2.599	0.01547*
Textural class	-0.05375	0.031882	-1.686	0.104246 ^{ns}
Fertilization	-0.02728	0.028596	-0.954	0.349187 ^{ns}
Textural class x Fertilization	0.063729	0.09255	1.623	0.117034 ^{ns}
Null deviance: 0.139571 on 31 DF, residual deviance: 0.072313 on 25 DF.				
(b) simplified model: glm (WWD ~ DBHwob + Stem type, family=gaussian (link = "identity")) AIC: -89.689				
(Intercept)	0.435935	0.046861	9.303	3.31E-10***
DBHwob	0.010655	0.002772	3.843	0.000611***
Stem type	-0.0427	0.019965	-2.139	0.040993*

Null deviance: 0.139571 on 31 DF, residual deviance: 0.088485 on 29 DF.

DBHwob: diameter at breast height without bark, stem type: presence or absence of forking, textural class: sandy loam and very clayey, fertilizations: presence or absence of fertilization, DF: degrees of freedom, *: significant at 5% significance, ***: significant at 0.1% significance, ns: not significant at 5% significance, AIC: Akaike information criterion

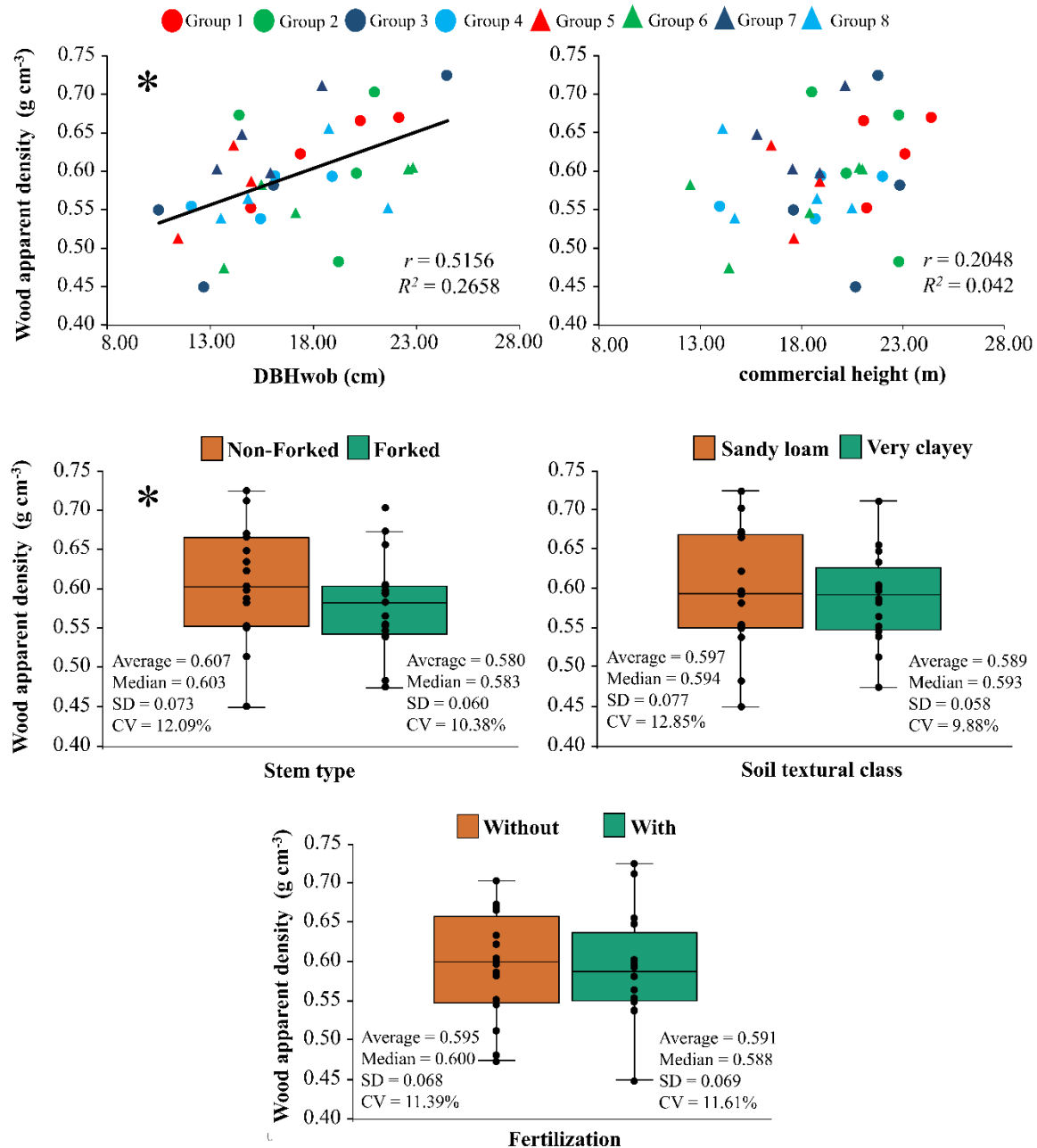


Fig. 4 Variation in the average apparent density of *T. vulgaris* wood as a function of the selected predictors

DBHwob: diameter at breast height without bark, stem type: presence or absence of forking, textural class: sandy loam and very clayey, fertilizations: presence or absence of fertilization, SD: standard deviation, CV: coefficient of variation, group 1: non-forked trees + sandy loam soil + without fertilization, group 2: forked trees + sandy loam soil + without fertilization, group 3: non-forked trees + sandy loam soil + with fertilization, group 4: forked trees + sandy loam soil + with fertilization, group 5: non-forked trees + very clayey soil + without fertilization, group 6: forked trees + very clayey soil +

without fertilization, group 7: non-forked trees + very clayey soil + with fertilization, group 8: forked trees + very clayey soil + with fertilization

*Predictors that influence the average apparent density of *T. vulgaris* wood.

The influence of diameter (DBH position) in the basic density of *T. vulgaris* has already been reported in the literature, and it tends to increase with increasing stem diameter (Orellana et al. 2018), which is possibly related to the increase in density with increasing cambial age. The influence of cambial age on width (negative correlation) and density (positive correlation) of growth rings using the X-ray densitometry technique has already been verified for *Eucalyptus urophylla* (Rodrigues et al. 2022).

This can be observed in the greater width of the growth rings (Fig. 7b, Fig. A2) and the greater proportion of initial wood (lower density, Fig. A3, Table A2), especially in the first 3 years (responsible for approximately 50% of the total width of the radius, Fig. 7a). Smaller growth ring widths and a higher proportion of latewood (higher density, Table A2) were found at higher cambial ages, i.e. with increasing age and, consequently, diameter, there is an increase in density due to changes in the proportions of earlywood and latewood in the growth rings.

Thus, the results obtained in our study showed that the positive influence of diameter (DBH position) on the increase in apparent density is related to the greater proportion of latewood in the last few years (stabilization of the proportion from the sixth year onwards, Fig. A3) which is characterized by the species with thick walls (Macedo et al. 2014), causing an increase in density in latewood due to anatomical characteristics.

The literature reported reduced density in forked *T. vulgaris* trees planted in different spacings (Barros-Junior et al. 2022; Lima et al. 2023; Moraes et al. 2023). The planting spacing of the study (6 m²) may possibly influenced the lower average values of forked trees too. Denser plantings cause greater competition between tree crowns and roots (Tun et al. 2018; Farooq et al. 2019) for resources, such as light, water, and nutrients, generating more stress (Chase et al. 2016; Huber et al. 2021). The competition for resources can occur between trees and between the stems of the forked tree. When the availability of these resources is reduced, the formation and expansion of the cell wall become less efficient, resulting in a thinner cell wall, which decreases wood density (Barros-Junior et al. 2022).

T. vulgaris is a pioneer species native to the Amazon region and is adapted to soils with low natural fertility and high Al concentration, characteristics of Amazonian soils (Souza et al. 2018). Thus, the characteristics of the soil type and adaptability of the species may have reduced the availability and absorption of nutrients available through fertilization. Teixeira et al. (2023) evaluated the effects of fertilization with K and P on the dendrometric characteristics of *T.*

vulgaris trees at different ages and in two soil texture classes (sandy loam and clay) in the same experimental areas. The authors found low phosphorus and potassium requirements for the species. In general, Teixeira et al. (2023) explain that the species' low nutritional requirements may be related to one or more of the following factors: (I) the species' adaptation to low fertility soils, as it is a pioneer species and native to the Amazon region; (II) the high levels of aluminum that affected the availability and absorption of P and K by the roots of the trees; (III) the great genetic variability of the species (seeds from different matrices) associated with variations in the environment, causing them to present different phenotypic characteristics; and (IV) The areas where the experiments were installed were occupied by eucalypt plantations before and there may have been a residual effect of the previously used fertilizers.

5.3.2 Radial and longitudinal variation of the apparent density of *T. vulgaris*

For the analysis of density variation along the cross-section (pith-bark), radial profiles (DBH position) of trees evaluated within the treatments were selected. In general, this analysis showed wide intra-annual and inter-annual variation, making it possible to differentiate earlywood (darker gray and with lower densities) and latewood (lighter gray and with higher densities). Thus, it was possible to determine the limit of tree growth rings indicated by density peaks formed in latewood followed by a rapid decrease in density indicating the beginning of another growth ring (Fig. 5). The density profiles show that the trees from the different treatments did not present changes in the pattern of radial variation (pith-bark) of density. Furthermore, as seen in the radial profiles, lower densities were detected in the pith region. In general, values tend to increase towards the bark.

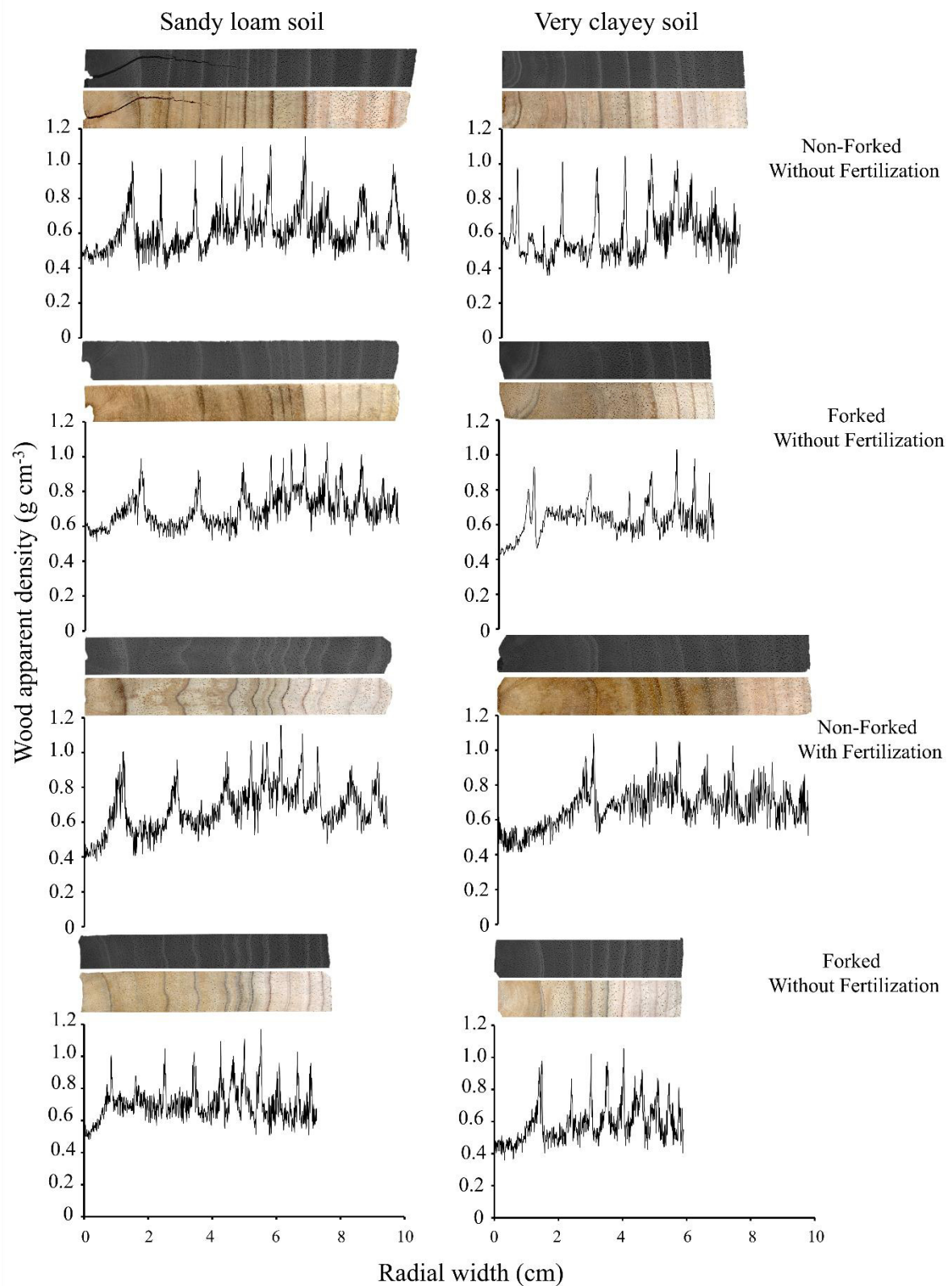


Fig. 5 Radial variation of apparent density in the DBH position of trees from the experiment with and without forking and fertilization in two different soil textural classes

T. vulgaris forms annual growth rings, distinct and macroscopically visible, with ring boundaries marked by thick-walled and flattened latewood fibers (commonly called fibrous

zones). There was an increase in density at the transition from earlywood to latewood related to the formation of thick-walled fibers, followed by a decrease in density, indicating the beginning of the next growth ring (Fig. 6a). The growth rings showed density values characterized as uniform (Fig. 6b), stable (Fig. 6c) and unstable (Fig. 6d) in the earlywood, followed by an increase in density in the latewood.

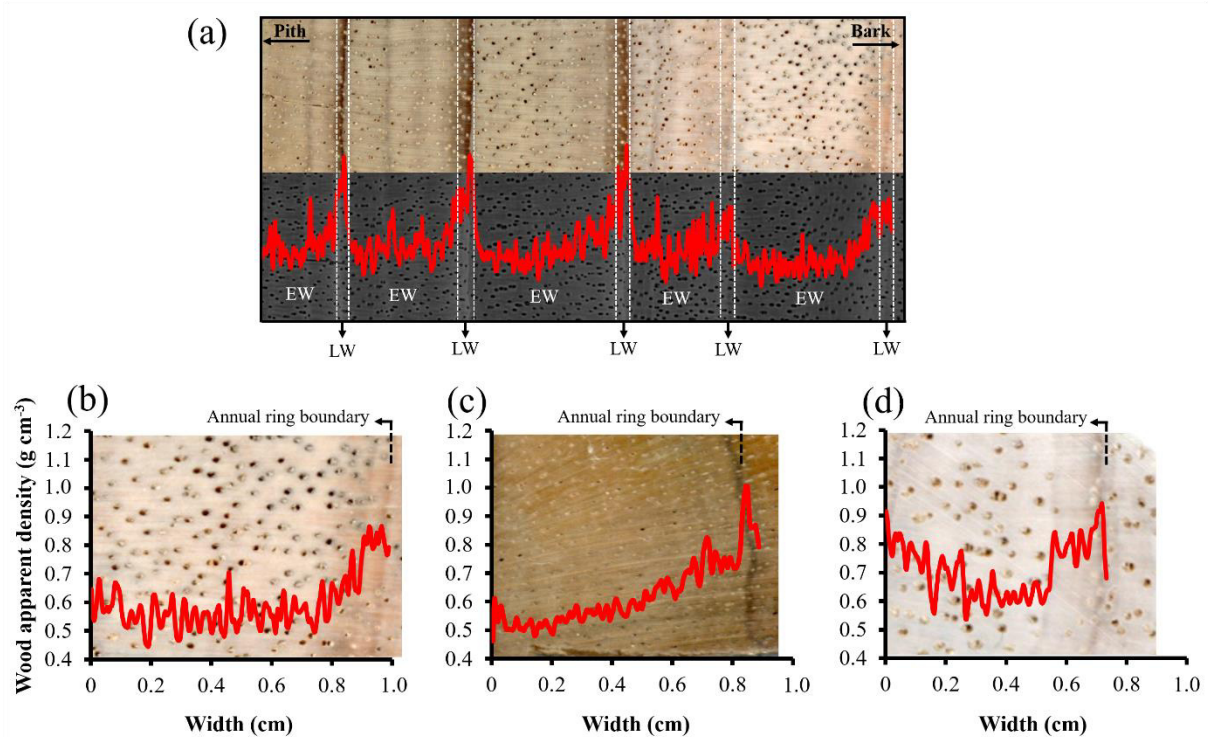


Fig. 6 Apparent density variation obtained by X-ray densitometry showing the intra-annual density variation and the limit of earlywood (EW) and latewood (LW) (a) and three categories of intra-annual density variation found in the density profiles of *T. vulgaris*: uniform (b), stable (c), and unstable (d)

The growth rings of *T. vulgaris* are characterized in the literature by being distinct and marked by a fibrous zone (latewood) with thick walls (Macedo et al. 2014). These characteristics were observed in the growth rings of the trees by macroscopic visualization and by X-ray densitometry (Fig. 6a). The annual formation of distinct growth rings depends on internal factors (anatomical and physiological characteristics) of the species and external factors such as rainfall seasonality (Brienen et al. 2016). Precipitation in the study region is marked by a dry period between August and November, with an average variation between 34.65 mm and 78.86 mm (Fig. 1b). This seasonality of precipitation of the region may contribute to the formation of clearly visible growth rings, as observed in *T. vulgaris* trees (Moraes et al. 2023).

X-ray densitometry techniques are being widely used and accepted as the reference method for obtaining wood density (Jacquin et al. 2017). As with other fast-growing species (Knapic et al. 2014; Eberhardt and Samuelson 2015; Dias et al. 2018; Gaitan-Alvarez et al.

2019; Ucella-Filho et al. 2023), it has shown potential for *T. vulgaris* in obtaining density and better visualization of the limits of growth rings, as well as the limits of earlywood and latewood. Intra-annual variation in the density of the growth rings was observed and explained by differences in the cellular structure of earlywood and latewood, influencing the differences in density values (Fries and Ericsson 2009).

The types of intra-annual density profiles found for *T. vulgaris* trees were described by Gaitan-Alvarez et al. (2019). The authors described: (I) uniform as the variation in density that remains constant within the annual ring, with no changes in the slope of the density profile (Fig. 6b); (II) stable as the profile in which the density increases continuously from the beginning to the end of the growth ring (Fig. 6c); and (III) unstable for presenting a phase of decrease and increase in the density profile (Fig. 6d). The seasonal variation in cambial activity results in the annual formation of growth rings, which are formed according to genetic variation and environmental conditions (Micco et al. 2016). However, in tropical climates, environmental conditions are variable throughout the year (rainfall and temperature) and these changes affect cambial activity and cell differentiation, which can cause density fluctuations within the growth rings (Micco et al. 2016). As a result, there may be heterogeneity in the annual density variation profiles, such as that seen in the growth rings of *T. vulgaris* trees.

The growth ring width (GRW) decreased depending on the exchange rate (represented in the DBH region, where they generally presented 10 growth rings, that is, 10 years – 2012 to 2021) regardless of the factors tested, with the highest averages in the first three years (1st year: 1.36 cm; 2nd year: 1.19 cm; 3rd year: 0.84 cm) together representing approximately 50% of the total width of the trunk radius, with the other years (4th to 10th year) representing between 6% and 8% of the total width for each year (Fig. 7a). Furthermore, the average width of the earlywood growth rings (DBH) was 0.64 cm (SD = 0.13 cm) and 0.07 cm (SD = 0.02 cm) in the latewood (Table A2).

The relationship between GRW and WRD as a function of exchange age (Fig. 7b) showed a negative and significant correlation ($r = -0.78$, $p < 0.001$) with an average width reduction of approximately 68% from the first growth ring to the last growth ring and an increase in density of approximately 11% between the first and last growth ring. The relationship between GRW and WRD by tree groups can be seen in Fig. A2. The greater influence of GRW on the apparent density of growth rings occurs mainly in the first three years and is related to the higher EW/LW ratios found in these first years (Fig. A3) compared to recent years, showing a reduction of approximately 69% in the EW/LW ratio from the first year to the last year.

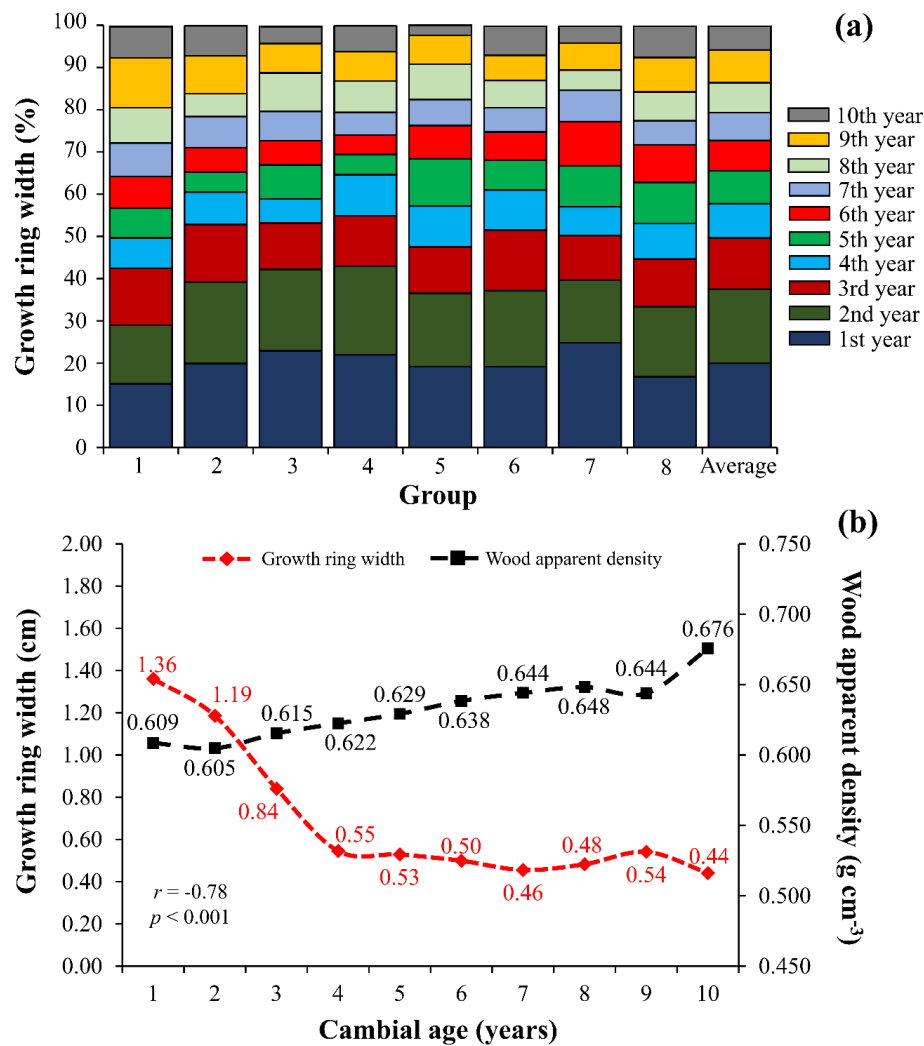


Fig. 7 The average width of annual growth rings (%) over 10 years (2012 to 2021) by groups and general average in the position of the DBH of *T. vulgaris* trees (a) and the relationship between annual growth ring width (GRW) and average growth ring density (WRD) over 10 years (2012 to 2021) of *T. vulgaris* trees (b)

group 1: non-forked trees + sandy loam soil + without fertilization, group 2: forked trees + sandy loam soil + without fertilization, group 3: non-forked trees + sandy loam soil + with fertilization, group 4: forked trees + sandy loam soil + with fertilization, group 5: non-forked trees + very clayey soil + without fertilization, group 6: forked trees + very clayey soil + without fertilization, group 7: non-forked trees + very clayey soil + with fertilization, group 8: forked trees + very clayey soil + with fertilization

Negative relationships were found between density and growth ring width. The growth of trees in a plantation can be influenced by the species planted, the local environmental conditions, and the silvicultural practices (West 2014). In the initial growth, light-demanding trees direct their resources towards growth in height, so that their canopy can reach sunlight for photosynthesis. After reaching the necessary height, trees begin to invest in growth in diameter to correct the structural imbalance by producing a secondary xylem of greater density (Ramananantoandro et al. 2016). This may explain the characteristic of larger growth ring

widths and lower density (thinner and wider fibers) in the early years found in *T. vulgaris* trees since it is a fast-growing species (pioneer).

As observed here, with increasing cambial age, there is a decrease in the width of the growth rings (Figs. 7b, S2) and the EW/LW ratio, i.e. latewood tends to increase its proportion in the growth ring with increasing cambial age, with a stabilization of the EW/LW ratio being observed from the 6th year onwards for *T. vulgaris* trees (Fig. A3). Due to these structural differences, with the early wood having more voids (greater number of vessels, larger fiber lumens, thinner fiber walls) and the latewood having fewer voids (fewer vessels, smaller fiber lumens, and thicker fiber walls), latewood has a higher density. In addition to the increase in the proportion of latewood, the density of earlywood remains stable over the years while the density of latewood can increase (Moreno-Fernández et al. 2018). Therefore, these factors combined can influence the variation in density in the pith-bark direction.

Through the t-test, it was verified that the presence or absence of forking and fertilization and the two different soil textural classes did not influence the wood apparent density ($p > 0.05$, Table A3), regardless of age (average ages between all heights) and longitudinal position (Fig. 8). The X-ray density profiles showed that the apparent density tends to increase over the years (11 years evaluated). Besides, the values reduce in the longitudinal direction of the *T. vulgaris* trees up to a relative height of 50%, with a subsequent increase until the top, varying from 0.724 to 0.545 g cm⁻³. For the profile in the radial direction, the average variation was from 0.389 to 0.995 g cm⁻³ (Table 6).

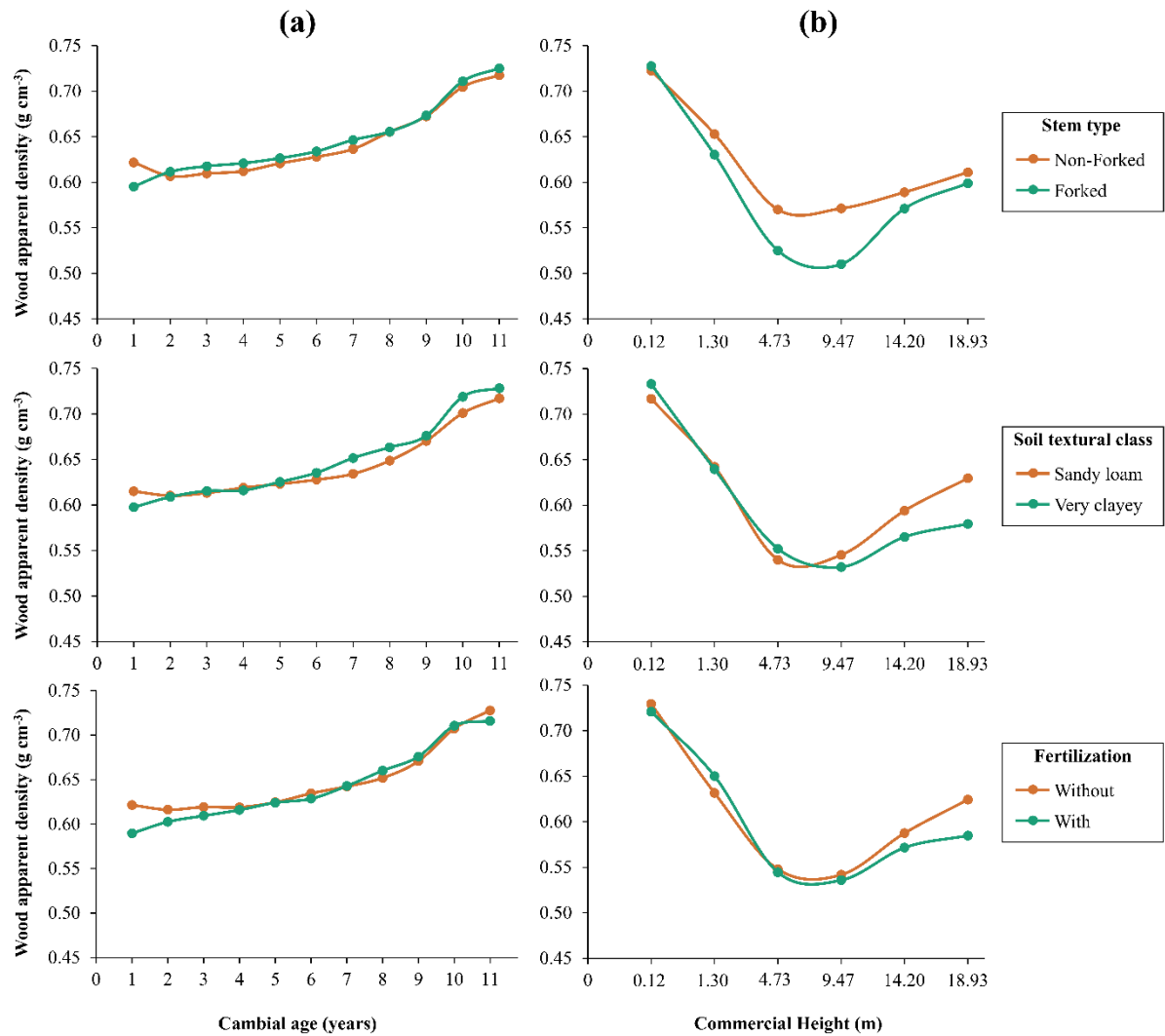


Fig. 8 Comparison between two soil textural classes, presence, or absence of fertilization, and forking for each year (a) and along the longitudinal direction (b) for *T. vulgaris* trees

Table 6 Variation of X-ray density in the radial direction, considering different positions of the commercial height (meters and relative) of sampling in *T. vulgaris* trees

Height		Apparent density (g cm ⁻³)		CV (%)
Meters (m)	Relative (%)	Average	Minimum – Maximum	
0.12	0%	0.724 ± 0.074	0.553 – 0.995	10.23
1.30	DBH	0.631 ± 0.074	0.472 – 0.959	11.80
4.73	25%	0.550 ± 0.075	0.395 – 0.869	13.65
9.47	50%	0.545 ± 0.080	0.389 – 0.867	14.60
14.20	75%	0.593 ± 0.080	0.438 – 0.870	13.43
18.93	100%	0.618 ± 0.071	0.464 – 0.835	11.42

CV: Coefficient of variation. Average ± standard deviation.

The tendency for density to increase from the pith towards the bark (inter-annual density variation, Figs. 5 and 8a) is consistent with the literature for fast-growing species such as the *Eucalyptus grandis* x *urophylla* (Tomazello et al. 2008), *Quercus faginea* (Sousa et al. 2016), *Pinus taeda* (Ortega Rodriguez and Tomazello-Filho 2019), *Peltophorum dubium* and *Schinus terebinthifolius* (Dias Júnior et al. 2021), *Schizolobium parahyba* (Ucella-Filho et al. 2023), *Tectona grandis* (Curvo et al. 2024) and for 8.5-year-old planted *T. vulgaris* (Moraes et al. 2023).

The fact that there was no statistical difference in the density of *T. vulgaris* trees between the variables evaluated over the years and that only the influence of age on the increase in density was observed (Fig. 8a), may be related to tree mortality (Table 4). With denser planting in the first few years, there is greater competition for light, water, and nutrients. However, with the occurrence of mortality, the remaining trees can invest in growth in diameter and density due to the greater availability of resources needed for cellular activities and fiber wall formation. Thus, with the high mortality, the resources became more available to the trees, making the environment favorable for the remaining trees to invest in growth in diameter and density. It is worth noting that *T. vulgaris* can be strongly influenced by genetic characteristics (Leão et al. 2023) and, being a fast-growing species, can have high mortality rates due to its early succession characteristics and short life cycle (Aleixo et al. 2019). Thus, when comparing the factors evaluated in the study between the years and in the different stem positions (Fig. 8), there was no significant difference.

However, it is important to note that after 5-6 years, when comparing trees between the two textural classes evaluated, the *T. vulgaris* trees from the clay soil showed higher values up to 11 years (planting age). Soares et al. (2022), evaluating growth and production data in a spacing and fertilization experiment (the same experiment as this study), found that the maximum average increment point is between 5-6 years of planting. In addition, between 2015 and 2016 there was the El Niño Southern Oscillation (ENSO) phenomenon which caused historically high temperatures and low precipitation rates in tropical regions (Liu et al. 2017). Climatic events such as El Niño, which affect regional hydrological cycles and temperatures, can affect the physiology, growth, and mortality of trees (Leitold et al. 2018; Santos et al. 2018; Aleixo et al. 2019; Gonçalves et al. 2021).

Therefore, up until the age of 5-6, the genetic factor and competition between trees strongly influenced the *T. vulgaris* trees. From this age on, possibly the soil texture began to influence the density of the wood, partly due to the El Niño event which affected the physiology and characteristics of the growth rings, including density. The influence of El Niño has already

been verified in a *T. vulgaris* experiment in the study region, with a significant reduction in the volume, biomass, and carbon fixation of the trees (Moraes et al. 2022).

The highest apparent densities were observed at the base (0.724 g cm^{-3} , CV: 10.23%) where it ranged from 0.695 to 0.777 g cm^{-3} in yellow and orange shades (Fig. 9). In general, the increase in density occurred from the pith region towards the bark, except in the forked tree in fertilized sandy soil and the forked tree in non-fertilized very clayey soil. These results obtained in the base region were consistent with the average values (Fig. 8, Table 6).

In general, the increase of the apparent density in the radial direction (pith-bark) in the height variation profile is most evident between 2 m to 14 m. This analysis corroborates the results found by the GRW/WRD relationship (Fig. 7) and EW/LW relationship (Fig. A3) that the first 3 years present wider growth rings and higher proportion of earlywood. In the longitudinal direction (base-top) the highest densities occurred up to about 2 m; however, followed by a reduction in density from the base up to 2 m from the commercial height (average variation from 0.777 to 0.695 g cm^{-3}). Between 2 m and 6 m, the height density variation ranged from 0.535 to 0.695 g cm^{-3} (with lower values close to the pith) and an average of 0.550 g cm^{-3} at 4.73 m (SD = 0.74 g cm^{-3} , 25% of the relative height of the tree), being the most variable region of the trees.

The area between 6 m and 14 m showed the lowest densities, a trend in all evaluated trees, with 0.545 g cm^{-3} at 50% of the relative height of the trees (9.47 m, SD = 1.48 m), where the greatest data variability occurred (CV = 14.60%). For most trees, from 14 m towards the top, the density tended to increase reaching 0.618 g cm^{-3} (CV = 11.42%) at 100% of the commercial height (18.93 m, SD = 2.96 m). The increase in the top region was not significant for non-forked trees in non-fertilized sandy soil and forked trees in fertilized very clayey soil.

A greater variation in density was observed for forked trees of all treatments. Abrupt changes were reported from 6 m on in the longitudinal direction (shades of dark blue) for forked trees in both fertilization conditions in sandy loam soil and fertilized very clayey soil. The forked trees in fertilized very clayey soil showed the greatest variation in density in the radial direction, tending to reduce density towards the bark. On the other hand, most non-forked trees showed less variation in density (evidencing colors), for both types of soil texture, both fertilized and non-fertilized.

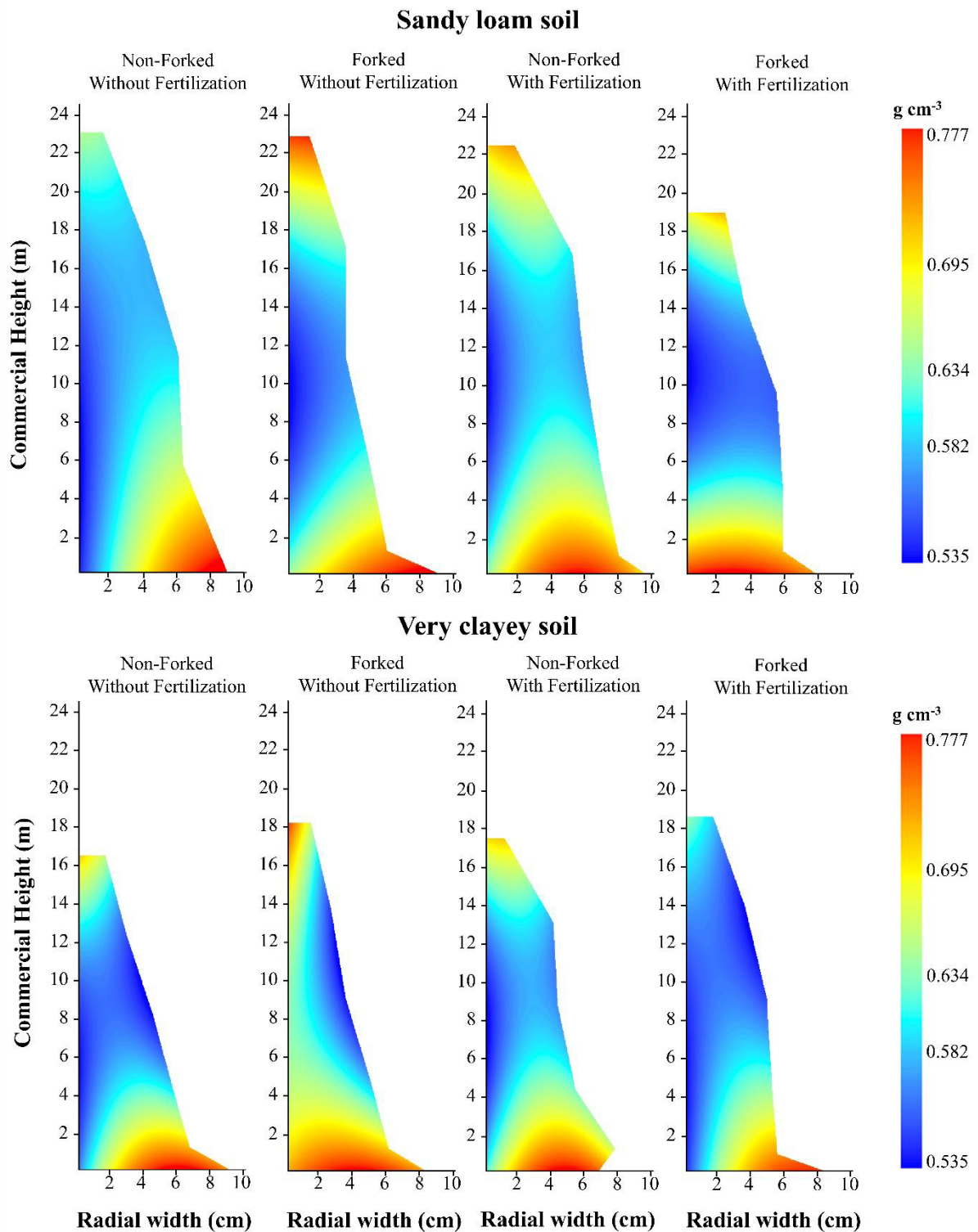


Fig. 9 Longitudinal and radial variation profile of X-ray density of *T. vulgaris* trees for different soil textural classes, absence or presence of fertilization and forking

The higher densities in the base of the trees compared to other longitudinal positions by X-ray densitometry (Fig. 9) are explained by the fact that the wood in this position is older, with an age close to the planting age (Moraes et al. 2023). As mentioned above, this difference

in density may be linked to the variation in wall thickness and fiber percentage, as well as vessel width and diameter, which are different in different positions of the tree (different cambial ages), where the wood at the base is older (Oliveira et al. 2018). In addition to this anatomical variation that occurs in the pith-bark direction (Palermo et al. 2015; Curvo et al. 2024), the influence on the density of the width of the growth rings and the proportions of earlywood and latewood can explain the increase in density towards the bark observed in the density variation profiles (Fig. 9) for most of the *T. vulgaris* trees.

All the influences that may be contributing to the radial variation in density can be seen in the profiles in Fig. 8, and it can also be seen that the variation in radial density can vary among individuals. For example, the unfertilized tree in sandy soil reached densities close to 0.695 g cm^{-3} at 4 cm radial width, while the unfertilized tree in clay soil reached the same density at 2 cm radial width. Thus, this variability is most likely a consequence of their genetic characteristics and the physiological response of each tree to the environment and the treatments evaluated. Moreover, even if there is no significant difference between the treatments, they can influence the behavior of the density throughout the growth of the plants. This demonstrates the great potential of X-ray densitometry to verify the longitudinal and radial variation profile of density. Similar results were observed by Moraes et al. (2023) in an experimental plantation of *T. vulgaris* evaluating different spacings, using the same technique to assess longitudinal and radial variation in density.

We believe that the increase in density found in the upper regions of the trees may be related to the insertion of branches in the canopy, thus forming reaction wood. In dicotyledonous angiosperms, traction wood, also called reaction wood, can be formed in response to mechanical stimulations that reorient the tree's axis and make cambial activity heterogeneous (Ruelle 2014). When the branch is inserted into the crown, the formation of the reaction wood is precisely regulated to maintain the balance of the weight of the tree's constantly growing crown, thus preserving the predetermined orientation of the branches and the architecture of the tree (Barnett et al. 2014). In the process of forming this type of wood, changes occur at structural levels in the cell wall (differences in its composition and arrangement) and consequently affect its anatomy (Fagerstedt et al. 2014; Ruelle 2014). These structural changes caused by the reaction wood increase the density of the wood (Clair and Thibaut 2014) to meet the biomechanical function, which in the treetop region is to support the canopy.

Although environmental factors can influence the phenotype of plants, for *T. vulgaris* seeds, genetic factors predominantly influence phenotypic variability (Leão et al. 2023). Thus,

the formation of forked trees, as well as their variation in density in the radial and longitudinal direction, may be related mainly to genetic factors, as well as to the genotype x environment interaction (Lima et al. 2023) and, as already reported, forking can lead to a reduction in density for the species (Barros-Junior et al. 2022). The lower density, as well as the heterogeneity in wood density, is a disadvantage for energy production (Lima et al. 2023).

The heterogeneity of wood properties, including density, influences the production and quality of charcoal (Lima et al. 2020), and negatively impacts the percolation of gases, reactivity, and mechanical resistance of charcoal (Barros et al. 2023), which can lead to a reduction in the quality of pig iron. The use of bioreducers with homogeneous characteristics in the steel industry provides greater consistency and efficiency of this material in blast furnaces and, consequently, a reduction in the specific consumption of charcoal in the production and quality of pig iron (Lima et al. 2020). Thus, understanding the behavior of the variation in wood density along the stem in the radial and longitudinal direction is important to allocate the appropriate use for energy purposes and the management of future forest stands. Thus, density variation profiles have proved to be an important tool for decision-making by foresters and researchers.

The presence of phosphorus and potassium fertilization at the highest dosage applied in the experiment (320 kg ha^{-1} of P_2O_5 and 199 kg ha^{-1} of K_2O) in the two different textural classes did not influence the variation in the density of *T. vulgaris* wood. This result is different from most literature on fertilization's effect on wood growth and density. For example, Ortega Rodriguez and Tomazello-Filho (2019) found that fertilization with composted pulp mill sludge (CPMS) on *P. taeda* trees promoted greater initial growth and increased the biomass of treated trees; however, unlike non-fertilized stands, it reduced basic density and delayed the formation of adult wood. Chambi-Legoas et al. (2021) found that K fertilization increased the trunk volume of *Eucalyptus grandis* trees and reduced wood density, but without significant losses in wood quality.

The absence of fertilization effects in the soil textural classes evaluated may suggest a reduction in fertilization costs and the adaptability of the species to the different sites where it can be planted when only the wood density is considered. However, other parameters must be used to classify wood for energy use, including dendrometric variables. Simões et al. (2022) found that the application of 65.22 kg ha^{-1} of triple superphosphate and 200 kg ha^{-1} of potassium chloride promoted height growth of 11.1% at 24 months compared to unfertilized trees. Teixeira et al. (2023) found a significant increase in DBH at 24 months with the application of potassium chloride fertilizer to sandy loam soil. However, in general, they found no significant influence

of different doses of triple superphosphate and potassium chloride on the equivalent diameter, total height, and commercial volume with bark per hectare in experimental plantations of *T. vulgaris* in Amazonia.

5.4 Practical implications of the research and prospects

Our results provide information that could contribute to the use of *T. vulgaris* on a commercial scale. Assessing the factors that influence apparent density, as well as radial variation (pith-bark) and longitudinal variation (base-top), is important for developing strategies for establishing energy forests. The negative effects of forking corroborated those reported in the literature (Barros-Junior et al. 2022; Lima et al. 2023; Moraes et al. 2023) and deserve full consideration in silvicultural strategies and genetic improvement programs. Future studies should also evaluate the implications of different doses of fertilizer and different soil textural classes on the density of wood for bioenergy. To this purpose, the X-ray densitometry technique proved to be effective in showing the inter-annual and intra-annual density variation along the longitudinal section of the wood of *T. vulgaris* trees. In the present study, 32 trees were evaluated, and we recommend that a larger sample be taken in future studies.

Even though wood density is a highly influential parameter in the production of quality charcoal (Protásio et al. 2021), other variables must also be considered. Thus, it is necessary to evaluate the influence of fertilization and different soil textures on other parameters that influence wood quality (anatomy, inorganic composition, and chemical characteristics) and their implications for burning facilities. This information is essential for defining sustainable silvicultural practices and the management of *T. vulgaris* planted forests.

We would also like to highlight that even though the effect of fertilization was absent in our study, this does not indicate that commercial plantations with the species should not receive it. Our results were probably influenced by the intense genetic variability among the trees, associated with accentuated mortality, and by the species' adaptation to the low-fertility soils of Amazonia. Therefore, new studies should be carried out, especially on plantations developed with seedlings from genetically selected matrices to reduce the genetic variability and improve the homogeneity of growth. It is also important to understand the climatic influence (precipitation and temperature) on the quality of *T. vulgaris* wood, given the changes that have been taking place at regional and global levels

5.5 Conclusions

This study showed that the factors that have the greatest influence on the density of *T. vulgaris* wood is DBHwob, in which larger diameters have higher densities. Furthermore, forking negatively affects the density of the species' wood, decreasing its value and increasing its variation within the stem.

Regardless of the factors evaluated, the apparent density obtained by the X-ray densitometry technique increased in the radial direction up to near the bark, and there was a reduction in these values from the base up to regions of the average height of the trees, generally following an increase towards the top.

The influence of fertilization or the two different soil textures on wood density evaluated was not significant, which may indicate lower costs with fertilizers and the good adaptation of the species regardless of soil texture. The absence of the fertilization effect may be related to some factors, such as: adaptation of the species to the poor soils of the Amazonia, the high aluminum content of Amazonian soils and the high genetic variability among trees. Therefore, we highlight the importance of new studies taking these factors into account and including other variables in addition to density, aiming to better understand the need for fertilization for the species.

Finally, the results show that age has a direct influence on the density of *T. vulgaris* wood, so it is an important factor to consider when planning the harvesting of trees.

Acknowledgments

The authors are grateful to the Embrapa Eastern Amazon, Group Jari Celulose S.A., Wood Anatomy and Tree-Ring Laboratory (LAIM) of the Department of Forest Sciences at Luiz de Queiroz College of Agriculture (ESALQ), University of Sao Paulo (USP), Forestry Products Technology Laboratory (LTPF) of the Federal Rural University of Amazonia (UFRA), and the Postgraduate Program in Forest Sciences (PPGCF/UFRA).

References

- Aleixo I, Norris D, Hemerik L, et al (2019) Amazonian rainforest tree mortality driven by climate and functional traits. *Nat Clim Chang* 9:384–388
- Almeida MNF, Vidaurre GB, Pezzopane JEM, et al (2020) Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions. *For Ecol Manage* 458:117743. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117743>
- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, et al (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22:711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

- Antony F, Jordan L, Daniels RF, et al (2009) Effect of midrotation fertilization on growth and specific gravity of loblolly pine. *Can. J. For. Res.* 39:928-935. <https://doi.org/10.1139/X09-021>
- Assis MR, Brancheriau L, Napoli A, Trugilho PF (2016) Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. *Wood Sci Technol* 50:519–536. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0812-6>
- Barbosa RAGS, Castro VR, Surdi PG, et al (2024) Apparent density of eucalyptus wood evaluated by digital x-ray images after storage in the field during 365 days. *Cerne* 30:e-103367. <https://doi.org/10.1590/01047760202430013367>
- Barnett JR, Gril J, Saranpää P (2014) Introduction. In: Gardiner B, Barnett J, Saranpää P, Gril J (eds) *The biology of reaction wood*. Springer Berlin, Heidelberg, pp 1–11
- Barros DS, Lima MDR, Dias Junior AF, et al (2023) Does the segregation of wood waste from Amazonia improve the quality of charcoal produced in brick kilns? *Bioenergy Res* 16:1604–1617. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10551-w>
- Barros-Junior UO, Rosário WAS, Lima MDR, et al (2022) Effects of tree spacing and forking on the modification of wood density in a trial plantation of *Tachigali vulgaris* for energy in Amazonia. *Journal of Tropical Forest Science* 34:11–23. <https://doi.org/10.26525/jtfs2022.34.1.11>
- Billard A, Bauer R, Mothe F, et al (2021) Vertical variations in wood basic density for two softwood species. *Eur J For Res* 140:1401–1416. <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01402-y>
- Binkley D, Campoe OC, Alvares CA, et al (2020) Variation in whole-rotation yield among *Eucalyptus* genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS project. *For Ecol Manage* 462:117953. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117953>
- Bouriaud O, Teodosiu M, Kirdyanov AV, Wirth C (2015) Influence of wood density in tree-ring-based annual productivity assessments and its errors in Norway spruce. *Biogeosciences* 12:6205–6217. <https://doi.org/10.5194/bg-12-6205-2015>
- Box GEP, Cox DR (1964) An Analysis of transformations. *Journal of the Royal Society* 26:211–252.
- Brienen RJW, Schöngart J, Zuidema PA (2016) Tree rings in the tropics: Insights into the ecology and climate sensitivity of tropical trees. In: Goldstein G, Santiago LS (eds) *Tropical tree physiology: adaptations and responses in a changing environment*. Springer Cham, pp 439–461
- Calviño-Cancela M, Rubido-Bará M, van Etten EJB (2012) Do eucalypt plantations provide habitat for native forest biodiversity? *For Ecol Manage* 270:153–162. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.019>
- Câmara AP, Oliveira JTS, Bobadilha GDS, et al (2018) Physiological disorders affecting dendrometric parameters and eucalyptus wood quality for pulping wood. *Cerne* 24:27–34. <https://doi.org/10.1590/01047760201824012480>
- Carteni F, Deslauriers A, Rossi S, et al (2018) The physiological mechanisms behind the earlywood-to-latewood transition: A process-based modeling approach. *Front Plant Sci*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01053>
- Castro VR, Chambi-Legoas R, Tommasiello Filho M, et al (2020) The effect of soil nutrients and moisture during ontogeny on apparent wood density of *Eucalyptus grandis*. *Sci Rep* 10:2530
- Castro VR, Tomazello Filho M, Surdi PG (2014) Evaluation radial profile of the wood of Pine trees (*Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. Et. Golf.) by X-ray densitometry. *Sci For* 42:353–360

- Chambi-Legoas R, Chaix G, Castro VR, et al (2021) Inter-annual effects of potassium/sodium fertilization and water deficit on wood quality of *Eucalyptus grandis* trees over a full rotation. For Ecol Manage 496:119415. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119415>
- Chambi-Legoas R, Chaix G, Tomazello-Filho M (2020) Effects of potassium/sodium fertilization and throughfall exclusion on growth patterns of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden during extreme drought periods. New For (Dordr) 51:21–40. <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09716-x>
- Chase CW, Kimsey MJ, Shaw TM, Coleman MD (2016) The response of light, water, and nutrient availability to pre-commercial thinning in dry inland Douglas-fir forests. For Ecol Manage 363:98–109. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.12.014>
- Clair B, Thibaut B (2014) Physical and mechanical properties of reaction wood. In: Gardiner B, Barnett J, Sarapää P, Gril J (eds) The biology of reaction wood. Springer Berlin, Heidelberg, pp 171–200
- Curvo KR, Silva GAO, Castro VR, et al (2024) 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 82:357–369. <https://doi.org/10.1007/s00107-023-02031-5>
- Dias A, Gaspar MJ, Carvalho A, et al (2018) Within- and between-tree variation of wood density components in *Pinus nigra* at six sites in Portugal. Ann For Sci. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0734-6>
- Dias Júnior AF, Pincelli ALMS, Câmara da Silva AP, et al (2021) Integrating species and successional classes for wood production in a mixed forest restoration system in a neotropical region. J For Res (Harbin) 32:2313–2321. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01297-w>
- Eberhardt TL, Samuelson LJ (2015) Collection of wood quality data by X-ray densitometry: a case study with three southern pines. Wood Sci Technol 49:739–753. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0732-x>
- Fagerstedt K V., Mellerowicz E, Gorshkova T, et al (2014) Cell wall polymers in reaction wood. In: Gardiner B, Barnett J, Sarapää P, Gril J (eds) The biology of reaction wood. Springer Berlin, Heidelberg, pp 37–106
- Farias J, Marimon BS, de Carvalho Ramos Silva L, et al (2016) Survival and growth of native *Tachigali vulgaris* and exotic *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* trees in degraded soils with biochar amendment in southern Amazonia. For Ecol Manage 368:173–182. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.022>
- Farooq TH, Wu W, Tigabu M, et al (2019) Growth, biomass production and root development of Chinese fir in relation to initial planting density. Forests. <https://doi.org/10.3390/f10030236>
- Florêncio GWL, Martins FB, Fagundes FFA (2022) Climate change on Eucalyptus plantations and adaptive measures for sustainable forestry development across Brazil. Ind Crops Prod 188:115538. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115538>
- Fries A, Ericsson T (2009) Genetic parameters for earlywood and latewood densities and development with increasing age in Scots pine. Ann For Sci 66:404–404. <https://doi.org/10.1051/forest/2009019>
- Gaitan-Alvarez J, Moya R, Berrocal A (2019) The use of X-ray densitometry to evaluate the wood density profile of *Tectona grandis* trees growing in fast-growth plantations. Dendrochronologia (Verona) 55:71–79. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.04.004>
- Gonçalves JQ, Durgante FM, Wittmann F, et al (2021) Minimum temperature and evapotranspiration in Central Amazonian floodplains limit tree growth of *Nectandra amazonum* (Lauraceae). Trees - Structure and Function 35:1367–1384. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02126-7>

- Huber M, Nieuwendijk NM, Pantazopoulou CK, Pierik R (2021) Light signalling shapes plant–plant interactions in dense canopies. *Plant Cell Environ* 44:1014–1029
- IBÁ Brazilian Tree Industry (2023) IBÁ annual report 2023. IBÁ, São Paulo
- INMET National Institute of Meteorology (2023). INMET Meteorological Database. <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Accessed 28 May 2023
- Jacquin P, Longuetaud F, Leban JM, Mothe F (2017) X-ray microdensitometry of wood: A review of existing principles and devices. *Dendrochronologia (Verona)* 42:42–50. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.01.004>
- Knapic S, Pirralho M, Louzada JL, Pereira H (2014) Early assessment of density features for 19 *Eucalyptus* species using X-ray microdensitometry in a perspective of potential biomass production. *Wood Sci Technol* 48:37–49. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0579-y>
- Kohler M, Niederberger, J, Wichser, A, et al (2019) Using tree rings to reconstruct changes in soil P availability – Results from forest fertilization trials. *Dendrochronologia (Verona)* 54:11–19. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.01.001>
- Kulmann MSS, Deliberali I, Schumacher MV, et al (2023) Can fertilization and stand uniformity affect the growth and biomass production in a *Pinus taeda* plantation in southern Brazil. *For Ecol Manage* 541:121075. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121075>
- Leão NVM, Felipe SHS, Galo R, Shimizu ESC (2023) Genetic variability of *Tachigali vulgaris* trees based on seed morphophysiological traits. *Southern Forests: a Journal of Forest Science* 85:185–193. <https://doi.org/10.2989/20702620.2023.2226335>
- Leitold V, Morton DC, Longo M, et al (2018) El Niño drought increased canopy turnover in Amazon forests. *New Phytologist* 219:959–971. <https://doi.org/10.1111/nph.15110>
- Lima MDR, Moraes LG, Silva RCC, et al (2023) *Tachigali vulgaris* energy forests: understanding spacing, age, and stem type effects on tree growth patterns and wood density. *New For (Dordr)* 54:491–513. <https://doi.org/10.1007/s11056-022-09932-y>
- Lima MDR, Simetti R, Assis MR, et al (2020) Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. *Biomass Bioenergy* 142:105804. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105804>
- Liu J, Bowman KW, Schimel DS, et al (2017) Contrasting carbon cycle responses of the tropical continents to the 2015–2016 El Niño. *Science* (1979). <https://doi.org/10.1126/science.aam5690>
- Liu Y, Zhou L, Zhu Y, Liu S (2020) Anatomical features and its radial variations among different *Catalpa bungei* clones. *Forests* 11:824. <https://doi.org/10.3390/f11080824>
- Love-Myers KR, Clark A, Schimleck LR, et al (2009) Specific gravity responses of slash and loblolly pine following mid-rotation fertilization. *For Ecol Manage* 257:2342–2349. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.03.031>
- Macedo TM, Barros CF, Costa CG, Lima HC (2014) Wood anatomy of seven species of *Tachigali* (Caesalpinioideae-Leguminosae). *IAWA J* 35:19–30. <https://doi.org/10.1163/22941932-00000044>
- Massuque J, Lima MDR, Müller da Silva PH, et al (2023) Potential of charcoal from non-commercial *Corymbia* and *Eucalyptus* wood for use in the steel industry. *Renew Energy* 211:179–187. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.061>
- Mendes FM, Massuque J, Carneiro ACO, et al (2022) Spatial variation of eucalyptus fibres considering the structure of annual growth rings. *Cerne* 28:e-103056. <https://doi.org/10.1590/01047760202228013056>
- Micco V, Campelo F, Luis M, et al (2016) Intra-annual density fluctuations in tree rings: How, when, where, and why? *IAWA J* 37:232–259. <https://doi.org/10.1163/22941932-20160132>
- Moraes LG, Assis-Pereira G, Protásio TP, et al (2022) Dendrochronology and X-ray densitometry applied to the evaluation of the wood properties of *Tachigali vulgaris* trees.

- In: Reis CAF, Gonçalves D de A, Protásio T de P (eds) *Tachigalis vulgaris* Forests, 1st edn. Embrapa Florestas, Colombo, pp 99-112
- Moraes LG, Lima MDR, Assis-Pereira G, et al (2023) Forking and planting spacing impacts on wood density, X-ray density, and heartwood proportion of *Tachigali vulgaris*. *Trees - Structure and Function* 37:1567–1581. <https://doi.org/10.1007/s00468-023-02443-z>
- Moreno-Fernández D, Hevia A, Majada J, Cañellas I (2018) Do common silvicultural treatments affect wood density of mediterranean montane pines? *Forests*. <https://doi.org/10.3390/f9020080>
- Oliveira IR, Peres Chagas M, Bouillet JP, et al (2018) Effect of tree spacing on growth and wood density of 38-year-old *Cariniana legalis* trees in Brazil. *South For* 80:311–318. <https://doi.org/10.2989/20702620.2017.1393741>
- Orellana BBM, Vale AT, González J, et al (2018) Energetic density of *Tachigali vulgaris* wood by diametric class in two experimental plants in the Amazon. *Nativa* 6:773–781. <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i0.5130>
- Ortega Rodriguez DR, Tomazello-Filho M (2019) Clues to wood quality and production from analyzing ring width and density variabilities of fertilized *Pinus taeda* trees. *New For (Dordr)* 50:821–843. <https://doi.org/10.1007/s11056-018-09702-9>
- Palermo GPM, Latorraca JVF, Carvalho AM, et al (2015) Anatomical properties of *Eucalyptus grandis* wood and transition age between the juvenile and mature woods. *European Journal of Wood and Wood Products* 73:775–780. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0947-4>
- Pena-Vergara G, Castro LR, Gasparetto CA, Bizzo WA (2022) Energy from planted forest and its residues characterization in Brazil. *Energy* 239:122243. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122243>
- Pillar VD (2013) How accurate and powerful are randomization tests in multivariate analysis of variance? *Community Ecology* 14:153-163. <https://doi.org/10.1556/ComEc.14.2013.2.5>
- Pillar VD, Orlóci L (1996) On randomization testing in vegetation science: multifactor comparisons of relevé groups. *Journal of Vegetation Science* 7:585-592. <https://doi.org/10.2307/3236308>
- Protásio TP, Lima MDR, Scatolino MV, et al (2021) Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. *Renew Energy* 164:34–45. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.057>
- Protásio TP, Scatolino MV, Araújo ACC, et al (2019) Assessing proximate composition, extractive concentration, and lignin quality to determine appropriate parameters for selection of superior *Eucalyptus* Firewood. *Bioenergy Res* 12:626–641. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10004-x>
- QGIS Development Team (2022) QGIS Geographic Information System 3.28.2. Open Source Geospatial Foundation Project. Available from: <http://qgis.osgeo.org>. Accessed 07 Jan 2023
- R Development Core Team (2023) R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing v. 4. 2. 3
- Ramanantoandro T, Ramanakoto MF, Rajoelison GL, et al (2016) Influence of tree species, tree diameter and soil types on wood density and its radial variation in a mid-altitude rainforest in Madagascar. *Ann For Sci* 73:1113–1124. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0576-z>
- Rodrigues GG, Raden M, Silva LD, Kahle HP (2022) Temporal annotation of high-resolution intra-annual wood density information of *Eucalyptus urophylla* and its correlation with hydroclimatic conditions. *Dendrochronologia (Verona)* 74:125978. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125978>

- Ruelle J (2014) Morphology, anatomy and ultrastructure of reaction wood. In: Gardiner B, Barnett J, Saranpää P, Gril J (eds) The biology of reaction wood. Springer Berlin, Heidelberg, pp 13–35
- Santos VAHF, Ferreira MJ, Rodrigues JVFC, et al (2018) Causes of reduced leaf-level photosynthesis during strong El Niño drought in a Central Amazon forest. *Glob Chang Biol* 24:4266–4279. <https://doi.org/10.1111/gcb.14293>
- Santos EV, Lima MDR, Dantas KGF, et al (2023) The inorganic composition of *Tachigali vulgaris* wood: implications for bioenergy and nutrient balances of planted forests in the Amazonia. *Bioenergy Res* 17:114–128. <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10679-3>
- Sette Júnior CR, Tomazello Filho M, Dias CTS, et al (2009) Effect of potassium and sodium application on the wood characteristics of *Eucalyptus grandis* W. Hill, at 24 months old-trees. *Floresta* 39:535–546
- Silva MOS, Silva MG, Bufalino L, et al (2021) Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachi-branco trees planted at different spacings for bioenergy purposes. *J For Res (Harbin)* 32:211–224. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01068-8>
- Simões PHO, Paula MT, Araújo DG, et al (2022) Biological use coefficient of biomass of *Tachigali vulgaris* under phosphorus and potassium fertilization: Management technologies for sustainable production of bioenergy in tropical countries. *Aust J Crop Sci* 16:637–648. <https://doi.org/10.21475/ajcs.22.16.05.p3607>
- Sindifer. Sindicato da indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais (2022) Pig iron production in Minas Gerais and Brazil. Statistical yearbook reference: 2021. Minas Gerais
- Soares AA V, Miranda RO V, Protásio TP, et al (2022) Growth and production of energy forests of *Tachigali vulgaris*. In: Reis CAF, Gonçalves D de A, Protásio TP (eds) *Tachigalis vulgaris* Forests, 1st edn. Embrapa Florestas, Colombo, pp 145–158
- Sousa VB, Louzada JL, Pereira H (2016) Age trends and within-site effects in wood density and radial growth in *Quercus faginea* mature trees. *For Syst.* <https://doi.org/10.5424/fs/2016251-08411>
- Souza ES, Fernandes AR, Braz AMS, et al (2018) Physical, chemical, and mineralogical attributes of a representative group of soils from the eastern Amazon region in Brazil. *SOIL* 4:195–212. <https://doi.org/10.5194/soil-4-195-2018>
- Teixeira RAC, Lima MDR, Silva AR, et al (2023) Dynamics of experimental plantations of *Tachigali vulgaris* in response to fertilization and soil texture. *New For (Dordr)*. <https://doi.org/10.1007/s11056-023-09999-1>
- Tomazello M, Brazolin S, Chagas MP, et al (2008) Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of Eucalyptus wood. *Ciencia y tecnología* 10:139–149
- Tun TN, Guo J, Fang S, Tian Y (2018) Planting spacing affects canopy structure, biomass production and stem roundness in poplar plantations. *Scand J For Res* 33:464–474. <https://doi.org/10.1080/02827581.2018.1457711>
- Ucella-Filho JGM, Dias Júnior AF, Souza EC, et al (2023) Clues about wood density and trace-element variability of *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby for bioenergy use. *Environmental Science and Pollution Research* 30:56161–56173. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26343-4>
- Van Der Werff H (2008) A synopsis of the genus *Tachigali* (Leguminosae: Caesalpinioideae) in northern South America. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 95:618–660. <https://doi.org/10.3417/2007159>
- Vieilledent G, Fischer FJ, Chave J, et al (2018) New formula and conversion factor to compute basic wood density of tree species using a global wood technology database. *Am J Bot* 105:1653–1661. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1175>
- Wang J, Yang K, Li W, et al (2023) The impact of earlywood and latewood on the compressive stress of Thermally Modified Douglas Fir. *Forests*. <https://doi.org/10.3390/f14071376>

West PW (2014) Growth rates and wood quality. In: West PW (ed) Growing plantation forests. Springer Cham, pp 25–44

Wickham H, Averick M, Bryan J, et al (2019) Welcome to the tidyverse. J Open Source Softw 4:1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>

Statements and Declarations

Funding

This study received financial support for the logistical activities of collecting and transporting material from the Federal Rural University of Amazonia, Embrapa Amazônia Oriental, Jari Celulose S.A., and the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (Procad Amazônia 2018 - process no. 88881.199859 /2018-01). The author Jonathan Dias Marques received research support from the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES; funding codes 001, nº 88887.715824/2022-00, and Procad Amazônia 2022 - process nº 88887.799141/2022-00). Gabriel Assis-Pereira acknowledges the financial support of CAPES (grant number 88887.509371/2020-00) and FAPESP (grant numbers 2023/14668-5 and 2020/01378-0). Thiago de Paula Protásio acknowledges the financial support of CNPq (grant number 304165/2022-0).

Competing interests

The authors have no relevant financial or non-financial interests to disclose.

Author contribution

Jonathan Dias Marques and Thiago de Paula Protásio: Conceptualization, Methodology, Formal analysis and investigation, Writing - original draft preparation. Gabriela Moraes Olmedo, Michael Douglas Roque Lima, Gabriel Assis-Pereira, Elvis Vieira dos Santos, Delman de Almeida Gonçalves, Arystides Resende Silva, and Lina Bufalino: Methodology, Formal analysis and investigation, and Writing - review and editing. Marciel José Ferreira, Mário Tomazello-Filho and Thiago de Paula Protásio: Funding acquisition, Project administration, Supervision, Validation, Review and editing. All authors read and approved the final manuscript.

Data availability

Datasets related to this article can be found at <https://doi.org/10.17632/ymhcmkpk6k.1>, an open-source online data repository hosted at Mendeley Data.

6 CAPÍTULO 2

Predição da densidade básica da madeira a partir da densidade aparente dos anéis de crescimento de *Tachigali vulgaris* em plantios homogêneos visando à bioenergia na Amazônia

Revista-alvo: Journal of Forestry Research (JCR = 3.4; Qualis Capes = A4)

Resumo

O *Tachigali vulgaris* é uma espécie adaptada a diferentes condições ambientais e com potencial para fins energéticos, podendo contribuir para suprir a demanda por biomassas energéticas na região amazônica. Contudo, são necessários estudos que auxiliem na criação de diretrizes de manejo da espécie e melhor entendimento de aspectos silviculturais e sua relação com a qualidade da madeira. Diante disso, esse estudo teve como objetivos: i) o ajustar equação para estimar a densidade básica da madeira a partir da densidade aparente (12% de umidade) para plantios homogêneos de *T. vulgaris* na Amazônia; e ii) classificar as árvores de *T. vulgaris* para fins energéticos utilizando a densidade da madeira. O estudo ocorreu no município de Almeirim, Pará, em dois plantios experimentais com testes de adubação, onde um plantio foi implantado sobre solo de textura franco arenosa e o outro sobre solo de textura muito argilosa. Os seguintes tratamentos foram avaliados: sem adubação e com adubação de 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 199 kg ha⁻¹ de K₂O. Dentro desses tratamentos, árvores bifurcadas (presença de fuste secundário) e não bifurcadas (fuste único) foram avaliadas. 16 árvores em solo franco arenoso (sem e com adubação) e 16 árvores em solo argiloso (sem e com adubação) foram amostradas. Discos de ≈ 5 cm de espessura foram obtidos ao longo do fuste, os quais foram divididos em duplicatas de ≈ 2.5 cm. Uma duplicata foi utilizada para a determinação da densidade básica (DB) e a outra para a determinação da densidade aparente por densitometria de raios X (DA_{12%}). Não foram encontrados efeitos dos tratamentos na estimativa de densidade básica da madeira de *T. vulgaris*. Somente a densidade aparente como variável explicativa foi significativa para estimar a densidade básica, apresentando correlação ($r_{y\hat{y}}$) = 0.84, eficiência do modelo (EF) = 0.71, raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEM%) = 9.31 e média dos erros absolutos (MAE) = 7.28. A equação populacional de densidade básica gerada ($DB = 0.7492246DA_{12\%} + 0.0632455$) superestimou em média aproximadamente 0.88% em relação aos valores reais de densidade básica. 67% das árvores não bifurcadas e 65% das árvores bifurcadas apresentaram média densidade ($\geq 0,500$ g cm⁻³). O estudo sugere que diferentes regiões da árvore devem ser destinadas para diferentes usos bioenergéticos. A equação desenvolvida pode ser recomendada para converter a densidade aparente a 12% de umidade em densidade básica, seja para estudos futuros ou para a utilização da espécie no setor florestal.

Palavras-chave: estimativa de densidade; silvicultura; Amazônia; qualidade da madeira.

Lista de símbolos e abreviações	
DA	Densidade aparente da madeira
DB	Densidade básica da madeira
Dapond	Densidade aparente ponderada do anel de crescimento
DAP	Diâmetro a altura do peito
DAPeq	Diâmetro a altura do peito equivalente
g	Área transversal
HC	Altura comercial
HT	Altura total
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
P	Fósforo
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo
K	Potássio
K ₂ O	Óxido de potássio
r _{yy}	Correlação de Pearson
EF	Eficiência do modelo
RQEM	Raiz quadrada do erro quadrático médio
MAE	Média dos erros absolutos

6.1 Introdução

A biomassa ganhou crescente relevância no panorama energético global, principalmente após a crise do petróleo, na década de 1970 (Resquin et al. 2019). Dentre as biomassas, o uso da madeira, principalmente proveniente de plantios para fins energéticos, pode ser uma alternativa viável para substituir os combustíveis fósseis na indústria siderúrgica e usinas termelétricas (Massuque et al. 2023). Ainda, uma das alternativas para a mitigação do CO₂ proveniente de atividades antrópicas é o uso de florestas plantadas, que ao reter esse carbono emitido traz benefícios climáticos, ambientais (ex: regulação de temperatura e clima) e econômicos (Mada et al. 2022).

A gestão sustentável de plantios florestais garante o fornecimento da biomassa (madeira) para a bioenergia, produção de energia limpa e renovável mitigação das mudanças climáticas a longo prazo e redução da pressão sobre as florestas naturais (Myint et al. 2021). Nesse cenário, uma variável de grande importância é a densidade da madeira que surgiu como uma variável chave na investigação do ciclo do carbono (Chave et al. 2006).

A densidade aparente da madeira é a razão entre massa e o volume de uma amostra de madeira com base em uma determinada umidade. Em geral, essa umidade apresenta um valor fixo, como por exemplo, o padrão internacional de 12% (Sallenave 1955). Assim, a densidade

aparente da madeira a 12% de umidade é definida como a relação entre a massa e o volume de uma amostra de madeira com essa mesma umidade e pode ser expressa em g cm^{-3} (Vieilledent et al. 2018). Outra forma de densidade muito utilizada é a densidade básica (massa seca da madeira em estufa/volume da madeira completamente saturada), considerada uma característica funcional que ajuda a entender o desempenho e a aptidão das espécies na ecologia. Essa importante variável pode ser utilizada no cálculo de biomassa de árvores e florestas em pesquisas do ciclo do carbono, pois ajuda a determinar a quantidade de carbono armazenado por unidade de volume do caule (Chave et al. 2009; Lachenbruch and Mcculloh 2014; Vieilledent et al. 2018).

A densidade aparente na umidade de 12% tem sido muito utilizada para propósitos ecológicos, como base de cálculos de biomassa seca das árvores a partir do seu volume vivo. Nesse sentido, é importante fazer sua conversão para densidade básica (Vieilledent et al. 2018). Além disso, a densidade básica da madeira possui importância tecnológica, especialmente por estar relacionada as propriedades mecânicas, como resistência e rigidez (Niklas and Spatz 2010), propriedades energéticas, como densidade energética (Protásio et al. 2019), densidade aparente do carvão e resistência mecânica do carvão (Assis et al. 2016; Lima et al. 2020). Ainda, os valores de densidade são afetados por características anatômicas (ex: espessura da parede, tamanho do lúmen, proporção dos elementos anatômicos) e/ou químicas, como por exemplo a lignina e celulose, que afetam a quantidade de massa existente em um determinado volume (Lachenbruch and Mcculloh 2014).

As florestas enérgicas com espécies de eucalipto são a principal fonte de biomassa para produção de carvão vegetal com finalidade siderúrgica (Pena-Vergara et al. 2022). Todavia, estudos mostram a perda de produtividade dos plantios com aumento de temperatura do ar e redução de precipitação (Costa et al. 2020; Binkley et al. 2020). Além disso, as plantações florestais ainda que possuam grande extensão territorial no Brasil (9.94 milhões de ha), são incipientes na região amazônica (Ibá 2023).

Nesse cenário, torna-se necessário aumento nas áreas com plantios energéticos na Amazônia, pois na região se encontra o segundo maior produtor de ferro-gusa do país, o complexo siderúrgico de Carajás, localizado entre os Estados do Pará e Maranhão. Esse complexo foi responsável em 2021 por produzir 9,5% do ferro-gusa nacional (Sindifer 2022). Dessa forma, é um importante desafio buscar novas fontes de matéria-prima para produção de carvão vegetal, visto que os plantios energéticos com espécies exóticas (*Eucaliptus* e *Corymbia*) na região são incipientes, sendo essencial o uso espécies nativas adaptadas a região para compor

os plantios florestais, que apresentem alta produtividade e madeira com potencial para a bioenergia (Santos et al. 2023).

Uma espécie que vem sendo relatada na literatura como potencial para plantios energéticos na Amazônia é a *Tachigali vulgaris* L.F Gomes da Silva & H.C Lima, comumente chamada de "tachi branco" ou "cachamorra-branca". A espécie possui ampla distribuição geográfica na América do Sul, no Brasil pode ser encontrado em todas as regiões do país, com exceção da região Sul (Carvalho 2005; Van Der Werff 2008). Dessa forma, a espécie pode ser utilizada em uma ampla faixa territorial no país e em outras regiões tropicais do mundo com características edafoclimáticas semelhantes, pois apresenta boa adaptabilidade a diferentes ambientes.

Estudos recentes vêm demonstrando o potencial da espécie para fins energéticos. Os valores de densidade básica variam de 0,443 a 0,529 g cm⁻³ aos 87 meses (Barros-Junior et al. 2022) e de 0,486 a 0,597 g cm⁻³ aos 102 meses (Lima et al. 2023). A densidade energética de 9151 MJ m⁻³ e poder calorífico da madeira de 19,7 MJ kg⁻¹ aos 87 meses (Silva et al. 2021). Ainda, *T. vulgaris* apresenta rápido crescimento, podendo apresentar incremento em altura de 2,38 m ano⁻¹ e em diâmetro de 2,73 cm ano⁻¹ aos 102 meses (Lima et al. 2023) e incremento médio anual de 23,22 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ aos 102 meses (Moraes et al. 2023) e 25,80 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ aos 120 meses (Teixeira et al. 2023) em espaçamento de 2 m x 3 m.

Até o momento não existem plantios comerciais de *T. vulgaris* no Brasil (Teixeira et al. 2023). Dessa forma, para que futuramente seja possível a sua indicação para plantios energéticos na Amazônia é importante a criação de diretrizes de manejo, definição de estratégias de otimização da produção energética e preenchimento de lacunas na cadeia produtiva da espécie (Lima et al. 2023). Assim como os estudos que verificaram o potencial da madeira para bioenergia (Silva et al. 2021; Santos et al. 2023; Moraes et al. 2023), estudos que contribuem na ecologia do carbono nesses plantios florestais são importantes, principalmente para avaliar o estoque de carbono de forma anual. A espécie apresenta anéis de crescimento anuais, sendo possível obter a densidade aparente anual (12% de umidade) pela técnica de densitometria de raios X (Moraes et al. 2023). Dessa forma, uma equação para predizer a densidade básica por meio da densidade aparente dos anéis de crescimento, ajudaria na quantificação dos estoques de carbono e melhoraria a previsão da dinâmica da comunidade.

Ainda que existam equações generalistas de conversão de densidade aparente a 12% de umidade em densidade básica (Reyes et al. 1992; Simpson 1993; Vieilledent et al. 2018), a criação de uma equação específica para plantios de *T. vulgaris* garante maior acurácia dos resultados. Diante do exposto, o objetivo desse estudo foi ajustar equação para estimar a

densidade básica da madeira a partir da densidade aparente para plantios homogêneos de *T. vulgaris* na Amazônia e classificar as árvores de *T. vulgaris* para fins energéticos utilizando a densidade da madeira.

6.2 Material e métodos

6.2.1 Caracterização da área experimental

Os dois plantios experimentais de *T. vulgaris* avaliados apresentam aproximadamente 1.6 ha cada e estão localizados na propriedade da empresa Jari Celulose S.A., no Distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, Pará, Brasil (Fig. 1a). A classificação de Köppen-Geiger para a região é do tipo Am (Alvares et al. 2013). A precipitação média anual (dados da área de estudo entre 2010 e 2021) é de 2.145 mm com período seco entre agosto e novembro, e temperatura média anual de 27.3°C (Fig. 1b). Vale mencionar que os dados de temperatura do ar foram obtidos pela estação meteorológica de Monte Alegre – Pará (cidade próxima a área de estudo) e disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023). Um dos plantios experimentais está localizado sobre Latossolo Amarelo de textura franco arenosa (0°47'17,13" S e 52°37'8,32" O) e o outro sobre Latossolo Amarelo de textura muito argilosa (0°53'29,30" S e 52°29'15,09" O) (Teixeira et al. 2023).

Os plantios foram instalados em 2010, com espaçamento de 3 m x 2 m (6 m²) para as duas áreas. Antes da implantação dos experimentos, as áreas foram ocupadas por plantações de *Eucalyptus* sp. Para o preparo das áreas, foi realizada limpeza química manual pós-emergente e correção da acidez do solo com calcário em área total (1500 kg ha⁻¹) com 30 dias antes do plantio das mudas (Teixeira et al. 2023). A implantação dos experimentos foi por meio de sementes provenientes de matrizes (árvores) localizadas nos municípios de Almeirim, Belterra e Santarém (Estado do Pará, Brasil) e Macapá (Estado do Amapá, Brasil).

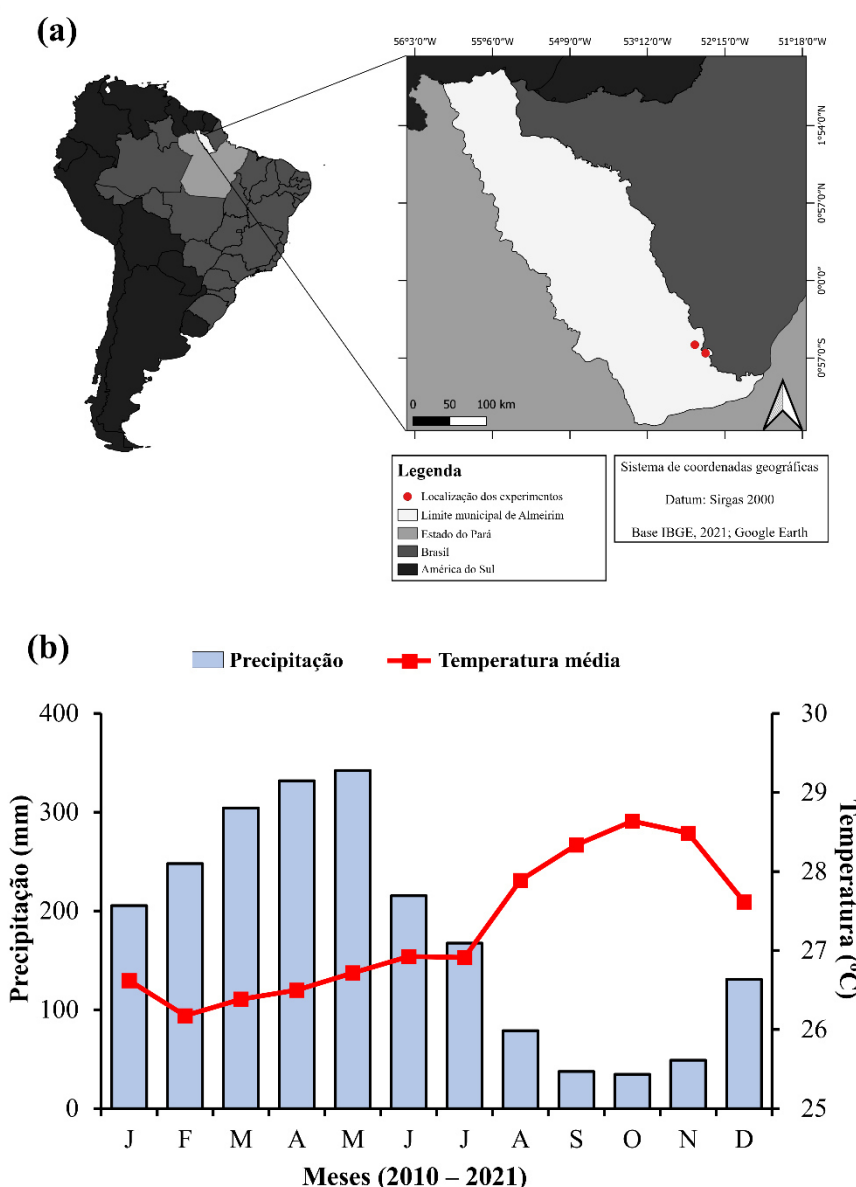


Fig. 1 Localização da área de estudo, no distrito de Monte Dourado, Almeirim, Pará, Brasil (a); climograma da área de estudo (b)

6.2.2 Desenho experimental e amostragem da madeira de *Tachigali vulgaris*

A implantação dos experimentos foi realizada em delineamento de blocos casualizados, em esquema fatorial, com 4 blocos, sendo os tratamentos formados por 4 diferentes doses de fósforo (P) e três diferentes doses de potássio (K), que foram combinados entre si, totalizando 12 tratamentos e 48 parcelas para cada área experimental. Cada parcela possui a dimensão de 12 m x 14 m (168 m²) e é composta por 4 linhas com 7 plantas (28 plantas/parcela) e, dessas, as 6 árvores centrais de cada parcela foram consideradas como parcela permanente. Essas parcelas foram anualmente monitoradas para conduzir pesquisas sobre crescimento e taxas de mortalidade, conforme pode ser visualizado em detalhes no trabalho de Teixeira et al. (2023). (Teixeira et al. 2023).

O fertilizante utilizado como fonte de P foi o superfosfato triplo (41% de P_2O_5) e sua aplicação foi realizada durante o plantio das mudas no fundo da cova. Foi utilizado o cloreto de potássio como fonte de K (58% de K_2O) e sua aplicação foi realizada de forma parcelada (40% aos 20 dias e 60% aos 90 dias após o plantio). Como o *T. vulgaris* é uma espécie que possui capacidade de associação simbiótica com bactérias fixadoras de nitrogênio, foi realizada somente uma aplicação inicial de apoio de nitrogênio (N) com fertilizante sulfato de amônio (21% de N), 20 dias após o plantio para todos os tratamentos. Para descrições e informações mais detalhadas dos plantios experimentais, consultar Teixeira et al. (2023).

Para o presente estudo, foram coletadas árvores nos dois plantios experimentais (Fig. 2a), sendo avaliados dois tratamentos (entre os 12 tratamentos instalados), sendo eles: sem adubação (testemunha) e com a máxima adubação (320 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 199 kg ha^{-1} de K_2O) testadas no experimento.

Em 2021, foram amostradas 32 árvores (16 árvores no solo franco arenoso e 16 árvores no solo argiloso – com e sem adubação), sendo 15 árvores não bifurcadas e 17 árvores bifurcadas. A Tabela 1 mostra as informações médias das características dendrométricas das árvores coletadas, como volume sem casca, altura comercial, altura total e diâmetro médio equivalente, que é obtida pela raiz quadrada da soma de cada diâmetro quadrado à altura do peito dos troncos das árvores, representando o diâmetro equivalente para uma determinada área segmentar (Moraes et al. 2023).

Tabela 1 Informações dendrométricas das árvores amostras para as duas classes texturais do solo com ausência e presença de adubação

Textura	Adubação	Volume sem casca (m^3)	HC (m)	HT (cm)	DAPeq (cm)
Franco arenoso	Sem	0.332 (0.09)	21.76 (1.88)	24.93 (1.87)	18.70 (2.83)
	Com	0.242 (0.13)	19.56 (2.91)	23.61 (1.80)	15.80 (4.43)
Muito argiloso	Sem	0.241 (0.16)	17.52 (2.97)	21.26 (2.37)	16.55 (4.15)
	Com	0.219 (0.10)	17.56 (2.44)	20.80 (3.52)	16.38 (2.95)

HC: altura comercial, HT: altura total, DAPeq: diâmetro a altura do peito equivalente. Média (desvio padrão)

Foram cortados discos das árvores com $\approx 5 \text{ cm}$ de espessura ao longo da altura comercial, considerada até o diâmetro mínimo de 5 cm com casca. Para as árvores não

bifurcadas, foram amostrados discos nas posições relativas de 0%, DBH, 25%, 50%, 75% e 100%. A mesma amostragem também foi aplicada para as árvores bifurcadas, tanto para os fustes principais quanto para os secundários, sendo realizada para essas árvores mais uma amostragem na base da bifurcação e uma no início do fuste principal (Fig. 2b). Posteriormente, os discos foram divididos ao meio, gerando duplicatas com ≈ 2.5 cm de espessura (Fig. 2c). Um dos discos foi utilizado para a determinação de densidade básica (Fig. 2d) e o outro para a densitometria de raios X (Fig. 2e).

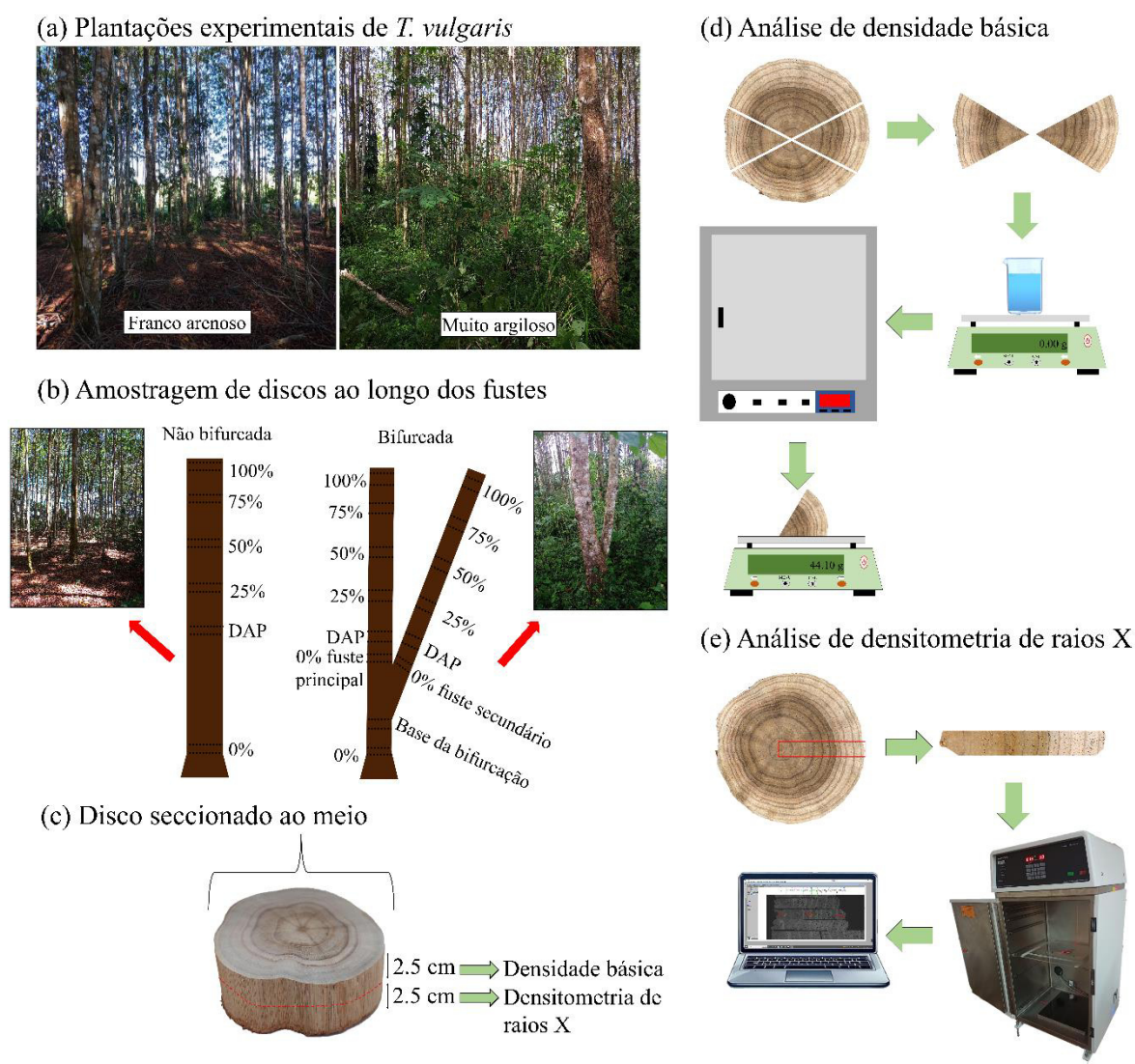


Fig. 2 Plantios experimentais de *T. vulgaris* avaliados em solo franco-arenoso e muito argiloso, no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, Pará, Brasil (a), amostragem de discos ao longo do fuste de árvores não bifurcadas e bifurcadas (b), discos divididos ao meio gerando duplicatas com ≈ 2.5 cm de espessura (c), análise de densidade básica (d), e análise de densitometria de raios X (e)

6.2.3 Determinação da densidade básica da madeira

A densidade básica da madeira foi realizada com base na norma NBR 11941-02, em que o volume saturado das amostras foi realizado pelo método de imersão em água (ABNT 2003).

Foram utilizadas duas cunhas opostas oriundas dos discos de cada posição de amostragem ao longo do fuste, com exceção dos discos da posição do DAP que não foram avaliadas a densidade básica. Os valores representativos de densidade básica média para cada disco foram obtidos pela média aritmética das cunhas opostas. Essa metodologia já foi utilizada em outros estudos com a espécie (Barros-Junior et al. 2022; Lima et al. 2023; Moraes et al. 2023).

6.2.4 Determinação da densidade aparente por densitometria de raios X

Para cada disco amostrado nas diferentes posições longitudinais foi coletado um raio da seção transversal com dimensões de aproximadamente 1 cm de largura x 2.5 cm de espessura x comprimento equivalente ao raio coletado do disco. Os raios amostrados foram cortados transversalmente em cortadora metalográfica de precisão ISOMET® 5000 Buehler com disco diamantado, após as amostras serem saturadas para garantir a homogeneidade da espessura no momento do corte. Após cortes na cortadora metalográfica, os raios ficaram com dimensões aproximadas de 1 cm de largura x 1 mm de espessura x comprimento igual ao raio escolhido do disco. As amostras foram acondicionadas em climatizadora (20°C e 60% de umidade relativa) para atingir umidade estável de 12% (Tomazello et al. 2008).

Para a determinação da densidade aparente por densitometria de raios X dos anéis de crescimento de *T. vulgaris*, inicialmente os raios foram radiografados em câmara de raios X digital Faxitron X-ray (model LX 60), junto a uma cunha de calibração de acetato para a obtenção de informações quantitativas. A configuração do equipamento foi 5 segundos de irradiação e 30 kv de tensão. As imagens radiografadas foram analisadas no software WinDendro™ (Regent Instruments Inc.), onde foram obtidos os perfis de densidade.

6.2.5 Determinação da densidade básica da madeira a partir da densidade aparente por densitometria de raios X

A densidade aparente dos discos de *T. vulgaris* foi determinada por meio de médias ponderadas da densidade aparente dos anéis de crescimento em função da área transversal (g) ocupada pela amostra (Eq. 1), em que, o valor do último anel de crescimento representa a densidade do disco, visto que, foi ponderado pela área transversal total do disco. A partir dos valores obtidos de densidade aparente e densidade básica dos mesmos discos ao longo da seção longitudinal, foi realizada regressão linear para avaliar a relação e, assim, estimar a densidade básica por meio da densidade aparente obtida por densitometria de raios X.

$$DA_{pond} = \frac{DA_{anel1} * g_{anel1} + DA_{anel2} * g_{anel2} + ... + DA_{anelX} * g_{ringX}}{\sum g_{anelTotal}} \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que: DA_{pond} é a densidade aparente ponderada do anel de crescimento (g cm^{-3}), DA_{anel} é a densidade aparente do anel de crescimento obtida pelo software WinDendroTM (g cm^{-3}), g_{anel} é a área transversal ocupada pelos anéis de crescimento (cm^2), $g_{anelTotal}$ é a área transversal total ocupada pelos anéis de crescimento (cm^2).

6.2.6 Análise estatística

Para construir o modelo para prever a densidade básica da madeira em função da densidade aparente, obtida por densitometria de raios X, e de outros fatores experimentais, foi utilizada a abordagem de comparação de modelos mistos aninhados. Para tal, o modelo completo foi ajustado com a densidade aparente como variável resposta e as seguintes variáveis explicativas: densidade aparente, presença ou ausência de adubação, classe textural de solo e presença ou ausência de bifurcação, sendo estas últimas, inseridas como variáveis categóricas no modelo. Para testar se, além da densidade aparente, as variáveis experimentais presença ou ausência de adubação, classe textural de solo e presença ou ausência de bifurcação colaboram significativamente na predição da densidade básica, foi ajustado um modelo somente com a densidade aparente como variável explicativa. Os modelos foram ajustados pelo método da verossimilhança e comparados pelo teste de razão de verossimilhança, com o nível de significância de 5%. Em ambos os modelos, o efeito aleatório foi adicionado ao intercepto e composto de árvores dentro de blocos. Para avaliar a qualidade das estimativas do modelo final, foram usadas as seguintes estatísticas: correlação de Pearson ($r_{y\hat{y}}$) entre os valores observados e estimados (Eq. 2), eficiência do modelo (EF) (Eq. 3), raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEM%) (Eq. 4) e média dos erros absolutos (MAE) (Eq. 5). Os processamentos foram realizados no software R (version 4.2.3), com o pacote *nlme* (Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-162) (R Development Core Team 2023).

$$r_{y\hat{y}} = \frac{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (Obs_i - \overline{Obs_i}) * (Est_i - \overline{Est_i})}{\sqrt{\sigma_{Obs}^2} \sqrt{\sigma_{Est}^2}} \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que: Obs são os valores observados; Est valores estimados; $\overline{Obs}$ média dos valores observados; $\overline{Est}$ média dos valores estimados; n número de observações; σ_{Obs}^2 variância dos valores observados; σ_{Est}^2 variância dos valores estimados.

$$EF = 1 - \frac{SQR}{SQT} * 100 \quad \text{Eq. (3)}$$

Em que: SQR é a soma dos quadrados dos resíduos; SQT é a soma dos quadrados totais.

$$RQEM\% = \frac{100}{\overline{Obs}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Obs_i - Est_i)^2}{n}} \quad \text{Eq. (4)}$$

Em que: *Obs* são os valores observados; *Est* valores estimados; $\overline{Obs}$ média dos valores observados; n número de observações.

$$MAE = \sum_{i=1}^n \frac{|Obs_i - Est_i|}{\overline{Obs}} \quad \text{Eq. (5)}$$

Em que: *Obs* são os valores observados; *Est* valores estimados; $\overline{Obs}$ média dos valores observados

Os dados também foram analisados com base na estatística descritiva simples. Para determinar a densidade básica média das árvores tanto pelo método de imersão em água, quanto pela equação, foi calculada a média aritmética de todas as posições longitudinais (com exceção do DBH).

6.2.7 Validação da equação de conversão e classificação de densidade básica

Para a validação da equação populacional gerada, os valores médios das árvores obtidos experimentalmente foram comparados com os valores calculados pela equação e foi realizada a diferença percentual (%) para verificar a superestimação ou subestimação dos valores médios reais (Eq. 6). Os valores médios obtidos também foram comparados com o fator de conversão de 0.828, que foi obtido a partir de um banco de dados global de tecnologia da madeira. A elaboração desse fator considerou valores de densidades disponíveis para 4.022 árvores, provenientes principalmente de regiões tropicais (Vieilledent et al. 2018).

$$Diferença (\%) = \frac{(DB_{equação} - DB_{imersão})}{WBD_{imersão}} * 100 \quad \text{Eq. (6)}$$

Em que: $DB_{equação}$ é o valor de densidade básica obtido a partir da conversão da densidade aparente a 12% de umidade pela equação populacional ($g\ cm^{-3}$), $DB_{imersão}$ é o valor de densidade básica obtido pelo método de imersão ($g\ cm^{-3}$)

Posteriormente, os valores de densidade obtidos pelo método de imersão e pela equação populacional foram classificados para cada disco amostrado e para a média das árvores, com base na metodologia adotada por Barros-Junior et al. (2022) e Moraes et al. (2023). Madeiras

com valores $< 0.500 \text{ g cm}^{-3}$ foram classificados como baixa densidade básica, e valores $\geq 0.500 \text{ g cm}^{-3}$ classificados como média densidade básica.

Por fim, foi determinada a densidade básica anual para todas as posições amostradas das árvores de *T. vulgaris* a partir da equação gerada. Posteriormente, foram avaliados os valores médios anuais para cada posição dentro do fuste e feita a classificação da densidade básica (baixa ou média) por ano.

6.3 Resultados

6.3.1 Estimativa de densidade básica a partir da densidade aparente

As variáveis presença ou ausência de adubação, classe textural de solo e presença ou ausência de bifurcação não tiveram efeito sobre a relação entre densidade aparente e densidade básica da madeira para as árvores de *T. vulgaris* ($p > 0.05$). Dessa forma, o modelo com a densidade aparente como variável explicativa foi utilizado, gerando a equação populacional para a espécie. O modelo de regressão linear relacionando a densidade básica e a densidade aparente foi significativo ($p < 0.001$), apresentando correlação ($r_{y\hat{y}} = 0.84$), eficiência do modelo ($EF = 0.71$), raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEM%) = 9.31 e média dos erros absolutos (MAE) = 7.28 (Fig. 3). Os resíduos (%) mostram uma distribuição aleatória ao longo dos valores ajustados, indicando que o modelo de regressão gerado apresenta uma relação adequada entre densidade básica e densidade aparente a 12% de umidade.

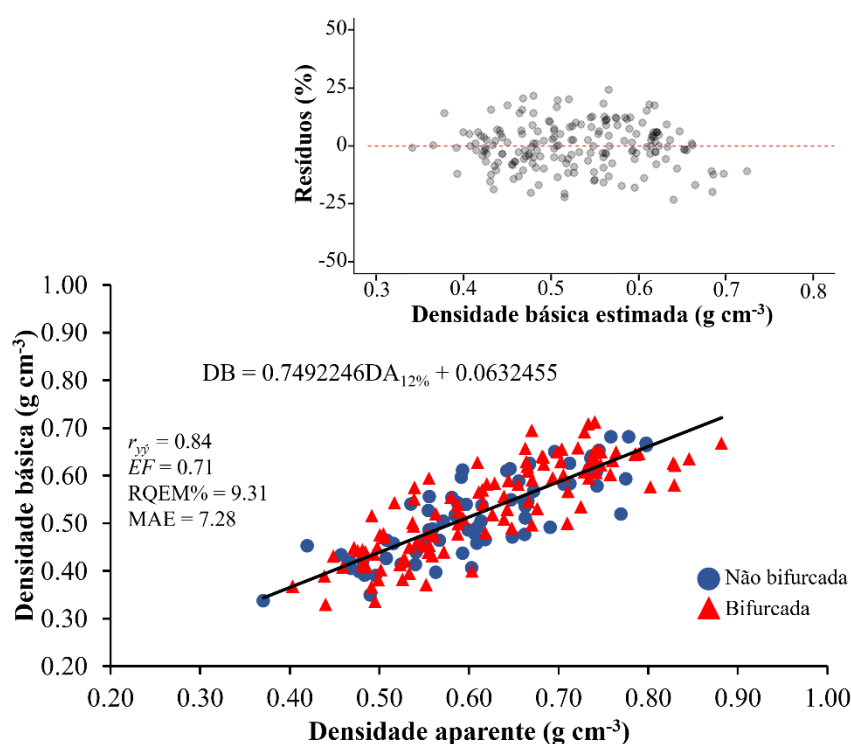


Fig. 3 Modelo de regressão linear simples ajustado por máximo verossimilhança entre densidade aparente e densidade básica, com resíduos do modelo ajustado e estatística de qualidade para árvores de *T. vulgaris*.

6.3.2 Validação da equação de conversão e classificação de densidade básica

A densidade básica média encontrada pelo método de imersão em água para as árvores de *T. vulgaris* foi de 0.520 g cm^{-3} ($\pm 0.041 \text{ g cm}^{-3}$). O valor de densidade média encontrada pela equação populacional foi de 0.524 g cm^{-3} ($\pm 0.040 \text{ g cm}^{-3}$). Assim, comparado com o método direto de determinação de densidade básica, a equação em relação à média das árvores superestimou o resultado em aproximadamente 0.88%, apresentando árvores que tiveram seus valores subestimados em até 7.39% e superestimado em até 10.18% (Tabela 2).

Tabela 2 Valores médios de densidade básica da madeira (DB) para as 32 árvores de *T. vulgaris* avaliadas no estudo obtidos pelo método de imersão em água, pela equação populacional, pelo fator de conversão e a diferença entre as médias para cada árvore em porcentagem (%). A diferença (%) positiva indica que a equação e o fator de conversão superestimaram os valores e a diferença negativa indica que a equação e o fator de conversão subestimaram os valores

Árvores	Bifurcação	DB (imersão)	DB (Equação)	Diferença (%)*	Fator de conversão (0.828)	Diferença (%)**
1	Não bifurcada	0.536	0.556	3.84	0.599	1.88
2	Não bifurcada	0.596	0.604	1.49	0.564	0.57
3	Não bifurcada	0.582	0.573	-1.64	0.488	-3.15
4	Não bifurcada	0.506	0.504	-0.31	0.458	-3.48
5	Não bifurcada	0.480	0.477	-0.55	0.409	-4.48
6	Não bifurcada	0.433	0.433	-0.20	0.526	-5.63
7	Não bifurcada	0.489	0.538	10.18	0.473	7.64
8	Não bifurcada	0.494	0.491	-0.68	0.510	-4.21
9	Não bifurcada	0.507	0.524	3.42	0.510	0.67
10	Não bifurcada	0.539	0.524	-2.78	0.437	-5.36
11	Não bifurcada	0.450	0.458	1.78	0.545	-2.86
12	Não bifurcada	0.537	0.556	3.46	0.531	1.49
13	Não bifurcada	0.528	0.543	2.79	0.486	0.52
14	Não bifurcada	0.521	0.502	-3.65	0.528	-6.77
15	Não bifurcada	0.563	0.540	-4.18	0.575	-6.35
16	Bifurcada	0.547	0.582	6.41	0.493	4.98
17	Bifurcada	0.528	0.508	-3.76	0.468	-6.71
18	Bifurcada	0.478	0.486	1.72	0.477	-2.03
19	Bifurcada	0.492	0.494	0.37	0.520	-3.10
20	Bifurcada	0.534	0.533	-0.19	0.502	-2.63
21	Bifurcada	0.514	0.517	0.47	0.601	-2.38
22	Bifurcada	0.597	0.606	1.58	0.497	0.69
23	Bifurcada	0.495	0.512	3.53	0.488	0.47
24	Bifurcada	0.495	0.504	1.87	0.483	-1.37
25	Bifurcada	0.484	0.499	3.12	0.545	-0.28

26	Bifurcada	0.542	0.556	2.60	0.526	0.65
27	Bifurcada	0.503	0.538	7.09	0.508	4.62
28	Bifurcada	0.516	0.523	1.31	0.471	-1.42
29	Bifurcada	0.528	0.489	-7.39	0.535	-10.74
30	Bifurcada	0.572	0.546	-4.45	0.464	-6.47
31	Bifurcada	0.462	0.483	4.51	0.566	0.55
32	Bifurcada	0.582	0.575	-1.26	0.599	-2.73
Média		0.520	0.524	0.88	0.510	-1.80
Desvio padrão		0.041	0.040	-	0.044	-

*diferença entre a densidade pelo método de imersão e equação, ** diferença entre a densidade pelo método de imersão e o fator de conversão

A Tabela 3 compara os valores de densidade básica média obtidos pelo método de imersão em água e pela equação populacional com valores de densidade básica realizados em plantios experimentais de *T. vulgaris* ocorrido nos últimos 40 anos.

Tabela 3 Estudo com densidade do lenho da espécie *T. vulgaris* realizados nos últimos 40 anos.

Idade (anos)	Fator testado	Densidade (g cm ⁻³)		Referências
		Básica	Aparente (12%)	
11	Fertilização, textura do solo e bifurcação	0,520 0,524*	0,632	Estudo
8.5	Espaçamento e bifurcação	0,529	0,674	Moraes et al. (2023)
7,25	Espaçamento e bifurcação	0,441 – 0,594	-	Lima et al. (2023)
8,5		0,486 – 0,597	-	
7.25	Espaçamento e bifurcação	0,443 – 0,529	-	Barros-Junior et al. (2022)
7, 25	Espaçamento	0,493	-	Silva et al. (2021)
5,8	Espaçamento	0,564 – 0,687	-	Tonini et al. (2018)
20,0	Classe diamétrica	0,581	-	Orellana et al. (2018)
15,0		0,562	-	
8	-	0,633	-	Tomaselli et al. (1983)

*Valor obtido pela equação populacional

6.3.3 Classificação da densidade básica média e anual de árvores de *T. vulgaris* a partir da equação populacional

Para a classificação da densidade básica dos discos amostrados, comparando entre o percentual obtido pelo método de imersão e pela equação, notou-se que para as árvores não bifurcadas 8% a mais dos discos amostrados foram considerados como densidade média pela equação, enquanto para as árvores bifurcadas foram 2% a menos foram considerados como densidade média (Fig. 4a). Para a densidade média das árvores, a equação estimou 6% a mais como densidade média tanto para as árvores não bifurcadas, quanto para as árvores bifurcadas (Fig. 4b).

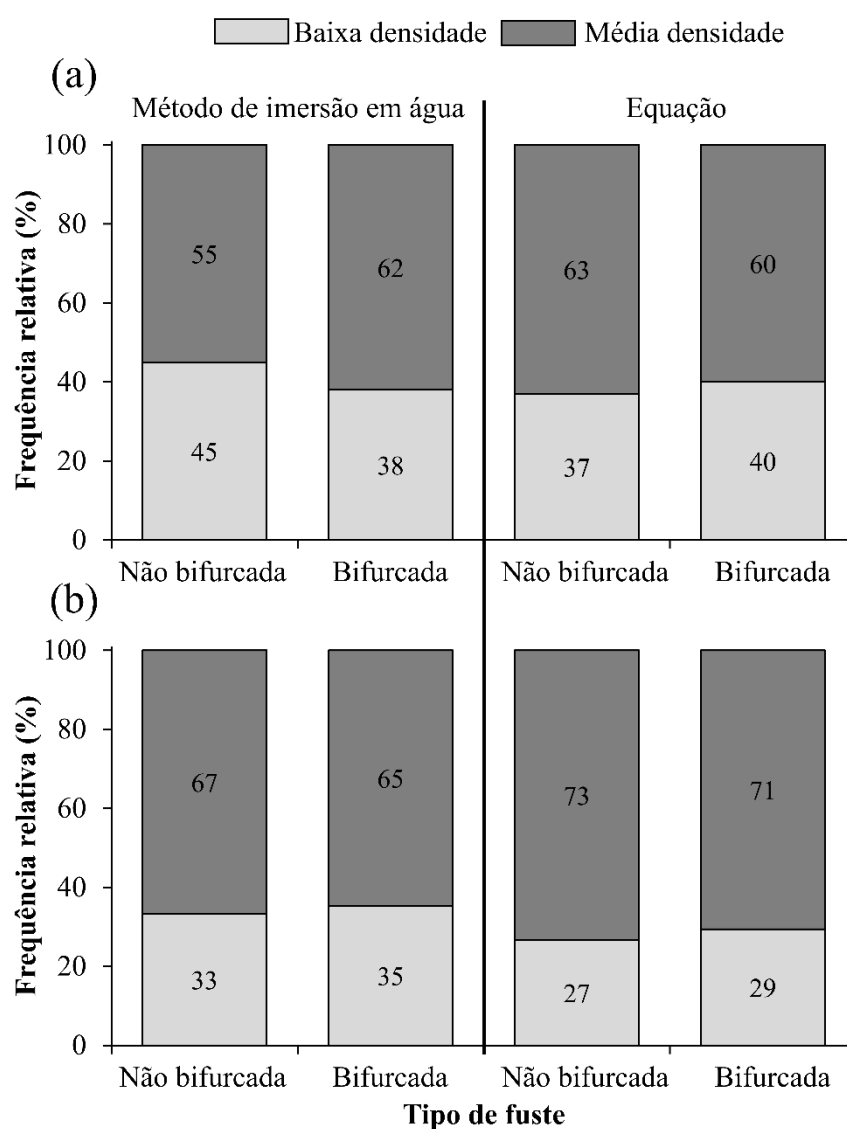


Fig. 4 Comparação da frequência relativa da densidade básica classificada como baixa densidade ($< 0.500 \text{ g cm}^{-3}$) e média densidade ($\geq 0.500 \text{ g cm}^{-3}$) entre o método de imersão em água e pela equação populacional para os discos amostrados para as diferentes posições dentro do fuste (a) e para a densidade média das árvores (b)

Como não foram verificados efeitos significativos dos fatores testados na predição da densidade básica, foram apresentados os valores médios anuais de densidade básica obtidos pela equação populacional (Fig. 5). Para 0% da altura relativa, houve um aumento de densidade até o 3º ano, seguido de uma tendência de estabilização dos valores de densidade básica média a partir do 4º ano até o 11º ano, com variações de valores entre 0,537 a 0,618 g cm⁻³. Para o DAP, houve em geral um aumento até o 11º ano, com uma variação entre 0,516 a 0,569 g cm⁻³, enquanto as alturas de 25% e 50% apresentaram tendência de estabilidade ao longo dos anos, com um aumento mais expressivo no último ano. Para as alturas relativas de 75% e 100%, houve redução até o 4º ano, e posteriormente, apresentou tendência de aumento de densidade básica.

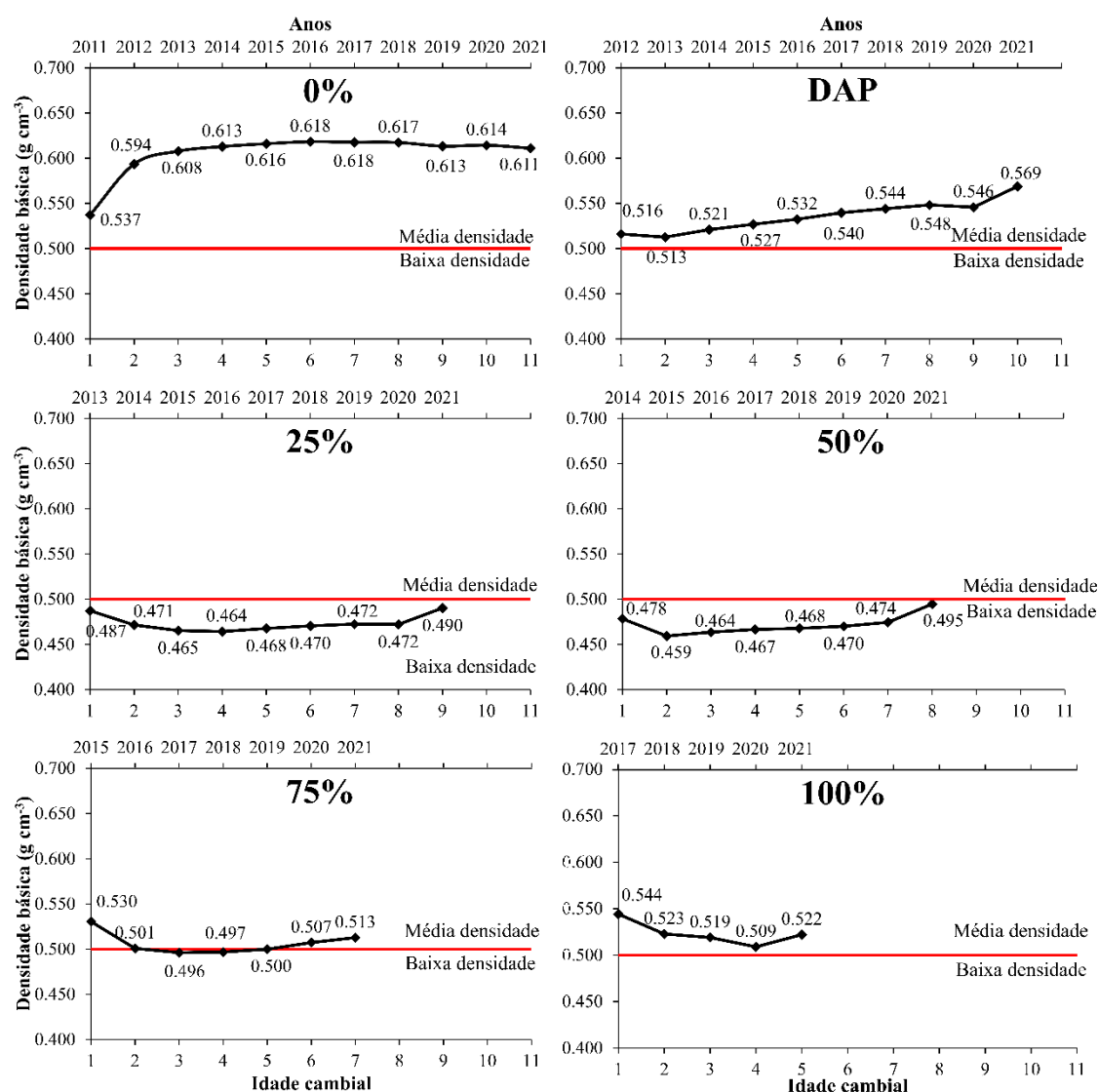


Fig. 5 Valores de densidade média básica obtidos pela equação populacional ao longo das idades cambiais e anos civis nas diferentes posições relativas das árvores de *T. vulgaris*. As linhas em vermelho representam a faixa de classificação em baixa e média densidade

Os maiores valores de densidade básica estimada foram na base do fuste (0% da altura relativa), com o valor médio de $0.607 \text{ g cm}^{-3} (\pm 0.056 \text{ g cm}^{-3})$ em que todos os anos apresentaram densidade básica classificada como média densidade (Tabela 4). Do mesmo modo, todos os anéis de crescimento dos discos amostrados no DAP (média = $0.536 \text{ g cm}^{-3} \pm 0.056 \text{ g cm}^{-3}$) e 100% da altura relativa (média = $0.527 \text{ g cm}^{-3} \pm 0.053 \text{ g cm}^{-3}$) apresentaram densidade básica média. Para as posições relativas de 25% e 50%, que apresentaram valores médios de $0.475 \text{ g cm}^{-3} (\pm 0.056 \text{ g cm}^{-3})$ e $0.472 \text{ g cm}^{-3} (\pm 0.060 \text{ g cm}^{-3})$, respectivamente, apresentaram para todos os anéis de crescimento, valores de densidade classificados como baixa densidade. Para a altura de 75% (média = $0.508 \text{ g cm}^{-3} \pm 0.060 \text{ g cm}^{-3}$), o 3º e 4º ano apresentaram densidade baixa, já os demais anos apresentaram valores considerados de média densidade (Tabela 4). O menor e maior valor médio encontrado entre os anos para as diferentes posições dentro do fuste das árvores avaliadas foram em ordem 0.340 g cm^{-3} e 0.684 g cm^{-3} .

Tabela 4 Variação da densidade básica estimada na direção radial, considerando diferentes posições da altura comercial (metros e relativa) de amostragem em árvores de *T. vulgaris*

Altura		Média dos anéis de árvores	Densidade (g cm^{-3})			CV (%)
Metros (m)	Relativa (%)		Média	Minima	Máxima	
0.12	0%	11	0.607 ± 0.056	0.417	0.768	9.19
1.3	DAP	10	0.536 ± 0.056	0.362	0.645	10.43
4.73	25%	9	0.475 ± 0.056	0.320	0.633	11.87
9.47	50%	8	0.472 ± 0.060	0.375	0.647	12.68
14.2	75%	7	0.508 ± 0.060	0.392	0.685	11.79
18.93	100%	5	0.527 ± 0.053	0.414	0.641	10.07

CV: Coeficiente de variação. Média $\pm$ Desvio padrão

A classificação da densidade básica anual para as diferentes posições amostradas ao longo do fuste mostrou que os discos da base apresentaram a maior quantidade anéis de crescimento com média densidade. Somente no primeiro ano que houve um maior percentual de baixa densidade (32%) para essa posição com uma diminuição abrupta dessa porcentagem já para o segundo ano (6%). A partir do sexto ano, 100% dos anéis de crescimento apresentaram média densidade (Fig. 6). Em geral, houve um aumento da proporção de anéis de crescimento de média densidade com o aumento da idade cambial no DBH, atingindo o décimo ano com 95% dos anéis classificados como média densidade.

Para as posições de 25% e 50%, a maior proporção foi de baixa densidade para todos os anos avaliados, com um aumento mais expressivo de média densidade somente no último ano (Fig. 6). Os anéis de crescimento da posição de 75% apresentaram aumento de anéis de baixa densidade do primeiro até o quarto ano, seguido de aumento da proporção de anéis de média densidade no quinto e sexto ano reduzindo novamente no último ano. Já para a posição de 100%, houve tendência de aumento de anéis de média densidade com o aumento da idade cambial (Fig. 6).

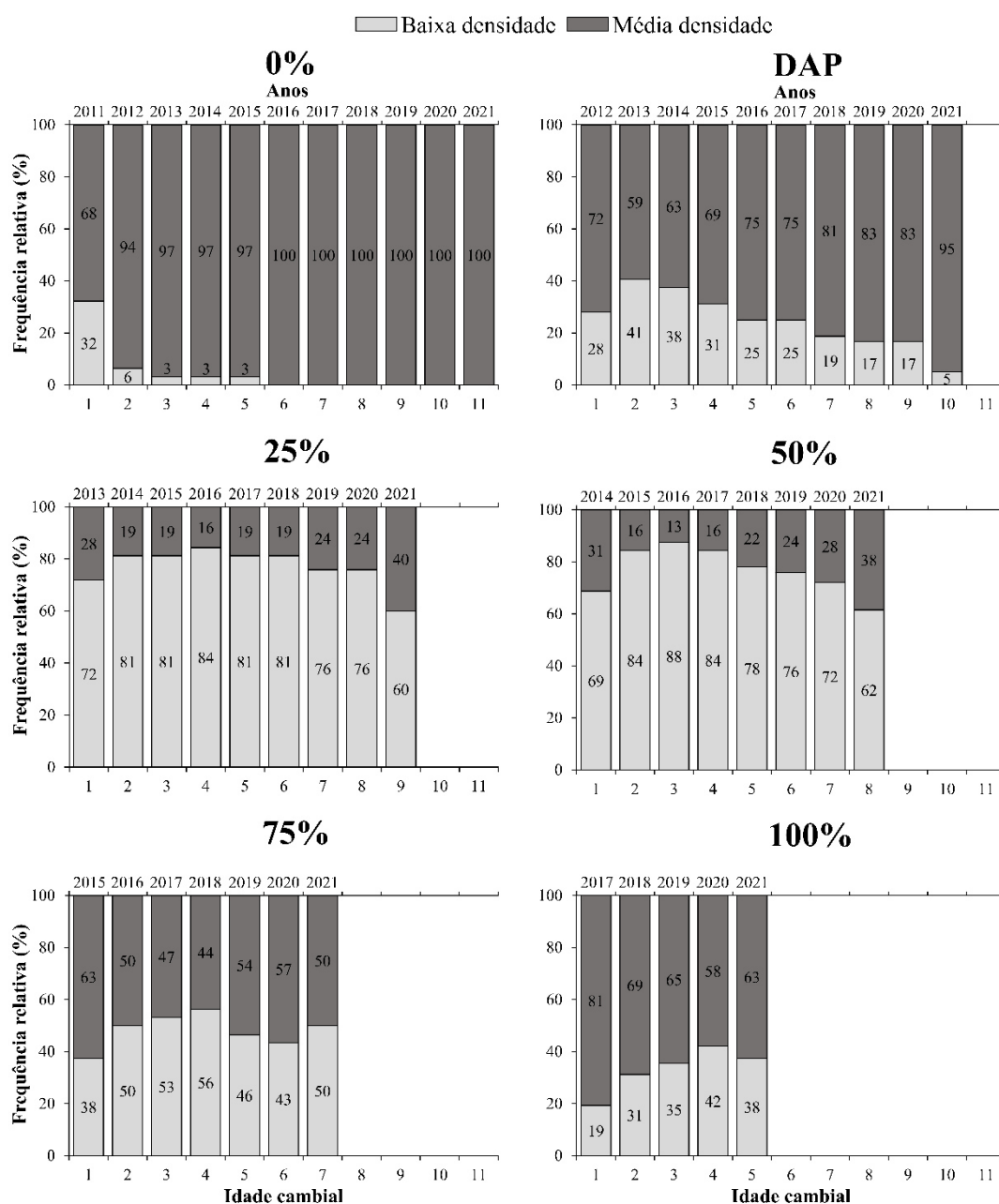


Fig. 6 Frequência relativa da densidade básica obtidas pela equação populacional classificadas como baixa densidade ($< 0.500 \text{ g cm}^{-3}$) e média densidade ($\geq 0.500 \text{ g cm}^{-3}$) ao longo das idades cambiais e anos civis nas diferentes posições relativas das árvores de *T. vulgaris*.

6.4 Discussão

6.4.1 Estimativa de densidade básica a partir da densidade aparente

A densidade básica está fortemente relacionada com a densidade aparente, podendo ser estimada por modelos de regressão linear (Reyes et al. 1992; Simpson 1993; Vieilledent et al. 2018). Em geral, ocorre maiores valores de densidade aparente em relação a densidade básica, pois, é levado em consideração o volume dos espaços vazios da madeira (Dias Júnior et al. 2021), havendo a influência da umidade.

Na literatura é relatado que modelos para estimar densidade básica das árvores se tornam mais precisos incluindo a densidade e largura dos anéis de crescimento (Dahlen et al. 2018; Ortega Rodriguez and Tomazello-Filho 2019). Para a densidade básica, o método de determinação em cunhas opostas consegue representar a variação de densidade da medula até a casca, ou seja, o valor obtido para cada cunha reflete um valor médio da variação dos anéis de crescimento. Para a densidade aparente, a média dos discos foram obtidas em função da área transversal ocupada pela amostra (g), assim também levando em consideração a variação dos anéis de crescimento.

As variáveis categóricas (presença ou ausência de adubação, classe textural de solo e presença ou ausência de bifurcação) não apresentaram influência na predição da densidade básica. Isso pode estar relacionado a grande influência da variabilidade genética nas características anatômicas e físicas da madeira da espécie (Silva et al. 2021). O fato de a adubação não ter influenciado na densidade, diferente do verificado para outras espécies de crescimento rápido, como *Pinus* sp. (Love-Myers et al. 2009; Ortega Rodriguez and Tomazello-Filho 2019) e *Eucalyptus grandis* (Chambi-Legoas et al. 2021), pode estar relacionada a adaptabilidade da espécie aos solos Amazônicos, que naturalmente apresentam baixa fertilidade natural e alta concentração de Alumínio (Santos et al. 2018). Logo as árvores absorvem menor quantidade de nutrientes devido as altas concentrações de alumínio, que podem influenciar na absorção dos nutrientes.

De maneira geral, Teixeira et al. (2023) ao avaliar os efeitos das diferentes doses de adubação com P e K em variáveis dendrométricas nas mesmas áreas experimentais encontraram baixas exigências nutricionais para a espécie e atribuíram isso a um ou mais fatores relacionados, sendo eles: a adaptação da espécie a solos de baixa fertilidade; os altos teores de alumínio no solo; a grande variabilidade genética das espécies que associadas às variações do ambiente, fizeram que cada árvore apresentasse características fenotípicas distintas.

6.4.2 Validação da equação de conversão e classificação de densidade básica

Ao comparar os valores obtidos pelo método de imersão com a equação populacional e o fator de conversão de 0,828 (Tabela 2), a equação populacional mostrou-se mais eficaz, pois apresentou menor erro (Tabela 2). Segundo Vieilledent et al. (2018), esse fator de conversão (0,828) é baseado em um banco de dados grande e consistente, sendo mais adequado que outros já relatados na literatura, entre eles: Reyes et al. (1992), Simpson (1993), Chave et al. (2006) e já utilizada em outros estudos (Billard et al. 2020; De Cauwer et al. 2020; Van Den Berge et al. 2021; Ucella-Filho et al. 2023).

Os bons parâmetros da estatística de qualidade, os melhores valores obtidos quando comparados com o fator de conversão provenientes de um banco de dados global e sendo compatível com valores de densidade básica média observados na literatura para *T. vulgaris* (Barros-Junior et al. 2022; Lima et al. 2023; Moraes et al. 2023), a equação populacional gerada se mostrou adequada para a estimativa de densidade básica a partir da densidade aparente. Assim, a equação gerada pode ser sugerida para plantios de *T. vulgaris* em condições semelhantes ao estudo, ou seja, com doses máximas de adubação de 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 199 kg ha⁻¹ de K₂O e 21 hg ha⁻¹ de N; em Latossolo amarelo de textura franco arenosa ou muito argilosa; árvores não bifurcadas ou bifurcadas; e plantios de até 11 anos de idade.

A literatura para *T. vulgaris* apresenta uma expressiva variação na densidade básica da madeira de *T. vulgaris* em função, principalmente, da idade, silvicultura e bioma (Tabela 3). Mesmo com considerável variabilidade relatada na literatura os valores observados nesses estudos, em geral, são classificados como média densidade, mostrando semelhanças aos resultados encontrados em nosso estudo. Além disso, ressalta-se que apenas um estudo na literatura apresenta valores de densidade aparente para a espécie (Moraes et al. 2023).

6.4.3 Classificação da densidade básica média e anual de árvores de *T. vulgaris* a partir da equação populacional

A classificação de densidade básica mostrou que os discos das diferentes posições as árvores bifurcadas apresentam maior proporção de média densidade que árvores não bifurcadas. Isso pode ser atribuído a maior quantidade de discos considerados para a classificação por discos, pois as árvores bifurcadas levaram em consideração os discos da base da bifurcação e início do fuste principal (Fig. 2), e houve discos que apresentaram densidade média influenciando na proporção.

Todavia, para valores médios por árvore os indivíduos não bifurcados apresentam maior proporção de densidade média em relação a árvores bifurcadas. Os valores médios das árvores

foram semelhantes aos obtidos pela classificação realizada por Barros-Junior et al. (2022) e Moraes et al. (2023).

Na literatura já foi relatada que a presença de bifurcação reduz a densidade em árvores de *T. vulgaris* (Barros-Junior et al. 2022; Lima et al. 2023; Moraes et al. 2023). A espécie é propensa a competição por recursos como água, nutrientes e luz (Ramos et al. 2021), assim com a baixa disponibilidade desses recursos influencia na formação e expansão da parede celular tornam-se menos eficientes, resultando em uma parede celular mais fina, o que diminui a densidade da madeira (Barros-Junior et al. 2022). Porém, vale destacar que o fator genético (Leão et al. 2023), a interação genótipo x ambiente e idade são os que mais influenciam a densidade básica de *T. vulgaris* (Leão et al. 2023; Lima et al. 2023), influenciando até mais que a bifurcação das árvores. Ainda assim, a bifurcação pode levar a redução da densidade e causar maior heterogeneidade na densidade da madeira (Moraes et al. 2023), sendo uma desvantagem para fins energéticos (Lima et al. 2023).

A diminuição da densidade básica ao longo do sentido longitudinal até alturas médias das árvores, seguido de aumento em direção ao topo (Fig. 5, Tabela 5), também foi verificado nos estudos de Barros-Junior et al. (2022) e Moraes et al. (2023) para o *T. vulgaris*, de 87 meses e 102 meses respectivamente.

A classificação de densidade básica por ano (Fig. 6) corrobora com os valores médios encontrados, mostrando que a maior proporção de madeira de baixa densidade ocorre em regiões de altura média da árvore. Em adição, essa classificação mostra que a partir dos 5-6 anos, as árvores avaliadas, em geral, apresentam melhores proporções de densidade média. Os estudos realizados por Soares et al. (2022) no experimento de fertilização (aqui avaliado) e em experimento de espaçamento com *T. vulgaris* na mesma região verificaram que a provável idade de rotação com base no ponto de incremento médio máximo é entre 5-6 anos. Dessa forma, a partir dos 7 anos de plantio é possível realizar a rotação da espécie com densidade adequada para a produção de carvão vegetal com melhores qualidades.

A classificação da densidade no sentido base-topo é importante pois auxilia para a melhor destinação da madeira (Moraes et al. 2023). Madeiras com densidade básica $> 0.500 \text{ g cm}^{-3}$ geram carvões vegetais de melhor qualidade e aumentam a produtividade em fornos de tijolos sendo os mais indicados para siderurgia (Protásio et al. 2021). O potencial do *T. vulgaris* para a produção de carvão vegetal já foi verificado na literatura (Silva et al. 2021) e, assim, para uma melhor destinação do carvão produzido, o estudo sugere que regiões da árvore com densidade média poderiam ser destinado a siderurgia, enquanto que, regiões da árvore que apresentam densidade baixa, poderia ser destinada como proposto por Moraes et al. (2023),

para lenha, produção de cavacos ou carvão vegetal para uso doméstico, ou seja, utilidades que não exija alto desempenho mecânico.

6.5 Implicações práticas e limitações da pesquisa

Os resultados obtidos nesse estudo fornecem contribuições inéditas para avanços na pesquisa com o *T. vulgaris* na Amazônia. A equação populacional gerada no estudo pode trazer contribuições significativas no estudo de estoque de carbono da espécie, principalmente ao avaliar o estoque anual. Estudos futuros podem incluir outras variáveis na equação, como o coeficiente de retração volumétrica e ponto de saturação da fibra (Vieilledent et al. 2018). Além disso, considerar um gradiente de umidade maior no banco de dados, permitindo a conversão de densidade para qualquer teor de umidade, como já realizado para *Eucalyptus grandis* (Costa et al. 2014). Por fim, recomendamos uma amostragem maior, visando melhorar os parâmetros de ajuste da equação, consequentemente, menor erro embutido no modelo.

6.6 Conclusão

A equação populacional de densidade básica gerada superestimou em média aproximadamente 0.88% em relação aos valores reais de densidade básica. 67% das árvores não bifurcadas e 65% das árvores bifurcadas apresentaram média densidade ($\geq 0,500 \text{ g cm}^{-3}$). O estudo sugere que diferentes regiões da árvore devem ser destinadas para diferentes usos bioenergéticos. Finalmente, a equação populacional gerada para estimar a densidade básica a partir da densidade aparente a 12% de umidade se mostrou precisa, sendo recomendada para plantios realizados nas mesmas condições.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Embrapa Amazônia Oriental, ao Grupo Jari Celulose S.A., ao Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeiras (LAIM) do Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ) da Universidade de São Paulo (USP), ao Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (LTPF) da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (UFRA).

Referências

- ABNT (2003) Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11941: Madeira - determinação da densidade básica. Rio de Janeiro
- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, et al (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22:711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Assis MR, Brancheriau L, Napoli A, Trugilho PF (2016) Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. *Wood Sci Technol* 50:519–536. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0812-6>
- Barros-Junior UO, Rosário WAS, Lima MDR, et al (2022) Effects of tree spacing and forking on the modification of wood density in a trial plantation of *Tachigali vulgaris* for energy in Amazonia. *Journal of Tropical Forest Science* 34:11–23. <https://doi.org/10.26525/jtfs2022.34.1.11>
- Billard A, Bauer R, Mothe F, et al (2020) Improving aboveground biomass estimates by taking into account density variations between tree components. *Ann For Sci* 77:. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00999-1>
- Binkley D, Campoe OC, Alvares CA, et al (2020) Variation in whole-rotation yield among Eucalyptus genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS project. *For Ecol Manage* 462:117953. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117953>
- Carvalho PER (2005) Taxi-Branco: Taxonomia e Nomenclatura. Colombo
- Chambi-Legoas R, Chaix G, Castro VR, et al (2021) Inter-annual effects of potassium/sodium fertilization and water deficit on wood quality of Eucalyptus grandis trees over a full rotation. *For Ecol Manage* 496:119415. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119415>
- Chave J, Coomes D, Jansen S, et al (2009) Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecol Lett* 12:351–366. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x>
- Chave J, Muller-Landau HC, Baker TR, et al (2006) Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species. *Ecological Applications* 16:2356–2367
- Costa SE de L, Santos RC do, Vidaurre GB, et al (2020) The effects of contrasting environments on the basic density and mean annual increment of wood from eucalyptus clones. *For Ecol Manage* 458:117807. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117807>
- Costa VE, De Rezende MA, Rodrigues VA (2014) Conversion between basic density and apparent density at any moisture content in Eucalyptus grandis. *Holzforschung* 68:981–986. <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0211>
- Dahlen J, Auty D, Eberhardt TL (2018) Models for predicting specific gravity and ring width for loblolly pine from intensively managed plantations, and implications for wood utilization. *Forests* 9:292. <https://doi.org/10.3390/f9060292>
- De Cauwer V, Beeckman H, Kleinn C, et al (2020) Improving the knowledge base for tropical dry forest management in southern Africa: Regional volume models for *Pterocarpus angolensis*. *For Ecol Manage* 477:118485. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118485>
- Dias Júnior AF, Pincelli ALMS, Câmara da Silva AP, et al (2021) Integrating species and successional classes for wood production in a mixed forest restoration system in a neotropical region. *J For Res (Harbin)* 32:2313–2321. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01297-w>
- IBÁ-Brazilian Tree Industry (2023) IBÁ annual report 2023. IBÁ, São Paulo
- INMET National Institute of Meteorology (2023). INMET Meteorological Database. <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Accessed 28 May 2023
- Lachenbruch B, McCulloh KA (2014) Traits, properties, and performance: How woody plants combine hydraulic and mechanical functions in a cell, tissue, or whole plant. *New Phytologist* 204:747–764. <https://doi.org/10.1111/nph.13035>

- Leão NVM, Sousa Felipe SH, Gallo R, Cordeiro Shimizu ES (2023) Genetic variability of *Tachigali vulgaris* trees based on seed morphophysiological traits. *South For* 85:185–193. <https://doi.org/10.2989/20702620.2023.2226335>
- Lima MDR, Moraes LG, Silva R de CC, et al (2023) *Tachigali vulgaris* energy forests: understanding spacing, age, and stem type effects on tree growth patterns and wood density. *New For (Dordr)* 54:491–513. <https://doi.org/10.1007/s11056-022-09932-y>
- Lima MDR, Simetti R, Assis MR de, et al (2020) Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. *Biomass Bioenergy* 142:105804. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105804>
- Love-Myers KR, Clark A, Schimleck LR, et al (2009) Specific gravity responses of slash and loblolly pine following mid-rotation fertilization. *For Ecol Manage* 257:2342–2349. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.03.031>
- Mada G, Anjulo A, Gelaw A (2022) Estimation of biomass and carbon sequestration capacity of the Surra mountain plantation forest in Gamo Highlands, Southern Ethiopia. *Food Energy Secur* 11:. <https://doi.org/10.1002/fes3.399>
- Massuque J, Sanchez JYSC, Loureiro BA, et al (2023) Evaluating the Potential of Non-commercial *Eucalyptus* spp. and *Corymbia* spp. for Bioenergy in Brazil. *Bioenergy Res* 16:1592–1603. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10502-5>
- Moraes LG, Lima MDR, Assis-Pereira G, et al (2023) Forking and planting spacing impacts on wood density, X-ray density, and heartwood proportion of *Tachigali vulgaris*. *Trees - Structure and Function* 37:1567–1581. <https://doi.org/10.1007/s00468-023-02443-z>
- Myint YY, Sasaki N, Datta A, Tsusaka TW (2021) Management of plantation forests for bioenergy generation, timber production, carbon emission reductions, and removals. *Cleaner Environmental Systems* 2:100029. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100029>
- Niklas KJ, Spatz HC (2010) Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. *Am J Bot* 97:1587–1594. <https://doi.org/10.3732/ajb.1000150>
- Orellana BBM, Do Vale AT, González J, et al (2018) Energetic density of *Tachigali vulgaris* wood by diametric class in two experimental plants in the Amazon. *Nativa* 6:773–781. <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i0.5130>
- Ortega Rodriguez DR, Tomazello-Filho M (2019) Clues to wood quality and production from analyzing ring width and density variabilities of fertilized *Pinus taeda* trees. *New For (Dordr)* 50:821–843. <https://doi.org/10.1007/s11056-018-09702-9>
- Pena-Vergara G, Castro LR, Gasparetto CA, Bizzo WA (2022) Energy from planted forest and its residues characterization in Brazil. *Energy* 239:122243. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122243>
- Protásio T de P, Roque Lima MD, Scatolino MV, et al (2021) Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. *Renew Energy* 164:34–45. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.057>
- Protásio T de P, Scatolino MV, de Araújo ACC, et al (2019) Assessing Proximate Composition, Extractive Concentration, and Lignin Quality to Determine Appropriate Parameters for Selection of Superior *Eucalyptus* Firewood. *Bioenergy Res* 12:626–641. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10004-x>
- R Development Core Team (2023) R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing v. 4. 2. 3
- Ramos LDO, Miranda ROV, Soares AA V, et al (2021) Wood volumetry of *Tachigali vulgaris* pure plantations in different planting spacings. *Floresta* 51:990–999. <https://doi.org/10.5380/rf.v51>
- Resquin F, Navarro-Cerrillo RM, Carrasco-Letelier L, Casnati CR (2019) Influence of contrasting stocking densities on the dynamics of above-ground biomass and wood density

- of *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii*, and *Eucalyptus grandis* for bioenergy in Uruguay. *For Ecol Manage* 438:63–74. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.007>
- Reyes G, Brown S, Chapman J, Lugo AE (1992) Wood densities of tropical tree species. General Technical Report SO-88. U.S. New Orleans, Louisiana, USA
- Sallenave P (1955) Propriétés physiques et mécaniques des bois tropicaux de l'union française. Centre technique forestier tropical, Nogent-sur-Marne, France
- Santos HG dos, Jacomine PKT, Anjos LHC, et al (2018) Sistema brasileiro de classificação de solos, 5º ed. rev. e ampl. Embrapa, Brasília, DF
- Santos EV, Lima MDR, Dantas K das GF, et al (2023) The Inorganic Composition of *Tachigali vulgaris* Wood: Implications for Bioenergy and Nutrient Balances of Planted Forests in the Amazonia. *Bioenergy Res* 17:114–128. <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10679-3>
- Silva MOS, Silva MG, Bufalino L, et al (2021) Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachi-branco trees planted at different spacings for bioenergy purposes. *J For Res (Harbin)* 32:211–224. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01068-8>
- Simpson WT (1993) Specific gravity, moisture content, and density relationship for wood. Technical report FPL, GTR-76. U.S. Madison, Wisconsin, USA
- Sindifer. Sindicato da indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais (2022). Pig iron production in Minas Gerais and Brazil. Statistical yearbook reference: 2021. Minas Gerais
- Soares AA V, Miranda RO V, Protásio TP, et al (2022) Crescimento e produção de florestas energéticas de *Tachigali vulgaris*. In: Reis CAF, Gonçalves DA, Protásio TP (eds) Anais do I Workshop Online Florestas de *Tachigali vulgaris*. Embrapa Florestas, Colombo, pp 145–158
- Teixeira RAC, Lima MDR, Silva AR, et al (2023) Dynamics of experimental plantations of *Tachigali vulgaris* in response to fertilization and soil texture. *New For (Dordr)*. <https://doi.org/10.1007/s11056-023-09999-1>
- Tomaselli I, Marques LCT, Carpanezzi AA, Pereira JCD (1983) Characterization of taxi-branco-da-terra-firme wood (*Sclerolobium paniculatum* Vogel) for energy. *Boletim de Pesquisa Florestal* 33–44
- Tomazello M, Brazolin S, Chagas MP, et al (2008) Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of Eucalyptus wood. *Ciencia y tecnología* 10:139–149
- Tonini H, Schwengber DR, Morales MM, De Oliveira JMF (2018) Growth and wood energy quality of *Tachigali vulgaris* in different spacing. *Pesqui Florest Bras* 38:1–8. <https://doi.org/10.4336/2018.pfb.38e201801569>
- Ucella-Filho JGM, Dias Júnior AF, de Souza EC, et al (2023) Clues about wood density and trace-element variability of *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby for bioenergy use. *Environmental Science and Pollution Research* 30:56161–56173. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26343-4>
- Van Den Berge S, Vangansbeke P, Baeten L, et al (2021) Biomass increment and carbon sequestration in hedgerow-grown trees. *Dendrochronologia (Verona)* 70:125894. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125894>
- Van Der Werff H (2008) A synopsis of the genus *Tachigali* (Leguminosae: Caesalpinioideae) in northern South America. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 95:618–660. <https://doi.org/10.3417/2007159>
- Vieilledent G, Fischer FJ, Chave J, et al (2018) New formula and conversion factor to compute basic wood density of tree species using a global wood technology database. *Am J Bot* 105:1653–1661. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1175>

7 CAPÍTULO 3

Caracterização dos anéis de crescimento e variação de perfis químicos em árvores de *Tachigali vulgaris*: efeitos da presença de fertilização e bifurcação em duas texturas do solo

Revista-alvo: *Holzforschung* (JCR = 2.2; Qualis Capes = A2)

Resumo

Este estudo buscou investigar os efeitos da adubação e bifurcação em duas diferentes texturas do solo nas características dos anéis de crescimento e variação dos elementos químicos na madeira de *T. vulgaris* a partir de técnicas não destrutivas. O estudo foi realizado no município de Almeirim (PA) em dois plantios experimentais com testes de adubação localizados em Latossolos Amarelos de textura franco-arenosa e muito argilosa. Foram avaliados dois tratamentos: sem adubação e com adubação (320 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 199 kg ha⁻¹ de K₂O). Foram avaliadas árvores bifurcadas e não bifurcadas que tiveram discos amostrados ao longo da altura do fuste. Técnicas de densitometria de raios X e fluorescência de raios X foram usadas para caracterizar os anéis de crescimento e perfis químicos da madeira de *T. vulgaris*, respectivamente. A espécie mostra potencial para estudos com anéis de crescimento, sendo possível avaliar o crescimento do plantio, desbaste, ciclo de corte, produtividade e qualidade da madeira. As maiores larguras dos anéis de crescimento ocorrem nos três primeiros anos. As árvores não bifurcadas apresentam maiores larguras dos anéis de crescimento em relação a árvores bifurcadas. A adubação apresentou efeito somente na largura dos anéis de crescimento para árvores em textura muito argilosa. Os elementos químicos identificados pela fluorescência de raios X foram: cálcio (Ca), enxofre (S) e silício (Si). Árvores bifurcadas apresentaram maior concentração de Ca, enquanto que árvores em solo argiloso apresentaram maior concentração de Si. Para o S não houve influência dos fatores testados. Padrões de distribuição desses elementos foram identificados ao longo do fuste das árvores de *T. vulgaris*. Os resultados obtidos nesse estudo podem auxiliar em tomadas de decisões para plantios futuros com a espécie, pois conhecer os níveis de concentração de elementos químicos ajuda no monitoramento de tratamentos silviculturais, sendo possível inferir na qualidade da madeira para fins energéticos.

Palavras-chave: florestas energéticas; técnicas não destrutivas; Amazônia; silvicultura

7.1 Introdução

A biomassa pode ser utilizada como uma fonte de energia renovável para reduzir a emissão de gases do efeito estufa (Santos et al. 2024) e pode ser proveniente de resíduos agrícolas e florestais, árvores inteiras e culturas energéticas (Rudra et al. 2014). O Brasil apresenta grande potencial para geração de energia a partir de biomassa. No ano de 2023, a repartição da oferta interna de energia mostra que 49,1% da matriz energética do país é composta por fontes de energia renováveis, em que, 8,6% é referente a lenha e carvão (Energy Research Office 2024).

O país está entre os maiores produtores e consumidores de carvão vegetal do mundo, sendo utilizado principalmente nas indústrias de aço e liga de ferro (Simetti et al. 2018). O principal gênero que compõe as chamadas florestas energéticas para a produção de carvão vegetal no Brasil é o *Eucalyptus* (Pena-Vergara et al. 2022). Quando se trata da Amazônia brasileira é notório que existe uma necessidade de biomassa sustentável que possa atender a demanda principalmente por carvão vegetal (Santos et al. 2024) uma vez que, na região, mais especificamente em Carajás, localizada entre estados do Pará e Maranhão, está o segundo maior polo siderúrgico do Brasil, responsável pela produção de 9,5% do ferro-gusa de 2021 (Sindifer 2022).

Com aproximadamente 9,94 milhões de hectares de florestas plantadas no Brasil, 76% (7,60 milhões de ha) é composto de espécies do gênero *Eucalyptus* (Ibá 2023). Todavia, ainda que exista uma grande extensão de área ocupada por florestas plantas (principalmente plantios de eucalipto) a distribuição é heterogênea no país, sendo incipientes na região norte (Ibá 2023). Além disso, as mudanças climáticas podem causar grandes impactos nos plantios de eucalipto, uma vez que, já foram verificados impacto negativo na produtividade do eucalipto com o aumento de temperatura e redução de precipitação (Booth 2013; Costa et al. 2020; Binkley et al. 2020; Elli et al. 2020).

Outro fator importante está relacionado ao desafio encontrado na região amazônica, de buscar por novas espécies para compor florestas energéticas que sejam adaptadas a região e que ao mesmo tempo apresentem alta produtividade e qualidade da madeira para bioenergia, visto que, os plantios energéticos com espécies exóticas na região são incipientes (Santos et al. 2024). Assim, novos estudos devem ser conduzidos para aumentar a quantidade de espécies na matriz energética renovável (Ucella-Filho et al. 2023). Dentre os pontos positivos para o uso de espécies nativas para plantios para fins energéticos podem ser destacados: a adaptabilidade ao ambiente, conservação da biodiversidade, redução da pressão sobre florestas nativas e

contribuição para mitigar os efeitos das mudanças climáticas (Calviño-Cancela et al. 2012; Orellana et al. 2018; Teixeira et al. 2023; Moraes et al. 2023).

Uma espécie tropical e nativa da Amazônia que ao longo dos anos vem demonstrando potencial para fins energéticos é o *Tachigali vulgaris* L.F Gomes da Silva & H.C Lima, pertencente à família Fabaceae e chamada popularmente de “tachi branco”, “cachamorra-branca”, “carvoeiro” ou “tachi-do-campo”. É uma espécie pioneira com capacidade de associação simbiótica com bactérias do gênero *Rizhobium* para a fixação de nitrogênio atmosférico, com uma ampla distribuição geográfica na América do Sul. No Brasil não existe ocorrência somente na região Sul (Carvalho 2005; Van Der Werff 2008; Silva et al. 2016; Santos et al. 2024).

Com o potencial de substituir o eucalipto em plantios energéticos na Amazônia e Cerrado (Farias et al. 2016) a espécie apresenta rápido crescimento, com taxas de incremento em diâmetro de 2,73 cm, em altura de 2,38 m e em volume de 24,42 m³ ha⁻¹, com densidade básica variando entre 0,486 a 0,597 g cm⁻³ (Lima et al. 2023; Moraes et al. 2023) aos 102 meses. Aos 84 meses a espécie apresentou densidade energética de 9151 MJ m⁻³, poder calorífico da madeira de 19,7 MJ kg⁻¹, com teores de material volátil, carbono fixo e cinzas de 78,54%, 21% e 0,49% respectivamente (Silva et al. 2021).

Ainda que ao longo dos anos estudos mostrem o potencial físico, químico e térmico da madeira de *T. vulgaris*. Outros estudos são importantes visando aspectos silviculturais (ex: adubação), características de solos (ex: textura) e aspectos morfológicos das plantas (ex: bifurcação) e suas relações com a qualidade do lenho e crescimento das árvores, para o seu uso mais eficiente. Entre esses estudos, são importantes aqueles que compreendam a exportação de nutrientes e o comportamento fisiológico das árvores em plantios energéticos de *T. vulgaris*. Além disso, o monitoramento dos plantios é importante por exemplo para avaliar a taxa de crescimento, sobrevivência e mortalidade. Geralmente, o monitoramento é realizado a partir de inventários florestais. Todavia, a avaliação anual pode ser difícil, como o ocorrido no estudo de Teixeira et al. (2023), que analisando variáveis dendrométricas ao longo de 10 anos no mesmo experimento do presente trabalho, tiveram problemas operacionais não havendo medições durante dois anos.

Dessa forma, metodologias que possam avaliar o comportamento dos elementos químicos e crescimento de plantios são importantes. Nessa ótica, pode ser destacado a dendrocronologia, uma linha de pesquisa que pode auxiliar na avaliação de como as variáveis ambientais afetam a qualidade da madeira, uma vez que fornece dados à escala temporal e uma resolução anual baseada nos anéis de crescimento (Bouriaud et al. 2015). A dendrocronologia

permite avaliar a taxa de incremento radial e identificar a tendência de crescimento de uma espécie (Albuquerque et al. 2019), sendo largura do anel o parâmetro mais utilizado na avaliação (Dobner et al. 2018).

Técnicas não destrutivas como a densitometria de raios X e fluorescência de raios X vem apresentando grande potencial na literatura e são técnicas de preparação simples, aquisição rápida, baixo custo e ambientalmente corretas (Hevia et al. 2018; Ucella-Filho et al. 2023; Roquette et al. 2023). A densitometria de raios X é uma técnica que permite avaliar a densidade da madeira com alta resolução e amplamente utilizada nos estudos de anéis de crescimento, principalmente em dendrocronologia, dendroclimatologia e ciência da madeira (Jacquin et al. 2017). Ainda, os perfis radiais de densidade permitem obter e analisar características como: largura do anel de crescimento, largura e densidade do lenho inicial e tardio, proporção entre lenho inicial e tardio, densidade mínima e máxima (Gonçalves et al. 2021; Ortega Rodriguez et al. 2022, 2023; Ercole et al. 2024; Papú et al. 2024).

Além disso, a avaliação temporal de flutuações químicas pode ajudar a compreender mudanças fisiológicas devido por exemplo a mudança de nutrientes, elementos tóxicos e isótopos estáveis no xilema (Roquette et al. 2023), sendo os elementos químicos da madeira um proxy de combinação entre processos fisiológicos e nutricionais (ver Hevia et al. 2018; Ortega Rodriguez et al. 2023). Vários estudos separadamente ou em conjuntos dessas técnicas vem se mostrando promissor para avaliar efeitos silviculturais, produtividade e qualidade da madeira em plantios de rápido crescimento (Ortega Rodriguez et al. 2018; Ortega Rodriguez and Tomazello-Filho 2019; Castro et al. 2020; Chambi-Legoas et al. 2021; Curvo et al. 2024). As duas técnicas já demonstraram o potencial para avaliar a qualidade da biomassa para fins energéticos (Ucella-Filho et al. 2023).

Até onde sabe-se, somente um estudo avaliou a técnica de densitometria de raios X na qualidade da madeira de *T. vulgaris*, avaliando o efeito dos espaçamentos e bifurcação aos 102 meses (Moraes et al. 2023). Entretanto, nenhum estudo reportado na literatura avaliou os impactos da adubação, da textura do solo e da bifurcação nos anéis de crescimento e variação de elementos químicos na madeira da espécie. Portanto, o presente estudo tem como objetivo compreender os efeitos da presença da adubação e bifurcação, em duas diferentes texturas do solo, nos anéis de crescimento e variação de elementos químicos na madeira de *T. vulgaris* utilizando técnicas não destrutivas em plantios homogêneos da Amazônia.

7.2 Materiais e métodos

7.2.1 Caracterização da área experimental

O estudo foi realizado no município de Almerim (Pará, Brasil) na empresa Jari Celulose S.A. em dois plantios homogêneos de *T. vulgaris* com cada uma das áreas apresentando aproximadamente 1,6 ha (Fig. 1a). Um dos plantios experimentais está localizado sobre Latossolo Amarelo de textura franco arenosa entre as coordenadas 0°47'17,13" S e 52°37'8,32" O e o outro sobre Latossolo Amarelo de textura muito argilosa entre as coordenadas 0°53'29,30" S e 52°29'15,09" O (Teixeira et al. 2023). O clima da região de acordo com a classificação de Köppen-Geiger é Am (Alvares et al. 2013). A média anual da área de estudo foi de 2146 mm (dados da área de estudo 2010-2021) com um breve período seco de agosto a novembro e temperaturas médias de 27.3 °C (Fig. 1b). Os dados de temperatura foram obtidos no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET 2023) na estação meteorológica localizada no município de Monte Alegre, Pará (cidade próxima a região de estudo) uma vez que não há dados disponíveis para o município do estudo.

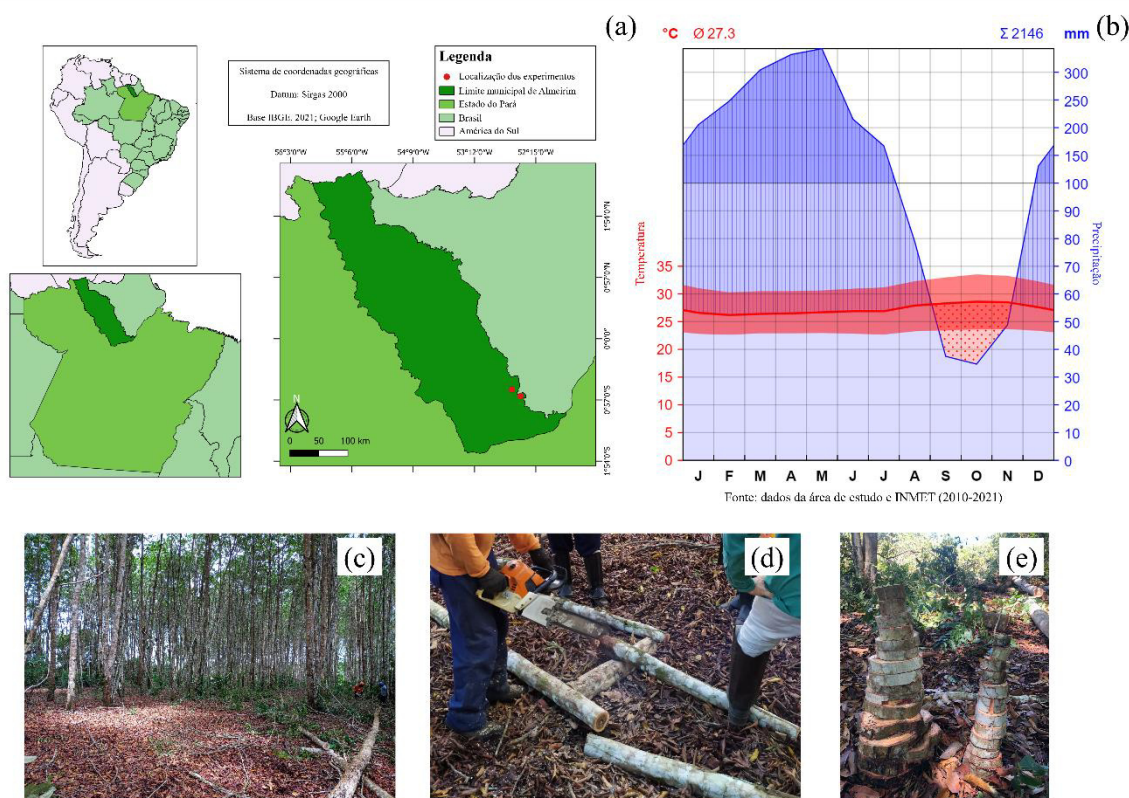


Fig. 1 Localização da área de estudo, Monte Dourado, distrito do município de Almerim, Pará, Brasil (a); climograma da área de estudo (b); plantio experimental de *T. vulgaris* do estudo (c); amostragem dos discos para análises com auxílio de motosserra (d); discos amostrados (e)

Os dois plantios foram instalados em 2010 e, antes de sua implantação, a área era ocupada com plantios de *Eucalyptus* sp. O espaçamento utilizado para as áreas foi de 3 m x 2 m, totalizando 1667 árvores ha⁻¹. Os plantios são de origem seminal com sementes provenientes dos municípios de Almeirim, Belterra, Santarém (Pará) e Macapá (Amapá).

Antes da implantação as áreas foram preparadas por meio de limpeza química manual com herbicida pós-emergente e correção da acidez do solo com aplicação de calcário (1500 kg ha⁻¹) 30 dias antes do plantio das mudas. Na Tabela 1 é apresentada a caracterização química e granulométrica do solo, antes da preparação e instalação dos experimentos (Teixeira et al. 2023).

Tabela 1 Caracterização química e granulométrica das duas áreas experimentais de *T. vulgaris* em Monte Dourado, município de Almeirim, Pará, Brasil

Texture	pH H ₂ O	MOS g kg ⁻¹	P mg dm ⁻³	Ca	Mg	K Cmolc dm ⁻³	Al	H	CTC	V %	m	areia	silte g kg ⁻¹	argila
0 a 10														
Muito argiloso	4.2	21.5	3.1	0.53	0.3	0.05	1.11	4.5	6.49	14	56	195	131	674
Franco arenoso	4.0	11.1	5.6	0.15	0.06	0.03	1.27	3.4	4.91	5	84	840	55	105
10 a 20														
Muito argiloso	4.1	14.8	1.9	0.36	0.17	0.02	1.11	3.9	5.56	10	67	158	108	734
Franco arenoso	4.1	10.5	5.9	0.14	0.06	0.02	1.27	3.5	4.99	4	85	856	11	133
20 a 40														
Muito argiloso	4.0	11.3	0.7	0.35	0.16	0.02	1.16	3.3	4.49	11	69	105	156	739
Franco arenoso	4.2	9.5	3.3	0.14	0.06	0.02	1.17	3.1	4.49	5	84	804	26	170

pH: potencial hidrogeniônico, MOS: matéria orgânica do solo, P: fósforo, K: potássio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, H: hidrogênio, Al: alumínio, CTC: capacidade de troca de cátions, V: saturação por bases, m: saturação por alumínio.

Fonte: Adaptado de Teixeira et al. (2023)

7.2.2 Desenho experimental

Os experimentos foram conduzidos com o objetivo de avaliar as respostas das árvores de *T. vulgaris* a adubação com fósforo (P) e potássio (K). Para isso, foram instalados em delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial, com quatro blocos, em que, cada

bloco contou com 12 tratamentos, constituídos por diferentes combinações de quatro doses de P e três doses de K, resultando em 48 parcelas para cada área experimental. Cada parcela possui dimensões de 12 m x 14 m (168 m²) composta por 4 linhas com 7 plantas (28 plantas/parcela). As seis árvores centrais de cada parcela foram consideradas parcelas permanentes e foram monitorados anualmente para realizar pesquisas sobre taxas de crescimento e mortalidade (ver Teixeira et al. 2023).

Como fonte de P foi utilizado o Superfosfato triplo (41% P₂O₅) e foi aplicado no fundo da cova durante o plantio. Para fonte de K foi utilizado o cloreto de potássio (58% K₂O), o qual foi aplicado parcelado (40% no 20º dia e 60% no 90º dia após o plantio). Como o *T. vulgaris* possui capacidade de associação simbiótica com bactérias fixadoras de nitrogênio, foi aplicado somente uma dose inicial de reforço de nitrogênio (N) com sulfato de amônio (21%) aos 20 dias após o plantio para todos os tratamentos. Para o presente estudo foram avaliados dois tratamentos: sem adubação (testemunha) e com adubação máxima (320 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 199 kg ha⁻¹ de K₂O). Mais informações sobre o experimento estão descritas em detalhes por Teixeira et al. (2023).

7.2.3 Amostragem e preparação da madeira de *Tachigali vulgaris*

Após 132 meses de plantio (agosto de 2021), de cada área experimental foram retiradas 16 árvores, totalizando 32 árvores, em que, 15 eram não bifurcadas (fuste único) e 17 árvores bifurcadas (presença de fuste secundário), as quais foram colhidas com o auxílio de motosserra (Fig. 1d). Foram amostrados discos de aproximadamente 2,5 cm de espessura ao longo da altura comercial, considerada até o diâmetro mínimo de 5 cm com casca nas posições relativas de 0%, DAP (diâmetro a altura do peito), 25%, 50%, 75% e 100% para árvores não bifurcadas. A mesma amostragem também foi aplicada para as árvores bifurcadas, tanto para os fustes principais quanto para os secundários, sendo realizada para essas árvores mais uma amostragem na base da bifurcação e uma no início do fuste principal. Informações sobre as árvores amostradas estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 Informações dendrométricas, porcentagem de bifurcação e de mortalidade das áreas experimentais de *T. vulgaris* avaliadas em Monte Dourado, distrito do município de Almeirim, Pará, Brasil

Textura	Adubação	VOLUME sem casca (m ³ /árvore)	HC (m)	HT (cm)	DAPEq (cm)	FF
Franco arenoso	Sem	0.332 (0.09)	21.76 (1.88)	24.93 (1.87)	18.70 (2.83)	0.47 (0.05)
	Com	0.242 (0.13)	19.56 (2.91)	23.61 (1.80)	15.80 (4.43)	0.49 (0.06)
Muito argiloso	Sem	0.241 (0.16)	17.52 (2.97)	21.26 (2.37)	16.55 (4.15)	0.46 (0.06)
	Com	0.219 (0.10)	17.56 (2.44)	20.80 (3.52)	16.38 (2.95)	0.47 (0.07)

HC: altura comercial, HT: altura total, DAPEq: diâmetro a altura do peito equivalente, FF: fator de forma. Média (desvio padrão)

Os discos amostrados inicialmente foram polidos com lixas de diferentes granulometrias (grão 80-600) e digitalizadas (1200 dpi, Epson Expression 12000 XL scanner) para melhor visualização dos anéis de crescimento. Posteriormente, foi realizada a caracterização macroscópica no plano transversal (medula-casca), seguindo o método proposto por Coradin and Muñiz (1992).

Posteriormente, para cada disco coletado nas diferentes posições longitudinais, foi retirado um raio da seção transversal com aproximadamente 1.0 cm de largura, 2.5 cm de espessura e comprimento igual ao raio do disco. Os raios foram cortados transversalmente usando a cortadora metalográfica de precisão ISOMET® 5000 Buehler com disco diamantado, após saturação para garantir espessura homogênea. Após o corte, as dimensões dos raios eram aproximadamente 1 cm de largura, 1 mm de espessura e comprimento igual ao raio do disco. As amostras foram então acondicionadas em uma climatizadora (20°C e 60% de umidade relativa) até atingirem umidade estável de 12% (Tomazello et al. 2008). Posteriormente, esses raios foram analisados utilizando densitometria de raios X e fluorescência de raios X (Fig. 2).

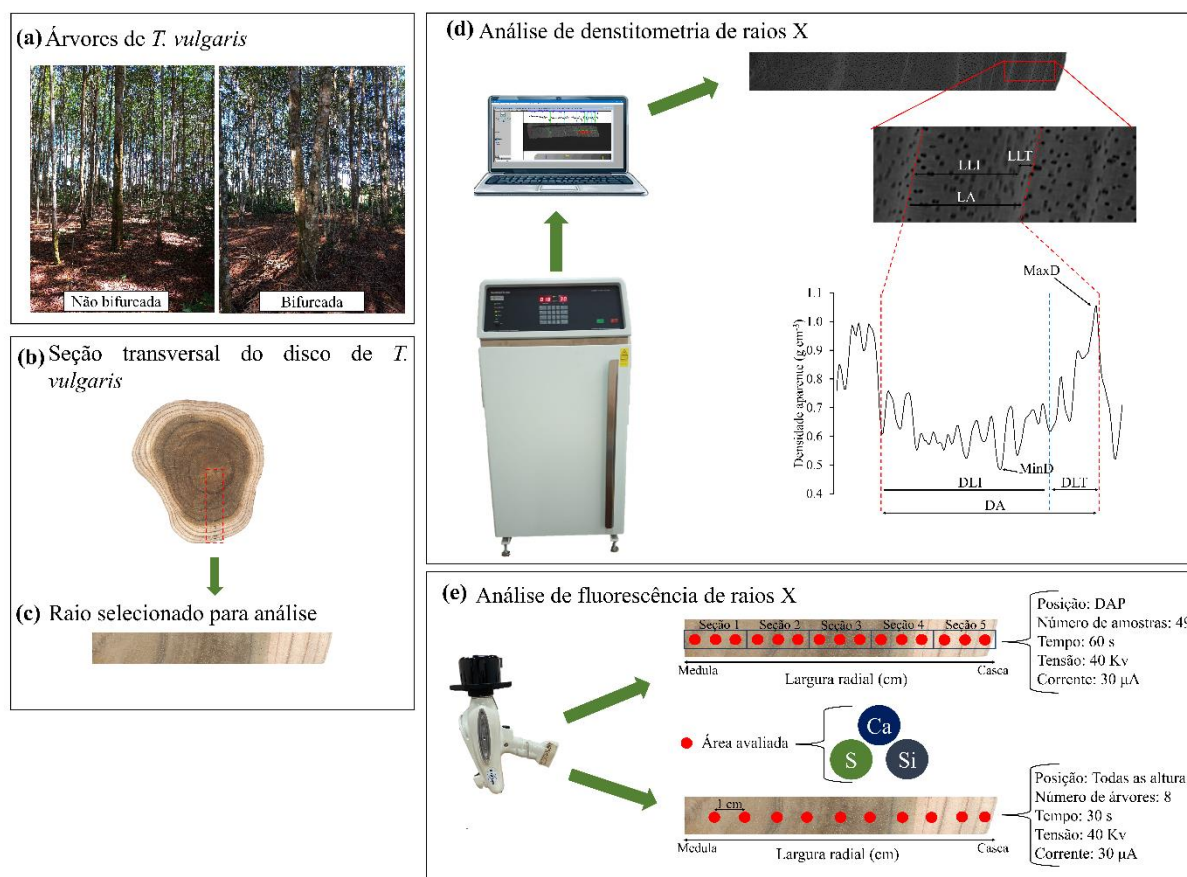


Fig. 2 Árvores não bifurcadas e bifurcadas de *T. vulgaris* de experimentos analisados no estudo (a), secção transversal de disco de *T. vulgaris* (o retângulo pontilhado representa o raio da secção transversal selecionado para análises) (b), esquema de análise de densitometria de raios X (d) e fluorescência de raios X (e)

7.2.4 Análise de densitometria de raios X

Os raios amostrados (todas as alturas das árvores) foram radiografados com uma escala de calibração de acetato de celulose utilizando um equipamento de raios X digital (Faxitron X-ray, model LX 60), configurado com 5 segundos de exposição e 30 kV de tensão. As imagens digitais geradas foram analisadas no software WinDendro™ (Regent Instruments Inc.) e foram obtidas as seguintes variáveis: largura do anel (LA), largura do lenho inicial (LLI), largura do lenho tardio (LLT), densidade do anel (DA), densidade do lenho inicial (DLI), densidade do lenho tardio (DLT), densidade mínima (MinD) e densidade máxima (MaxD). O limite do lenho inicial e tardio foi definido de forma visual com auxílio das amostras polidas e digitalizadas, e imagens digitais das radiografias junto aos perfis de densidade gerados no momento da mensuração no software WinDendro™ (Fig. 2d).

7.2.5 Análise de fluorescência de raios X

Foi realizada a leitura química na posição do DAP em seções correspondentes a 20% da largura total dos raios amostrados (total de 5 seções por raio avaliado) sendo mensurados 3 pontos equidistantes por seção, no sentido medula-casca das árvores (Fig. 2e), totalizando 49 raios (16 raios de árvores não bifurcadas e 32 raios de árvores bifurcadas – 16 do fuste principal e 16 do fuste secundário). As medidas foram realizadas utilizando um equipamento de fluorescência de raios X portátil (pXRF), modelo Tracer III-SD, BRUKER (BRUKER, EUA) equipado com tubo de raios X Rh de 4 W e detector de deriva de silício resfriado Peltier 10 mm 2 X-Flash®, com configuração de 40 kV de tensão e 30 μ A de corrente (Costa Junior et al. 2020), com exposição sob vácuo de 60 segundos. Os espectros avaliados foram normalizados pelo tempo vivo do detector (52 s) e avaliados em contagens de fótons por segundo (CPS) (Tavares et al., 2020). As linhas de emissões $K\alpha$ dos elementos cálcio (Ca), enxofre (S) e silício (Si) (Elementos detectados com confiabilidade) foram normalizadas pelo pico Compton e obtidas utilizando o software Artax® (Bruker AXS). Os resultados obtidos foram utilizados para obter a média por árvore e a variação elementar medula-casca.

Além disso, visando avaliar a distribuição dos elementos detectados (Ca, S e Si) ao longo do fuste (sentido base-topo), foram selecionadas 8 árvores representativas dos fatores avaliados (adubação, bifurcação e classe textural do solo). Para isso foi realizada leituras com o pXRF a cada 1 cm no sentido medula casca para todas as alturas das árvores selecionadas com configuração de 40 kV de tensão e 30 μ A de corrente e com exposição sob vácuo de 30 segundos (tempo vivo do detector: 26 segundos). A redução do tempo de exposição (60 s para 30 s) ocorreu, pois, foi verificado que os mesmos elementos foram detectados nos dois tempos de exposição, assim, optou-se por reduzir o tempo de trabalho do equipamento, visto que, foram muitos pontos amostrados.

Para descrever a variação dos elementos detectados foi adaptada a metodologia utilizada por Moraes et al. (2023) para descrever a variação da densidade da madeira em árvores de *T. vulgaris*. O conjunto de dados dos elementos químicos obtidos pelo pXRF foi interpolado para entender a distribuição dentro das árvores. Para isso, foi criado pares de coordenadas entre a concentração dos elementos químicos (CPS) e a distância radial para cada posição amostrada para manter a espacialidade dos dados. A interpolação de pontos foi realizada utilizando o software QGIS versão 3.28.2 (QGIS Development Team 2022) com a ferramenta Global Polynomial Interpolation. Foram criados perfis de variação dos elementos químicos (Ca, S e Si) para todas as árvores e posteriormente um perfil médio (média entre as árvores) para cada elemento.

7.2.6 Análise estatística

Inicialmente, para a caracterização da largura dos anéis de crescimento entre os anos (idade cambial) para todas as alturas foi utilizada estatística descritiva (média e desvio padrão).

Posteriormente, para avaliar se a idade, adubação, tipo de fuste e classe textural do solo influenciaram a largura dos anéis de crescimento, foram utilizados modelos lineares de efeitos mistos, devido à estrutura hierárquica dos dados. O delineamento utilizado foi em blocos casualizados. Para essa análise foram utilizados os valores de largura do anel da posição do DAP como variável dependente e idade, adubação, tipo de fuste e classe textural do solo foram considerados variáveis independentes (efeito fixo) e as árvores dentro dos blocos variáveis de efeito aleatório. A Eq. 1 mostra o modelo utilizado. Para expressar os resultados foram realizadas análises de regressão polinomial. Para as árvores bifurcadas, a largura dos anéis de crescimento representativa da árvore foi obtida pela média entre a largura do fuste principal e secundário para cada ano.

$$LA = Id + Tf + Adub + Ts + Adub \times Ts + bloco + Erro \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que: LA é a largura do anel de crescimento (cm), Id é a idade cambial, Tf é o tipo de fuste, Adub é a adubação, Ts é a textura do solo. O x representa a interação entre fatores

Para avaliar se a adubação, tipo de fuste e classe textural do solo influenciaram os elementos químicos (Ca, S e Si) também foi utilizado o delineamento em blocos casualizados e modelos lineares de efeitos mistos. O valor médio dos elementos químicos por árvore foi a variável dependente e as variáveis independentes e consideradas de efeito fixo foram: adubação, tipo de fuste e classe textural do solo, sendo consideradas como efeito aleatório as árvores dentro dos blocos. Quando o modelo completo (Eq. 2) apresentava variáveis independentes não significativas ($p > 0.05$), essa variável era retirada e o modelo era reavaliado e esse processo continuava até restar somente as variáveis independentes significativas ($p < 0.05$), ou seja, que influenciaram significativamente os elementos químicos.

$$EQ = Tf + Adub + Ts + Adub \times Ts + bloco + Erro \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que: EQ é o elemento químico (CPS), Tf é o tipo de fuste, Adub é a adubação, Ts é a textura do solo. O x representa a interação entre fatores

Além disso, foi realizada uma análise fatorial usando o delineamento em blocos casualizados, entre cada fator do experimento (adubação, tipo de fuste e classe textural do solo) e as posições amostradas ao longo dos raios (%) para avaliar a existência de interação e se

afetam a variação dos elementos químicos. O teste de Shapiro-Wilk e o teste de Bartlett foram realizados para avaliar a normalidade dos resíduos e a homogeneidade das variâncias a 5% de significância. Quando necessário, os dados foram transformados utilizando a metodologia de Box e Cox (1964) para satisfazer esses pressupostos. Não houve efeito significativo entre a interação ($p > 0.05$), todavia a análise de variância (ANOVA) pelo teste F mostrou que as posições influenciam significativamente a contagem dos elementos químicos ($p < 0.05$). Dessa forma, foi aplicada análise de regressão para verificar tendências dos elementos em função da posição do raio (medula-casca). Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software estatístico R versão 4.2.3 (R Development Core Team 2023).

7.3 Resultados

7.3.1 Caracterização anatômica e dos anéis de crescimento de árvores de *T. vulgaris*

Os anéis de crescimento são distintos, individualizados por zonas fibrosas (fibras de paredes espessas e achatadas do lenho tardio) mais escuras e visíveis a olho nu (Fig. 3). As camadas de crescimento apresentaram tendência de redução da largura no sentido medula-casca. Sua madeira apresenta porosidade difusa; agrupamento de poros solitários, geminados e múltiplos; arranjo tangencial e diagonal; com contorno circular a oval. O tamanho dos poros vai aumentando no sentido medula-casca. A distribuição dos poros por mm^2 vai diminuindo conforme a árvore vai crescendo, ou seja, na região da medula e cerne é maior que no alburno. O parênquima axial é pouco abundante, do tipo paratraqueal vasicêntrico. A espécie apresentou raios finos e numerosos. A demarcação do limite dos anéis de crescimento permitiu a contagem, comprovando a sua anuidade, pois a quantidade de anéis de crescimento na base das árvores correspondia a idade dos plantios (11 anos, Fig. 3).

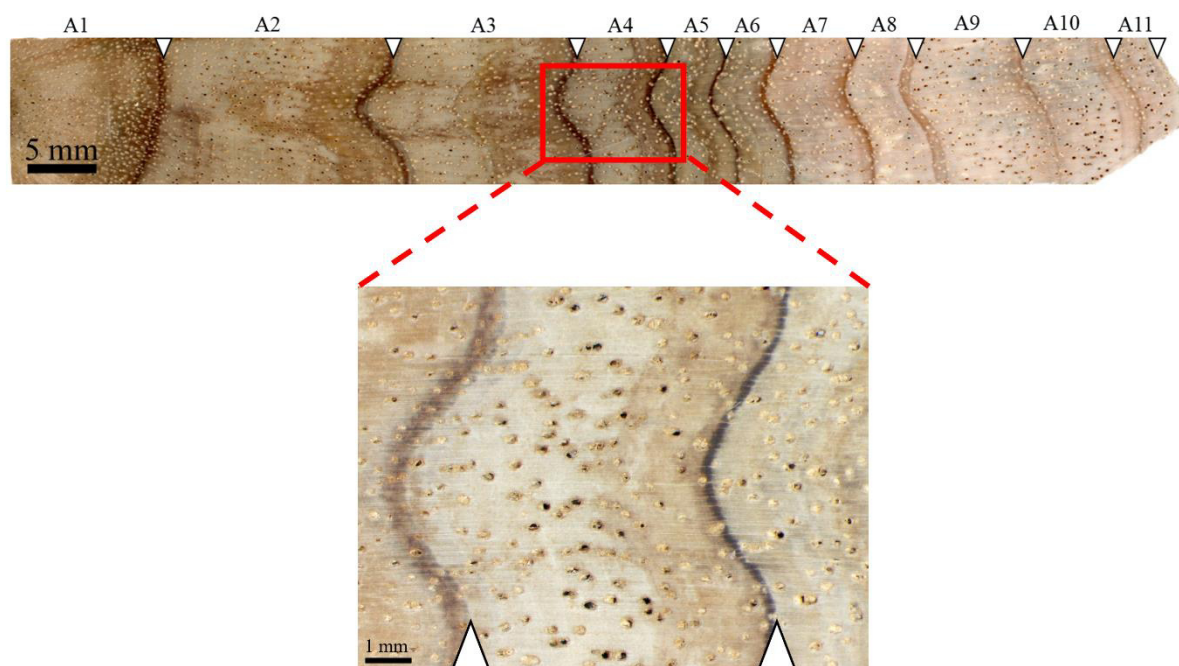


Fig. 3 Seção transversal da madeira de *T. vulgaris* com anéis anuais bem demarcados delimitados por fibras de paredes espessas e achatadas do lenho tardio (setas brancas).

A: Anel de crescimento

O valor médio da largura dos anéis de crescimento para diferentes alturas de 32 árvores avaliadas pode ser observado na Fig. 4. Para a altura da base em geral todos os discos apresentaram 11 anos (correspondendo a idade de plantio), com exceção de duas árvores que só foram possíveis identificar 7 anéis de crescimento em uma das árvores e 9 anéis de crescimento na outra, não sendo incluídos na média da largura dos anéis nessa posição. Para as demais posições foram encontrados entre 7 a 11 anéis, entre 6 a 10 anéis, entre 5 a 9 anéis, entre 4 a 8 anéis e entre 2 a 6 anéis para as posições do DAP, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial, respectivamente.

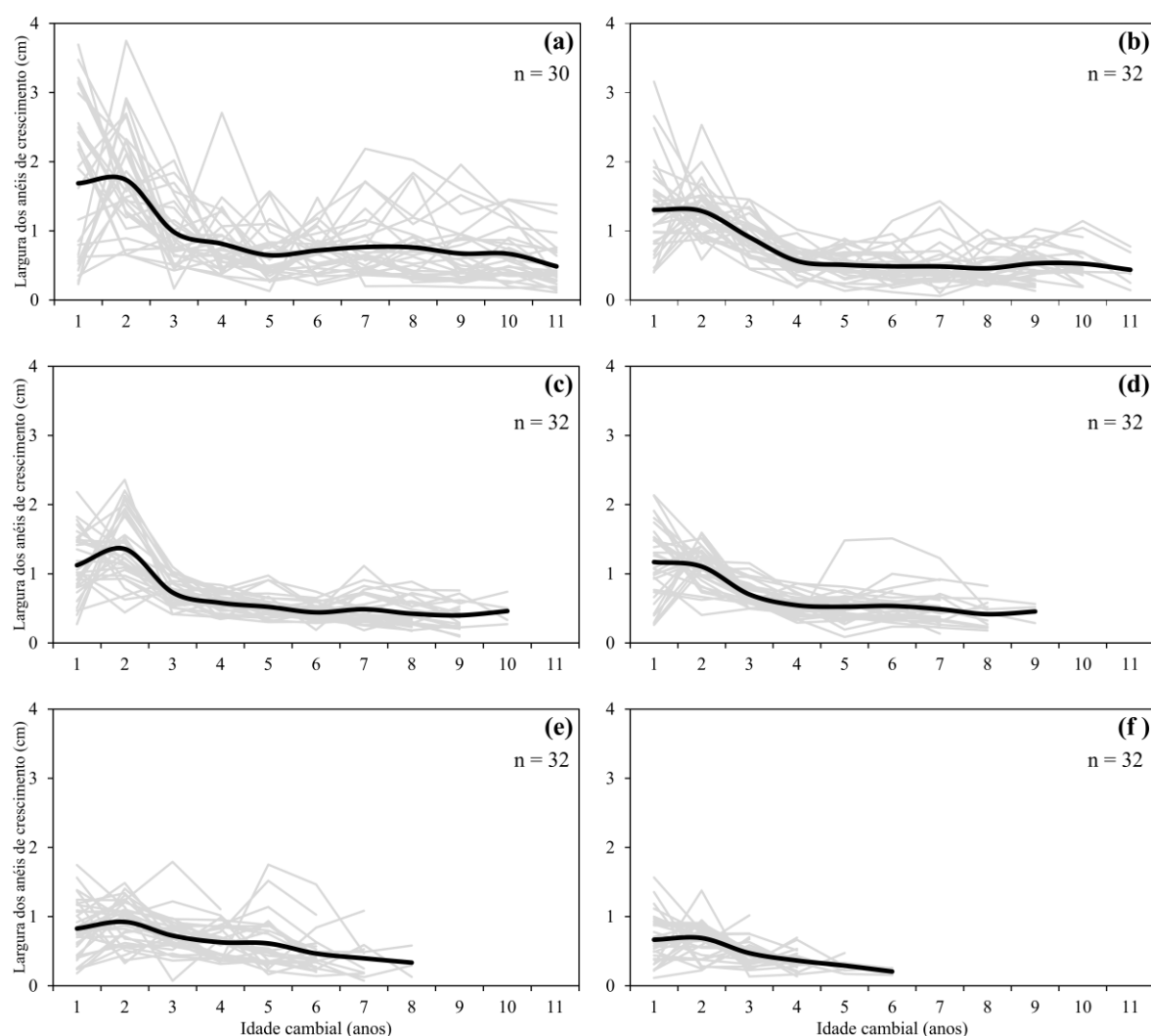


Fig. 4 Largura dos anéis de crescimento das árvores de *T. vulgaris* por idade cambial para as posições amostradas da base (a), DAP (b), 25% da altura comercial (c), 50% da altura comercial (d), 75% da altura comercial (e) e 100% da altura comercial (f). As linhas cinzas representam a largura dos anéis de crescimento das árvores analisadas e as linhas pretas representam a largura média. n é o número de árvores avaliadas por altura

De maneira geral, para todas as alturas os quatro primeiros anéis de crescimento mais próximos da medula apresentam maiores larguras. A partir do quinto ano para as posições da Base (Fig. 4a), DAP (Fig. 4b), 25% da altura comercial (Fig. 4c) e 50% da altura comercial (Fig. 4d) apresentaram variação na largura dos anéis de crescimento. Já para as posições mais altas (75% e 100%) a tendência foi de redução da largura até o último anel de crescimento.

Observou-se que houve redução na largura dos anéis de crescimento ao longo do fuste (base-topo), principalmente nos primeiros anos cambiais, em que a base apresentou o maior valor médio de 1,74 cm (min.: 0,11 cm; máx.: 3,75 cm) enquanto na última altura avaliada apresentou o maior valor médio de 0,69 cm (min.: 0,11 cm; máx.: 1,57 cm).

Em geral, a largura do lenho inicial seguiu a tendência da largura total em que os maiores valores seguiram até o 4º ano, após isso, seguiu uma oscilação do quinto ao último ano para as alturas da base, DAP, 25% e 50%; uma tendência de redução até o último ano ocorreu para as posições de 75% e 100%. Já a largura do lenho tardio não apresentou nenhuma tendência da base até a posição de 75%, somente os 100% apresentou uma tendência média de redução do primeiro ao último ano (Tabela 3). Em geral, tendências de aumento na porcentagem de lenho tardio foram aumentando ao longo dos anos para as posições da base, 25% e 75%. Para as demais alturas não foram observadas essas tendências (Fig. 5).

Tabela 3 Largura do lenho inicial e tardio para diferentes posições amostradas ao longo do fuste

Altura relativa	Idade cambial (anos)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Largura do lenho inicial (cm)											
Base	1.58	1.61	0.90	0.77	0.59	0.62	0.67	0.65	0.56	0.56	0.41
	(1.11)	(0.75)	(0.52)	(0.50)	(0.36)	(0.30)	(0.45)	(0.44)	(0.39)	(0.35)	(0.30)
DAP	1.22	1.23	0.85	0.51	0.45	0.42	0.40	0.37	0.45	0.46	0.38
	(0.66)	(0.39)	(0.26)	(0.20)	(0.19)	(0.22)	(0.26)	(0.19)	(0.21)	(0.23)	(0.21)
25%	1.05	1.31	0.68	0.53	0.45	0.37	0.42	0.37	0.35	0.37	-
	(0.47)	(0.48)	(0.19)	(0.15)	(0.18)	(0.11)	(0.22)	(0.18)	(0.18)	(0.22)	-
50%	1.11	1.05	0.64	0.48	0.46	0.46	0.43	0.36	0.41	-	-
	(0.54)	(0.28)	(0.19)	(0.15)	(0.23)	(0.23)	(0.24)	(0.18)	(0.15)	-	-
75%	0.77	0.85	0.64	0.55	0.56	0.40	0.34	0.27	-	-	-
	(0.40)	(0.31)	(0.27)	(0.21)	(0.38)	(0.29)	(0.28)	(0.17)	-	-	-
100%	0.57	0.60	0.39	0.30	0.24	0.16	-	-	-	-	-
	(0.33)	(0.28)	(0.17)	(0.15)	(0.08)	(0.04)	-	-	-	-	-
Largura do lenho tardio (cm)											
Base	0.11	0.09	0.09	0.07	0.07	0.09	0.09	0.11	0.10	0.11	0.08
	(0.08)	(0.05)	(0.05)	(0.03)	(0.04)	(0.05)	(0.06)	(0.09)	(0.10)	(0.08)	(0.06)
DAP	0.09	0.06	0.06	0.05	0.05	0.07	0.09	0.09	0.08	0.07	0.06
	(0.05)	(0.02)	(0.03)	(0.02)	(0.03)	(0.05)	(0.08)	(0.07)	(0.06)	(0.05)	(0.04)
25%	0.08	0.05	0.05	0.05	0.07	0.08	0.07	0.06	0.05	0.10	-
	(0.04)	(0.02)	(0.02)	(0.04)	(0.06)	(0.06)	(0.04)	(0.03)	(0.04)	(0.04)	-
50%	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.05	0.05	-	-
	(0.03)	(0.05)	(0.05)	(0.04)	(0.04)	(0.04)	(0.04)	(0.03)	(0.00)	-	-
75%	0.06	0.07	0.08	0.08	0.05	0.06	0.06	0.06	-	-	-
	(0.04)	(0.04)	(0.06)	(0.06)	(0.03)	(0.04)	(0.05)	(0.07)	-	-	-
100%	0.10	0.09	0.08	0.06	0.05	0.04	-	-	-	-	-
	(0.10)	(0.06)	(0.06)	(0.03)	(0.03)	(0.03)	-	-	-	-	-

DAP: Diâmetro a altura do peito. Média (desvio padrão)

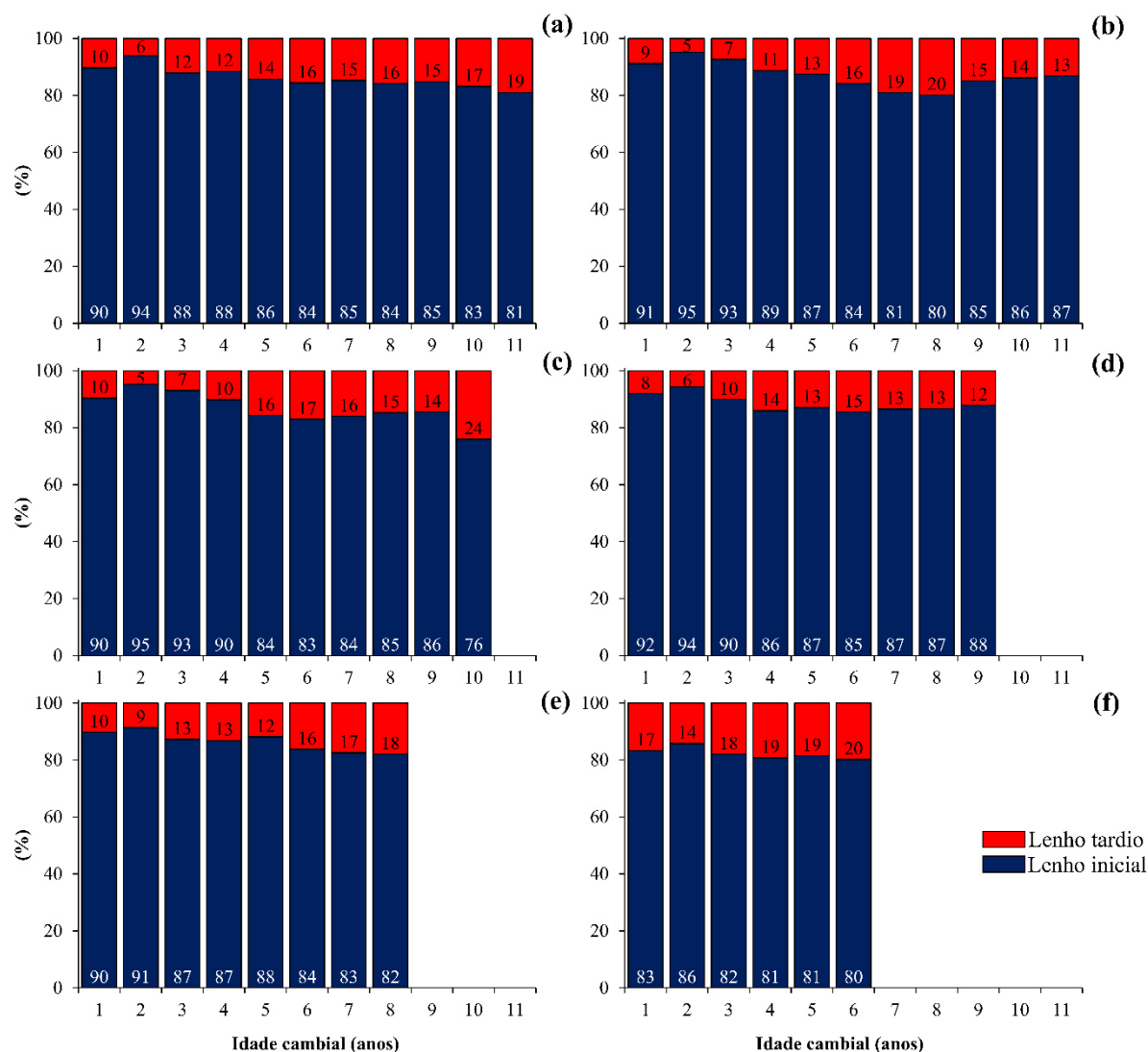


Fig. 5 Proporção entre lenho inicial e lenho tardio por idade cambial para as posições amostradas da base (a), DAP (b), 25% da altura comercial (c), 50% da altura comercial (d), 75% da altura comercial (e) e 100% da altura comercial (f)

Os modelos lineares de efeitos mistos mostraram que para a largura dos anéis de crescimento na posição do DAP foi influenciada pelas variáveis preditoras analisadas (Tabela 4). Para a idade, é possível observar que o crescimento das árvores é significativamente maior até o terceiro ano ($p = 0.0000$), posteriormente a essa idade o crescimento da árvore em geral torna-se estável. Além disso, o tipo de fuste também influencia a largura dos anéis de crescimento ($p = 0.0006$), em que, árvores não bifurcadas apresentaram maiores larguras médias para todos os anos em relação as árvores bifurcadas (Fig. 6a). Ainda, a análise estatística realizada mostrou que existe a influência dos fatores adubação e textura do solo, assim como a interação entre esses fatores ($p = 0.0005$) (Tabela 4) em que árvores sem adubação em solos arenosos, em geral, foram as que apresentaram maiores larguras ao longo dos anos, enquanto

que as árvores sem adubação em solo argiloso apresentaram os menores valores para a maioria dos anos (Fig. 6b).

Tabela 4 Análise dos preditores que influenciam a largura dos anéis de crescimento por meio de modelos lineares de efeitos mistos

Fonte de variação		Largura do anel de crescimento (cm)	
		t-valor	p-valor
Idade cambial (anos)	1	6.314292	0.0000*
	2	6.606817	0.0000*
	3	4.439066	0.0000*
	4	1.77209	0.0774 ^{ns}
	5	1.219019	0.2238 ^{ns}
	6	0.942295	0.3468 ^{ns}
	7	0.730482	0.4657 ^{ns}
	8	0.667527	0.505 ^{ns}
	9	1.291351	0.1976 ^{ns}
	10	1.110666	0.2676 ^{ns}
	11	-2.340579	0.3054 ^{ns}
Tipo de fuste		3.458701	0.0006*
Adubação		3.844147	0.0001*
Textura do solo		2.59954	0.0407*
Adubação x textura do solo		-3.53318	0.0005*

Tipo de fuste: presença ou ausência de bifurcação, Adubação: presença ou ausência de adubação, Textura do solo: franco arenoso e muito argiloso, *: significativo a 5% de significância, ns: não significativo a 5% de significância

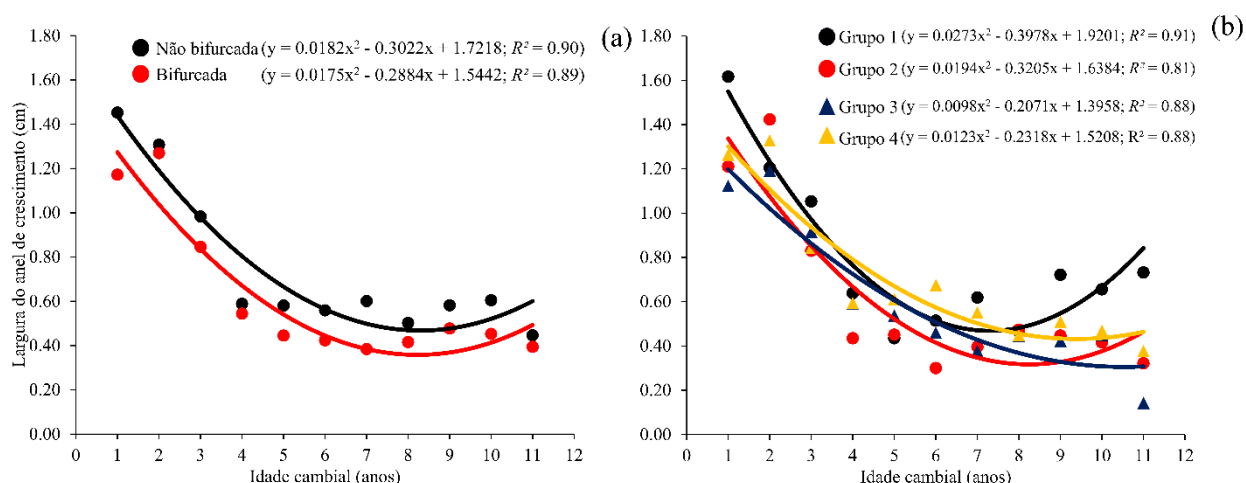


Fig. 6 Largura dos anéis de crescimento em função das variáveis predictoras: tipo de fuste (a), adubação e textura do solo (b)

grupo 1: árvores em solo franco arenoso + sem adubação, grupo 2: árvores em solo franco arenoso + com adubação, grupo 3: árvores em solo muito argiloso + sem adubação, grupo 4: árvores em solo muito argiloso + com adubação

7.3.2 Quantificação e distribuição de elementos químicos

Os modelos lineares de efeitos mistos mostraram que para os elementos químicos avaliados na região do DAP, houve respostas diferentes de acordo com as variáveis preditoras avaliadas (Tabela 5). Para cálcio (Ca), a variável preditora que apresentou influência na sua concentração média no lenho das árvores de *T. vulgaris* foi o tipo de fuste ($p = 0.0365$). Para o enxofre (S), nenhum preditor influenciou na concentração média no lenho das árvores ($p > 0.05$), enquanto que as concentrações de silício (Si) foram influenciadas pela textura do solo ($p = 0.002$). Ainda, a partir da análise realizada, verificamos que a presença da adubação não influenciou na concentração de nenhum dos elementos químicos.

Tabela 5 Análise dos preditores que influenciam os elementos químicos (Ca, S, Si) através de modelos lineares de efeitos mistos

Fonte de variação	elementos químicos (CPS)					
	Ca		S		Si	
	t-valor	p-valor	t-valor	p-valor	t-valor	p-valor
Tipo de fuste	-2.2203	0.0365*	-1.06987	0.2968 ^{ns}	1.533469	0.1401 ^{ns}
Adubação	-1.36341	0.1872 ^{ns}	1.56055	0.1336 ^{ns}	-0.90682	0.3748 ^{ns}
Textura do solo	0.664259	0.5312 ^{ns}	-0.03788	0.971 ^{ns}	3.891095	0.002*
Adubação x Textura do solo	0.263479	0.7947 ^{ns}	-0.60393	0.5524 ^{ns}	-0.06649	0.9476 ^{ns}

Tipo de fuste: presença ou ausência de bifurcação, Adubação: presença ou ausência de adubação, Textura do solo: franco arenoso e muito argiloso, *: significativo a 5% de significância, ns: não significativo a 5% de significância

Foi observado que as concentrações de Ca foram maiores em árvores que apresentaram bifurcação (Fig. 7a). A relação entre concentração de Ca e posição radial (medula-casca) foi significativa ($p < 0.05$) em que houve maior concentração do elemento próximo da medula, seguida de uma redução ao longo das seções transversais, voltando a aumentar próximo da casca (Fig. 7d).

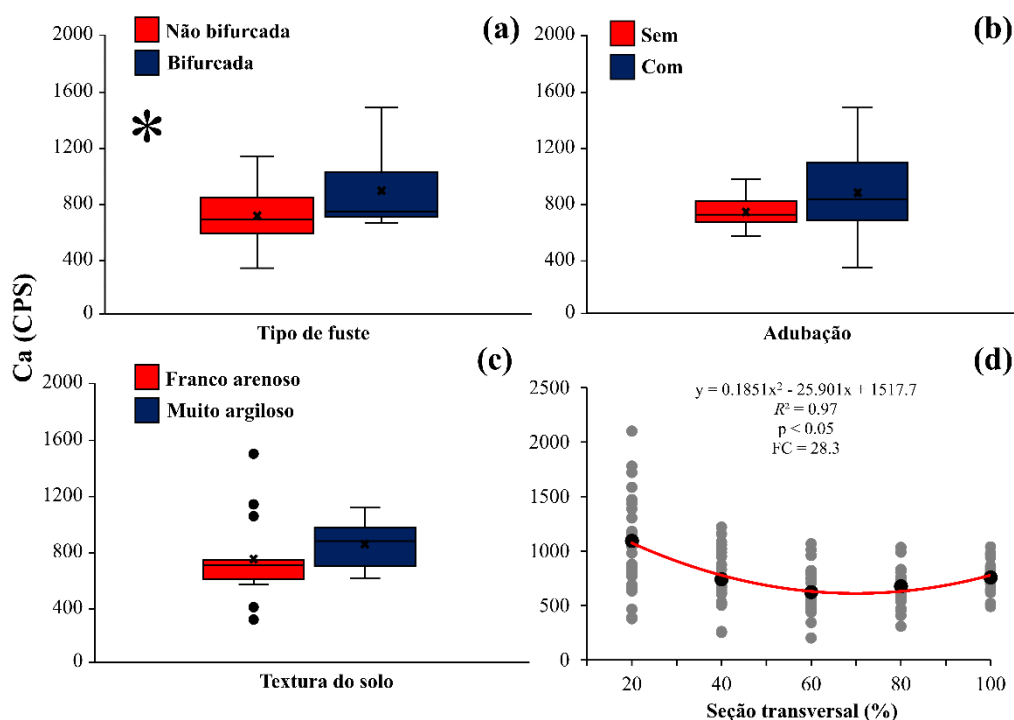


Fig. 7 Concentração média de cálcio (Ca) em função das variáveis preditoras avaliadas (a, b e c) e concentração da seção radial (medula-casca) (d) mensuradas na posição do DAP em árvores de *T. vulgaris*. CPS = contagens por segundo (60 s)

A distribuição de Ca no sentido longitudinal (base-topo), em média apresentou uma tendência de aumento com o aumento em altura, sendo mais pronunciado em árvores não bifurcadas e o fuste secundário de árvores bifurcadas, como observado na Fig. 8, havendo árvores que apresentaram uma tendência de redução no topo do fuste (Figs. B1, B2). Ainda que o perfil médio de variação radial e longitudinal de distribuição de Ca (Fig. 8) mostre algumas tendências iguais de distribuição entre as árvores avaliadas, como por exemplo maiores concentrações próximo a medula e em maiores alturas, foi observado que pode haver particularidades em como cada indivíduo demanda o nutriente no fuste, podendo apresentar variações entre as árvores, principalmente nos fustes principais das árvores bifurcadas (Fig. B2).

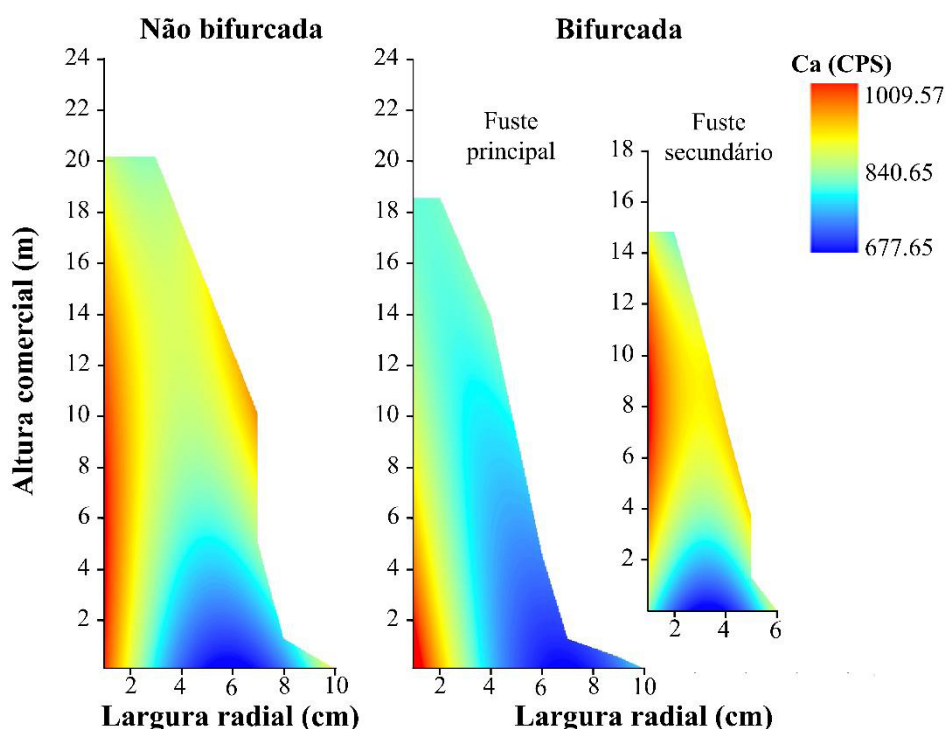


Fig. 8 Perfil de variação longitudinal e radial média de cálcio (Ca) em árvores não bifurcadas e bifurcadas de *T. vulgaris*. CPS = contagens por segundo (30 s)

As concentrações médias de S foram aproximadas (entre 15 a 20 CPS) independentes da variável preditora avaliada (Figs. 9a-9c). A relação entre concentração e posição radial também foi significativa ($p < 0.05$) em que as regiões próximas à medula e casca apresentaram as maiores médias (Fig. 9d). A distribuição média de S seguiu uma tendência de maiores valores nas regiões próximas a medula e casca, em geral com maiores concentrações a partir dos 4 metros de altura (Fig. 10). Ainda que os mapas de variação média consigam expressar a tendência de concentração média da árvore, assim como ocorreu com o Ca, alguns indivíduos apresentaram particularidades na sua forma de distribuição, por exemplo, houve aqueles indivíduos que tiveram maiores contagens de S nos primeiros metros e próximos da medula (Figs. B3, B4).

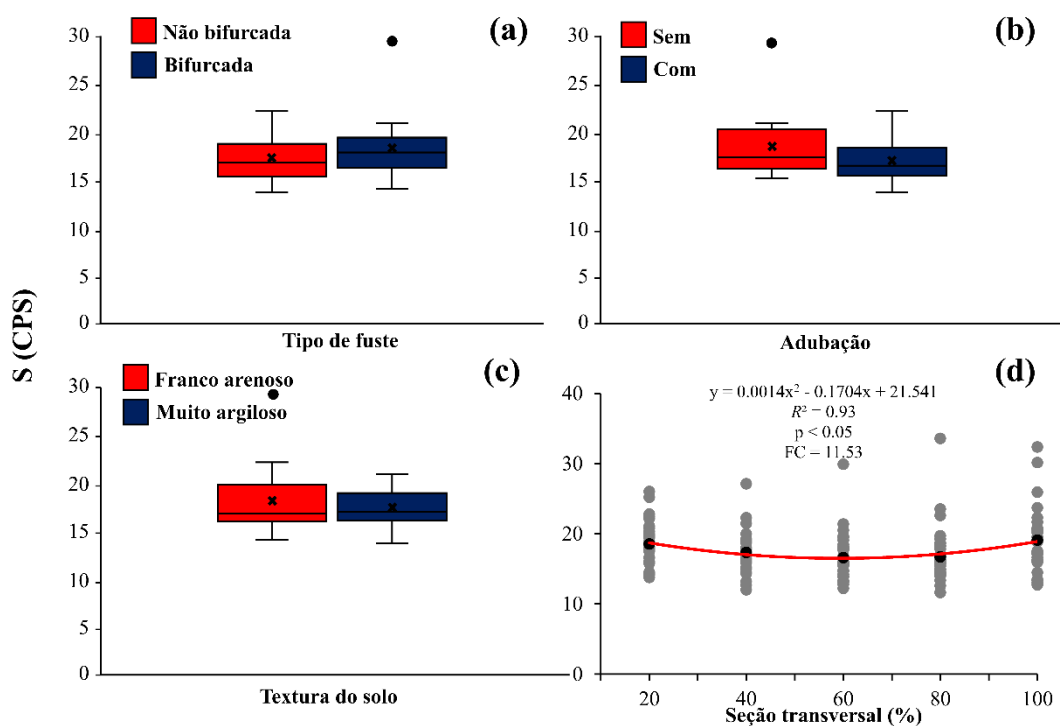


Fig. 9 Concentração média de enxofre (S) em função das variáveis predictoras avaliadas (a, b e c) e concentração da seção radial (medula-casca) (d) mensuradas na posição do DAP em árvores de *T. vulgaris*. CPS = contagens por segundo (60 s)

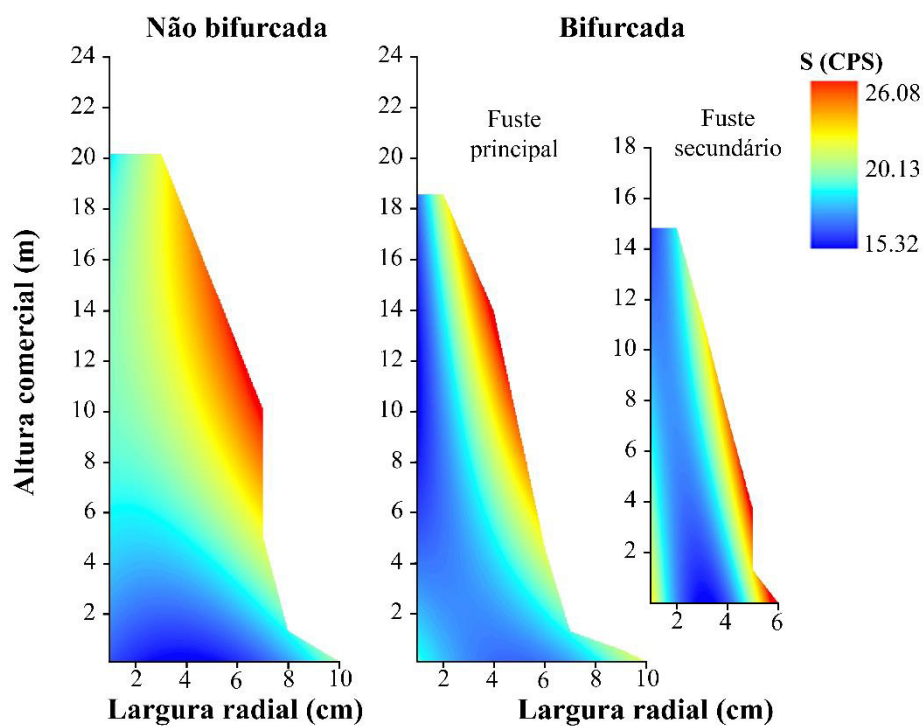


Fig. 10 Perfil de variação longitudinal e radial média de enxofre (S) em árvores não bifurcadas e bifurcadas de *T. vulgaris*. CPS = contagens por segundo (30 s)

Para concentrações de Si, os maiores valores foram encontrados em árvores presentes em solos argilosos (Fig. 11c). Concentrações não significativamente maiores de Si foram encontradas em árvores não bifurcadas (Fig. 11a). A concentração de Si foi significativa ($p < 0.05$) em relação à posição radial com tendência de aumento no sentido medula-casca (Fig. 11d). Os perfis de variação radial e longitudinal mostrou em geral redução da contagem de Si com o aumento em altura com um leve aumento no topo e tendências de aumento no sentido medula-casca foram observadas, principalmente em árvores bifurcadas (Figs. 12, B5, B6).

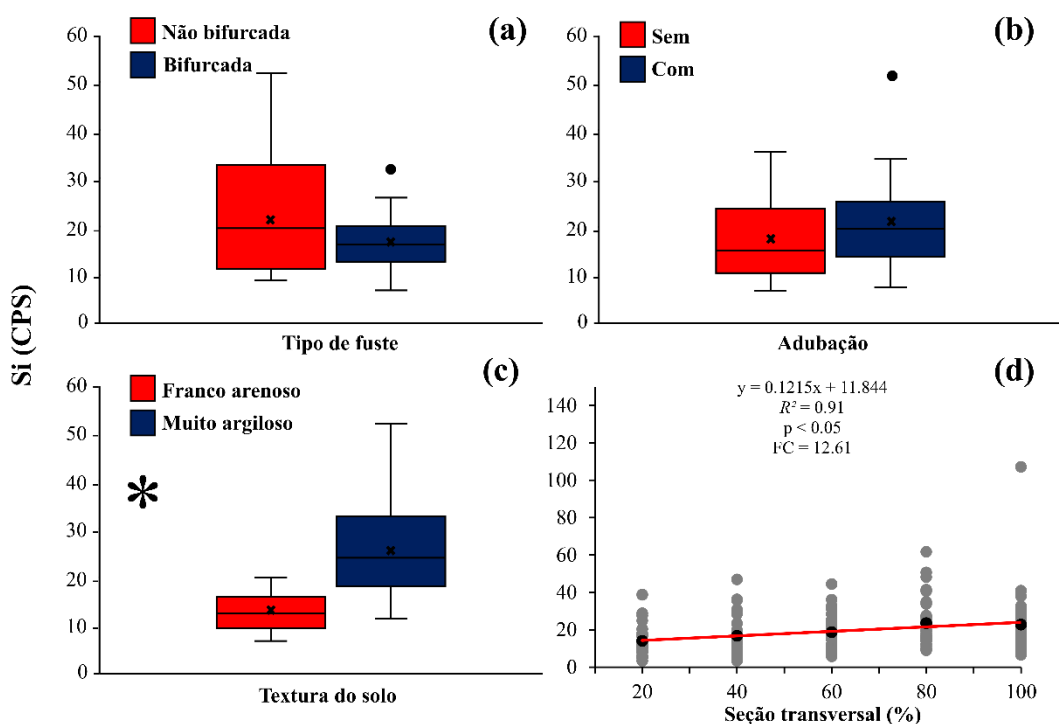


Fig. 11 Concentração média de silício (Si) em função das variáveis predictoras avaliadas (a, b e c) e concentração da seção radial (medula-casca) (d) mensuradas na posição do DAP em árvores de *T. vulgaris*. CPS = contagens por segundo (60 s).

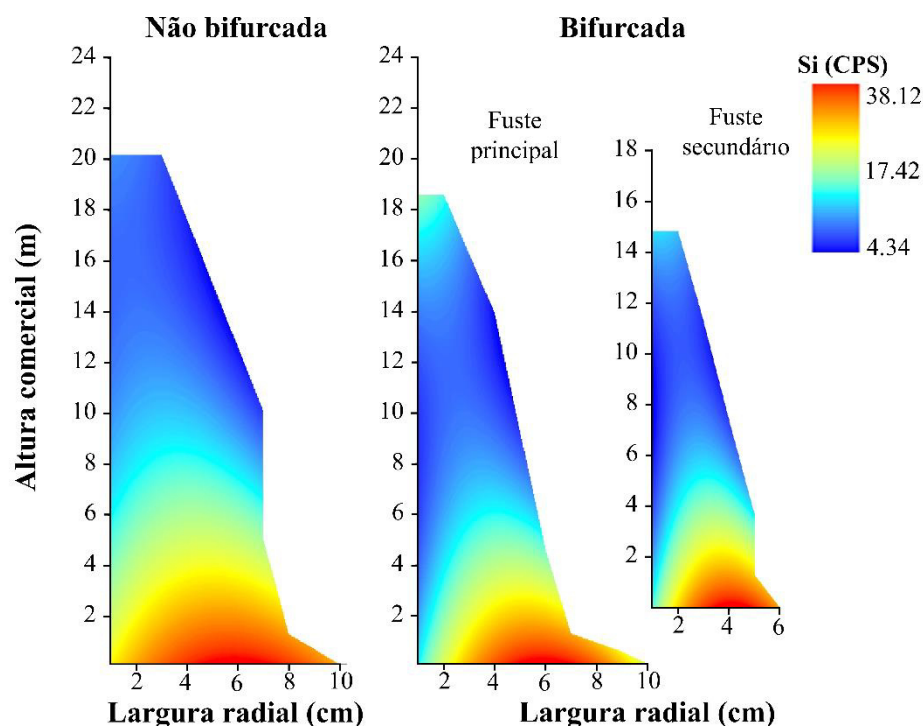


Fig. 12 Perfil de variação longitudinal e radial média de silício (Si) em árvores não bifurcadas e bifurcadas de *T. vulgaris*. CPS = contagens por segundo (30 s)

7.4 Discussão

7.4.1 Caracterização anatômica e dos anéis de crescimento de árvores de *T. vulgaris*

A descrição anatômica realizada é consistente com o descrito para a espécie na literatura (Macedo et al. 2014). Em geral, os anéis de crescimento do gênero *Tachigali* são caracterizados por apresentar anéis distintos (algumas espécies podem apresentar anéis indistintos) demarcados no lenho tardio por fibras de paredes espessas e achatadas (Macedo et al. 2014; Portal-Cahuana et al. 2023). Pode-se supor que as características anatômicas do lenho tardio (“zonas fibrosas”) de espécies do gênero podem estar relacionadas a períodos de menor crescimento, provavelmente a estação seca, como observado por Brien et al. (2005) para *T. vasquezii*.

A redução na largura dos anéis de crescimento ao longo do fuste (base-topo) está relacionada a conicidade acentuada das árvores de *T. vulgaris* (fator de forma médio = 0,47), ocasionando a redução do diâmetro com o aumento da altura (Nicoletti et al. 2016). Para muitas espécies tropicais o afilamento do fuste no sentido base-topo pode ser bastante irregular (Nunes and Görgens 2016) como observado para as árvores avaliadas.

A anualidade dos anéis de crescimento distintos pode ser influenciada por características anatômicas, fisiológicas e fatores externos como a sazonalidade das chuvas (Brien et al. 2016). Na região de estudo, existe um período seco entre agosto e novembro (Fig. 1b) que pode

contribuir na formação de crescimento em geral bem demarcados para as árvores de *T. vulgaris* (Moraes et al. 2023).

A redução na largura dos anéis de crescimento no sentido medula-casca, mostra que o maior período de crescimento das árvores ocorreu nos 4 primeiros anos, o que é característico de espécies pioneiras de rápido crescimento, principalmente em regiões tropicais (Olmedo et al. 2023). Espécies de rápido crescimento do gênero *Pinus* (Ortega Rodriguez and Tomazello-Filho 2019; Olmedo et al. 2023; Ercole et al. 2024) e *Eucalyptus* (Rodrigues et al. 2022; Gendvilas et al. 2022) e espécies como *Tectona grandis* (Curvo et al. 2024) e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Ucella-Filho et al. 2023) também apresentam maior crescimento nos primeiros anos.

Para a utilização da dendrocronologia em qualquer estudo, faz-se necessário que a espécie que será utilizada apresente a formação de anéis de crescimento anual (Albuquerque et al. 2019). Nos trópicos, os estudos com a dendrocronologia ainda são incipientes, principalmente devido a muitas espécies não formarem anéis de crescimento distintos (Wheeler et al. 2007; Islam et al. 2018). O estudo dos anéis de crescimento permite obter informações de ecologia, dinâmica florestal, projeção de colheitas e melhorias nas práticas de manejo florestal, aumentando assim sua sustentabilidade (Schöngart et al. 2017). Dessa forma, a *T. vulgaris* demonstra ser uma espécie com uso potencial para estudos dendrocronológicos, permitindo a criação de protocolos de manejo sustentável relacionados ao crescimento do plantio, desbaste, ciclo de corte, produtividade e qualidade da madeira, e entender a mudança climática nos plantios florestais da espécie (Moraes et al. 2022).

A bifurcação é uma estrutura morfológica, que gera dois ou mais eixos (fustes) de diâmetros semelhantes (Slater and Ennos 2013; Drénou et al. 2020) ou não. A ocorrência de bifurcação nas árvores de *T. vulgaris* promove a redução do diâmetro tanto do fuste principal quanto do fuste secundário. Provavelmente isso deve-se a necessidade de a árvore ter que partilhar os recursos disponíveis (luz, água e nutrientes) para o crescimento entre os fustes (Magnin et al. 2020) o que pode ter reduzido a largura dos anéis de crescimento das árvores bifurcadas quando comparadas com as árvores não bifurcadas.

Os efeitos da adubação podem trazer significativo aumento na largura dos anéis de crescimento, que em geral ocorrem nos primeiros anos após aplicação (Antony et al. 2009; Love-Myers et al. 2009; Ortega Rodriguez and Tomazello-Filho 2019). Os maiores valores de largura dos anéis de crescimento em solo de textura franco arenosa sem adubação pode estar relacionado ao comportamento da adubação nesse tipo de textura do solo e a alta variabilidade genética da espécie (Silva et al. 2021; Teixeira et al. 2023). Os solos franco arenosos apresentam

menores CTC na profundidade de 0 a 20 cm (Tabela 1) e consequentemente menor capacidade de retenção de nutrientes. Além disso, em solos arenosos o processo de lixiviação do K é mais acentuado (Roselem and Steiner 2017) e os solos altamente intemperizados, como os solos amazônicos, tem alta capacidade de fixação do P reduzindo a disponibilidade para as plantas (Gama-Rodrigues et al. 2014). Isso pode justificar o motivo das árvores adubadas em solo franco arenoso apresentarem menores larguras, pois, provavelmente parte da adubação foi lixiviada (K) e fixada (P) ao longo dos anos.

Ainda, é importante destacar os plantios são de origem seminal de diferentes árvores matrizes (item 7.2.1) e os fatores genéticos influenciam fortemente a variabilidade fenotípica (Leão et al. 2023). Assim, é possível que a variabilidade genética tenha superado os efeitos da adubação, o que pode explicar o porquê árvores não adubadas em solo arenoso em geral, apresentarem melhores resultados que árvores adubadas em ambas as texturas avaliadas. Quando comparadas árvores somente do solo muito argiloso, é possível verificar além da influência genética pode ter ocorrido o efeito da adubação, visto que, na maioria dos anos avaliados a largura dos anéis de crescimento foram maiores em árvores de solo argiloso com adubação quando comparados com as árvores não adubadas na mesma textura do solo.

7.4.2 Quantificação e distribuição de elementos químicos

As maiores contagens de Ca em árvores bifurcadas certamente estão relacionadas ao maior número de fustes, o que demanda mais do nutriente para seus processos fisiológicos. Na árvore, o Ca é um nutriente fundamental para atividade cambial e formação da madeira (Fromm et al. 2010). O Ca apresenta funções essenciais como elemento estrutural e de sinalização celular, sendo encontrado em maior quantidade nas paredes celulares. Provavelmente, devido a essa característica do Ca nas plantas, foram encontradas maiores contagens de Ca em relação aos outros elementos (S e Si) para as árvores de *T. vulgaris*.

Provavelmente, a principal influência na absorção pela espécie está relacionada as diferentes demandas pelo nutriente ao longo do seu crescimento em diâmetro e altura. Isso pode ser observado na tendência de aumento de Ca próximo a medula e casca, além de maiores concentrações do nutriente com aumento em altura. A absorção de nutrientes em espécies pioneiras pode estar relacionada a estratégia sucessional da espécie (Bizuti et al. 2018).

No crescimento inicial, as árvores que demandam luz (como as pioneiras) direcionam seus recursos para o crescimento em altura, de modo que sua copa possa alcançar a luz solar para a fotossíntese (Ramanantoandro et al. 2016), o que poderia justificar maiores concentrações de Ca com aumento em altura quando comparadas com posições próximas a base

e DAP. Os nossos resultados são consistentes aos encontrados em *Pinus sylvestris* por Scharnweber et al. (2016) que verificaram o aumento de Ca e outros elementos com o aumento da altura. Em contrapartida Helmisaari and Siltala (1989) avaliando a mesma espécie não encontraram aumento de Ca com aumento da altura. Inagawa et al. (2023) avaliando árvores tropicais de Bornéu, em geral, verificaram variações verticais insignificantes de nutrientes no fuste para a maioria das espécies avaliadas, inclusive o Ca.

Além disso, as maiores contagens de Ca encontrados próximos a medula (Figs. 7d, 8) podem ser ao fato que antes da implantação do experimento foi realizada a aplicação com calcário (1500 kg ha^{-1}) para a correção da acidez. Provavelmente, devido a maior disponibilidade de Ca nos anos iniciais das árvores aliado à sua maior demanda pelo nutriente para o seu crescimento resultou em maiores concentrações próximos a medula. Além do mais, as maiores contagens próximas a casca podem estar relacionadas ao papel do Ca na reativação cambial (Lautner and Fromm 2010). Esse Ca cambial provavelmente é proveniente de cristais de oxalato no córtex (Trockenbrodt 1995) ou do floema que apresenta paredes celulares que atuam como reservatório do elemento (Fromm 2010).

É importante destacar que a variação de Ca pode ser influenciada por fatores genéticos e ambientais (Hu et al. 2023). Assim, a variação encontrada entre os indivíduos ao longo do fuste (Figs. B1, B2) pode estar relacionado a esses fatores, uma vez que, as sementes foram provenientes de diferentes matrizes arbóreas e variabilidade genética das sementes de *T. vulgaris* tem grande influência nas características anatômicas, físicas e químicas da madeira da espécie (Silva et al. 2021).

O S é um macronutriente que possui importantes funções na composição estrutural de aminoácidos e proteínas e em diversas funções metabólicas na planta, impactando diretamente na fotossíntese (Hawkesford et al. 2012; Vitti et al. 2018; Bang et al. 2021). A principal forma de absorção do enxofre é o sulfato inorgânico (SO_4^{2-}) que é absorvido pelas raízes, sendo usado em diversos metabólitos principais (ex: cisteína e metionina) (Bang et al. 2021). Após ser absorvido do solo, o movimento na planta pode ocorrer pelo apoplasto ou simplasto e é transportando principalmente pelo xilema para as outras partes da planta (Maruyama-Nakashita et al. 2015; Vitti et al. 2018).

O enxofre é nutriente que pode apresentar alta mobilidade radial (Cutter and Guyette 1993) distribuído principalmente nos parênquimas (Ortega Rodriguez et al. 2022), sendo a parede dessas células mais finas e em maiores quantidades de ligações iônicas, além de conter todos os nutrientes essenciais no protoplasto das células vivas do parênquima (Hietz et al.

2015). Assim acreditamos que as maiores concentrações próximas a casca possam estar relacionadas a distribuição elementar na madeira pela via simplasto (Hietz et al. 2015).

Tendências pouco claras com maiores concentrações na região próximo a medula e próximas a casca também foram verificadas em *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Ucella-Filho et al. 2023). Da mesma forma, Ortega Rodriguez et al. (2018) verificaram para *Pinus taeda* uma tendência de redução de S, aumentando próximo a casca. Alves et al. (2021) verificaram teores relativamente homogêneos com maiores picos na região do cerne para S em *Avicennia schaueriana*. A absorção e utilização dos nutrientes podem ser diferentes entre espécies e até mesmo entre indivíduos da mesma espécie, sendo influenciadas por dinâmicas funcionais das plantas (processos morfológicos, fisiológicos e bioquímicos) e condições edafoclimáticas (Baligar et al. 2001). Ainda, a variação radial dos elementos na madeira é influenciada pelas características do xilema e propriedades dos elementos (Cutter and Guyette 1993). Assim, a variação de S encontrada nas árvores de *T. vulgaris* (Figs. B3, B4) nos sentidos medula-casca e base-topo podem ser influenciadas por fatores genéticos, ambientais ou a interação entre os dois fatores.

O Si é um elemento inerte no solo, sendo absorvido pelas raízes das plantas como ácido monossilícico $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ e sua absorção e transporte depende das raízes e a composição química do solo (Mandlik et al. 2020). O silício assimilado é precipitado na estrutura das paredes celulares em uma forma amorfa hidratada ou opala biogênica ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) (Korndörfer and Souza 2018), também chamado de Si fitogênico (Haynes 2014). O Si fitogênico é imóvel na planta e apresenta tendência de acumular nos tecidos mais antigos, pois o Si é depositado principalmente em terminais da corrente respiratória, em especial nas paredes externas das células epidérmicas, sendo sua distribuição em órgãos e tecidos da parte aérea das plantas, determinadas principalmente pela taxa de transpiração do órgão (Haynes 2014).

As maiores contagens de Si ocorreram em solo de textura argilosa. É provável que a concentração de silício seja maior em solos argilosos devido à maior capacidade das partículas de argila e dos óxidos de reterem (adsorverem) o Si. Essa retenção influencia diretamente a quantidade de silício disponível para as plantas, tornando esses solos com maior disponibilidade desse nutriente (Nguyen et al. 2017; Huang and Hseu 2021). Estudos mostram relações positivas entre o teor de argila e a disponibilidade de Si (Camargo et al. 2007; Crusciol et al. 2018; Huang and Hseu 2021).

Além disso, um dos principais constituintes dos solos de textura arenosa é o quartzo e esse mineral apresenta uma dissolução muito lenta não apresentando contribuições para o reservatório lábil do solo de silício disponível (Berthelsen et al. 2003) consequentemente

havendo menor quantidade desse elemento disponível para as plantas. Além disso, em comparação ao solo argiloso o franco-arenoso avaliado no estudo apresenta menor CTC (Tabela 1) o que pode influenciar em uma maior lixiviação de Si disponível para as plantas. Ainda, em solos de textura arenosa a mobilidade de Si é reduzida (Costa et al. 2022).

O Ca é essencial para a atividade cambial e para o crescimento das árvores (Fromm 2010). Porém, para a produção de bioenergia esse elemento permanece após a combustão na forma de cinzas assim como outros elementos inorgânicos e quando encontrado em altos teores, as de cinzas podem reduzir o potencial energético da biomassa e danificar o equipamento de combustão pela fusão e posterior cristalização das cinzas (Dias Júnior et al. 2020, 2021; Neina et al. 2020). Em relação ao S, os altos níveis na biomassa podem resultar em maiores emissões de SO₂ para a atmosfera após a combustão, reduzindo a qualidade do ar (Aas et al. 2019) e podendo causar problemas de saúde e ambientais. Além disso, o Si é prejudicial nos processos de corte e digestão da madeira, por ser um elemento abrangente (Navarro et al. 2019). Dessa forma, conhecer o nível de concentração destes elementos para monitorizar os tratamentos silviculturais e no processo de combustão da madeira e das cinzas é importante para avaliar a qualidade da madeira com fins energéticos.

A literatura relata teores adequados para esses elementos para árvores de *T. vulgaris* aos 87 meses em experimentos de espaçamento (Silva et al. 2021; Santos et al. 2024) na mesma região do presente estudo, demonstrando o potencial da espécie para bioenergia. Ainda que sejam necessários estudos que demonstrem valores quantitativos para comparar com literatura e avaliar o impacto para a produção energética e poluição ambiental para os fatores nesse estudo avaliados (presença de adubação, tipo de fuste e textura do solo) os resultados semiquantitativos obtidos pelo pXRF no presente estudo mostram o potencial da técnica utilizada para entender o comportamento dos elementos químicos em função desses fatores na fisiologia das árvores de *T. vulgaris*. Dessa forma, esse trabalho soma-se a outros (Mulenga et al. 2023; Roquette et al. 2023) que destacam o potencial de equipamentos portáteis de XRF para avaliar de forma rápida e econômica os elementos presentes na madeira de espécies tropicais para estudos nutricionais e ambientais.

7.5 Conclusão

A espécie *T. vulgaris* que vem demonstrando ser uma espécie promissora da região amazônica para estudos dendrocronológicos devido a anualidade de seus anéis de crescimento. Essa característica da espécie pode ajudar na criação de melhores práticas silviculturais, sendo

possível avaliar o crescimento e produtividade do plantio e qualidade da madeira, além de entender a influência das mudanças climáticas nos plantios florestais da espécie.

As larguras dos anéis de crescimento das árvores de *T. vulgaris* são significativamente maiores nos três primeiros anos, seguindo uma redução a partir do quarto ano. Além disso, árvores não bifurcadas apresentam maiores larguras dos anéis de crescimento quando comparadas a árvores bifurcadas. A adubação não demonstrou influência no crescimento em solos arenosos, porém, houve influência da adubação no crescimento em textura muito argilosa.

Em relação aos elementos químicos, as árvores bifurcadas apresentaram maior concentração de Ca, enquanto que árvores em solo argiloso apresentaram maior concentração de Si. Para o elemento S não houve influência dos fatores testados. Esses resultados mostram que estudos de nutrição em plantios florestais em regiões da Amazônia podem ser realizados por meio do uso de equipamentos de fluorescência de raios X de maneira econômica e rápida.

Por fim, estes resultados são importantes para nortear tomadas de decisões para a plantações futuras da espécie, demonstrando que é possível o uso de técnicas não destrutivas baseadas em espectrometria de raios X para a caracterização e avaliação da qualidade da madeira.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Embrapa Amazônia Oriental, ao Grupo Jari Celulose S.A., ao Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeiras (LAIM) do Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ) da Universidade de São Paulo (USP), ao Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN) do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP), ao Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (LTPF) da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (UFRA).

Referências

- Aas W, Mortier A, Bowersox V, et al (2019) Global and regional trends of atmospheric sulfur. *Sci Rep* 9:953. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37304-0>
- Albuquerque RP, Brandes AFN, Lisi CS, et al (2019) Tree-ring formation, radial increment and climate–growth relationship: assessing two potential tree species used in Brazilian Atlantic forest restoration projects. *Trees - Structure and Function* 33:877–892. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01825-6>
- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, et al (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22:711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

- Alves EEN, Ortega Rodriguez DR, Rocha P de A, et al (2021) Synchrotron-based X-ray microscopy for assessing elements distribution and speciation in mangrove tree-rings. *Results Chem* 3:. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2021.100121>
- Antony F, Jordan L, Daniels RF, et al (2009) Effect of midrotation fertilization on growth and specific gravity of loblolly pine. *Can. J. For. Res.* 39:928-935. <https://doi.org/10.1139/X09-021>
- Baligar VC, Fageria NK, He ZL (2001) Nutrient use efficiency in plants. *Commun Soil Sci Plant Anal* 32:921–950. <https://doi.org/10.1081/CSS-100104098>
- Bang TC de, Husted S, Laursen KH, et al (2021) The molecular–physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. *New Phytologist* 229:2446–2469. <https://doi.org/10.1111/nph.17074>
- Berthelsen S, Noble AD, Kingston G, et al (2003) CSIRO Land and Water Improving yield and CCS in sugarcane through the application of silicon based amendments
- Binkley D, Campoe OC, Alvares CA, et al (2020) Variation in whole-rotation yield among Eucalyptus genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS project. *For Ecol Manage* 462:117953. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117953>
- Bizuti DTG, Casagrande JC, Soares MR, et al (2018) The effect of calcium on the growth of native species in a tropical forest hotspot. *IForest* 11:221–226. <https://doi.org/10.3832/for2074-010>
- Booth TH (2013) Eucalypt plantations and climate change. *For Ecol Manage* 301:28–34. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.004>
- Bouriaud O, Teodosiu M, Kirdyanov A V., Wirth C (2015) Influence of wood density in tree-ring-based annual productivity assessments and its errors in Norway spruce. *Biogeosciences* 12:6205–6217. <https://doi.org/10.5194/bg-12-6205-2015>
- Brienen RJW, Schöngart J, Zuidema PA (2016) Tree Rings in the Tropics: Insights into the Ecology and Climate Sensitivity of Tropical Trees. In: Goldstein G, Santiago LS (eds) *Tropical Tree Physiology: : adaptations and responses in a changing environment*. Springer Cham, pp 439–461
- Brienen RJW, Zuidema PA (2005) Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forests: A test for six species using tree ring analysis. *Oecologia* 146:1–12. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0160-y>
- Calviño-Cancela M, Rubido-Bará M, van Etten EJB (2012) Do eucalypt plantations provide habitat for native forest biodiversity? *For Ecol Manage* 270:153–162. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.019>
- Camargo MS de, Korndörfer GH, Pereira HS (2007) Solubilidade do silício em solos: influência do calcário e ácido silícico aplicados. *Bragantia* 66:637–647
- Carvalho PER (2005) *Taxi-Branco: Taxonomia e Nomenclatura*. Colombo
- Castro VR, Chambi-Legoas R, Filho MT, et al (2020) The effect of soil nutrients and moisture during ontogeny on apparent wood density of Eucalyptus grandis. *Sci Rep* 10:2530
- Chambi-Legoas R, Chaix G, Castro VR, et al (2021) Inter-annual effects of potassium/sodium fertilization and water deficit on wood quality of Eucalyptus grandis trees over a full rotation. *For Ecol Manage* 496:. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119415>
- Coradin V, Muñiz G (1992) Normas de procedimentos em estudos de anatomia de madeira: I. Angiospermae. II. Gimnospermae.
- Costa Junior GT, Nunes LC, Gomes MHF, et al (2020) Direct determination of mineral nutrients in soybean leaves under vivo conditions by portable X-ray fluorescence spectroscopy. *X-Ray Spectrometry* 49:274–283. <https://doi.org/10.1002/xrs.3111>
- Costa MG, dos Santos Sarah MM, de Mello Prado R, et al (2022) Impact of Si on C, N, and P stoichiometric homeostasis favors nutrition and stem dry mass accumulation in sugarcane

- cultivated in tropical soils with different water regimes. *Front Plant Sci* 13:949909. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.949909>
- Costa SE de L, Santos RC do, Vidaurre GB, et al (2020) The effects of contrasting environments on the basic density and mean annual increment of wood from eucalyptus clones. *For Ecol Manage* 458:117807. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117807>
- Crusciol CAC, de Arruda DP, Fernandes AM, et al (2018) Evaluation of soil extractants for silicon availability for sugarcane. *J Plant Nutr* 41:2241–2255. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1500590>
- Curvo KR, Silva GAO, Castro VR, et al (2024) 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* 82:357–369. <https://doi.org/10.1007/s00107-023-02031-5>
- Cutter BE, Guyette RP (1993) Anatomical, chemical, and ecological factors affecting tree species choice in dendrochemistry studies. *J Environ Qual* 22:611–619. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/jeq1993.00472425002200030028x>
- Dias Júnior AF, Esteves RP, da Silva ÁM, et al (2020) Investigating the pyrolysis temperature to define the use of charcoal. *European Journal of Wood and Wood Products* 78:193–204. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01489-6>
- Dias Júnior AF, Suuchi MA, Neto AS, et al (2021) Blends of charcoal fines and wood improve the combustibility and quality of the solid biofuels. *Bioenergy Res* 14:344–354. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10179-8/Published>
- Dobner M, Huss J, Tomazello Filho M (2018) Wood density of loblolly pine trees as affected by crown thinnings and harvest age in southern Brazil. *Wood Sci Technol* 52:465–485. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0983-9>
- Drénou C, Restrepo D, Slater D (2020) Demystifying tree forks: Vices and virtues of forks in arboriculture. *Journal of Botany Research* 3:100–113. <https://doi.org/10.36959/771/566>
- Elli EF, Sentelhas PC, Bender FD (2020) Impacts and uncertainties of climate change projections on Eucalyptus plantations productivity across Brazil. *For Ecol Manage* 474:118365. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118365>
- Energy Research Office (2023) Balanço energético nacional. Summary Report 2024: reference year 2023
- Ercole TM, Gomes JBV, dos Santos Rodrigues V, et al (2024) VARI as an indicator of site productivity of *Pinus taeda* L.: soil, litter, and plant nutrition. *Eur J For Res*. <https://doi.org/10.1007/s10342-024-01711-y>
- Farias J, Marimon BS, Carvalho Ramos Silva L de, et al (2016) Survival and growth of native *Tachigali vulgaris* and exotic *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* trees in degraded soils with biochar amendment in southern Amazonia. *For Ecol Manage* 368:173–182. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.022>
- Fromm J (2010) Wood formation of trees in relation to potassium and calcium nutrition. *Tree Physiol* 30:1140–1147. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq024>
- Gama-Rodrigues, AC, Sales, MVS, Silva, PSD, et al (2014) An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. *Biogeochemistry* 118:453–469. <https://doi.org/10.1007/s10533-013-9946-x>
- Gendvilas V, Neyland M, Rocha-Sepúlveda MF, et al (2022) Effects of thinning on the longitudinal and radial variation in wood properties of *Eucalyptus nitens*. *Forestry* 95:504–517. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpac007>
- Gonçalves JQ, Durgante FM, Wittmann F, et al (2021) Minimum temperature and evapotranspiration in Central Amazonian floodplains limit tree growth of *Nectandra amazonum* (Lauraceae). *Trees - Structure and Function* 35:1367–1384. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02126-7>

- Hawkesford M, Horst W, Kichey T, et al (2012) Functions of Macronutrients. In: Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition. Elsevier Inc., pp 135–189
- Haynes RJ (2014) A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177:831–844
- Helmisaari HS, Siltala T (1989) Variation in nutrient concentrations of *pinus sylvestris* stems. *Scand J For Res* 4:443–451. <https://doi.org/10.1080/02827588909382580>
- Hevia A, Sánchez-Salguero R, Camarero JJ, et al (2018) Towards a better understanding of long-term wood-chemistry variations in old-growth forests: A case study on ancient *Pinus uncinata* trees from the Pyrenees. *Science of the Total Environment* 625:220–232. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.229>
- Hietz P, Horsky M, Prohaska T, et al (2015) High-resolution densitometry and elemental analysis of tropical wood. *Trees - Structure and Function* 29:487–497. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1126-7>
- Hu M, Yang Y, Fan M, et al (2023) Inter- and Intra-Population Variation of Foliage Calcium and Magnesium in Two Chinese Pine Species. *Plants* 12:562. <https://doi.org/10.3390/plants12030562>
- Huang YC, Hseu ZY (2021) Silicon availability in relation to soil properties in Inceptisols on uncultivated lands and paddy fields in Taiwan. *Geoderma Regional* 26:e00406. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00406>
- IBÁ Brazilian Tree Industry (2023) IBÁ annual report 2023. IBÁ, São Paulo
- Inagawa T, Riutta T, Majalap-Lee N, et al (2023) Radial and vertical variation of wood nutrients in Bornean tropical forest trees. *Biotropica* 55:1019–1032. <https://doi.org/10.1111/btp.13250>
- INMET National Institute of Meteorology (2023). INMET Meteorological Database. <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Accessed 28 May 2023
- Islam M, Rahman M, Bräuning A (2018) Growth-ring boundary anatomy and dendrochronological potential in a moist tropical forest in Northeastern Bangladesh. *Tree Ring Res* 74:76–93. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-74.1.76>
- Jacquin P, Longuetaud F, Leban JM, Mothe F (2017) X-ray microdensitometry of wood: A review of existing principles and devices. *Dendrochronologia (Verona)* 42:42–50. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.01.004>
- Korndörfer GH, Souza S regina de (2018) Elementos benéficos. In: Fernandes MS, Souza SR de, Santos LA (eds) *Nutrição Mineral de Plantas*, 2. ed. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, pp 563–598
- Lautner S, Fromm J (2010) Calcium-dependent physiological processes in trees. *Plant Biol* 12:268–274. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2009.00281.x>
- Lima MDR, Moraes LG, Silva R de CC, et al (2023) *Tachigali vulgaris* energy forests: understanding spacing, age, and stem type effects on tree growth patterns and wood density. *New For (Dordr)* 54:491–513. <https://doi.org/10.1007/s11056-022-09932-y>
- Love-Myers KR, Clark III A, Schimleck LR, et al (2009) Specific gravity responses of slash and loblolly pine following mid-rotation fertilization. *For Ecol Manage* 257:2342–2349. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.03.031>
- Macedo TM, Barros CF, Costa CG, Lima HC (2014) Wood anatomy of seven species of *tachigali* (Caesalpinioideae-Leguminosae). *IAWA J* 35:19–30. <https://doi.org/10.1163/22941932-000000044>
- Magnin A, Torres C, Stecconi M, et al (2022) Influence of trunk forking on height and diameter growth in an even-aged stand of *Nothofagus pumilio*. *New Zealand Journal of Botany* 60:45–59. <https://doi.org/10.1080/0028825X.2021.1920433>
- Mandlik R, Thakral V, Raturi G, et al (2020) Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants. *J Exp Bot* 71:6703–6718. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa301>

- Maruyama-Nakashita A, Watanabe-Takahashi A, Inoue E, et al (2015) Sulfur-responsive elements in the 3'-nontranscribed intergenic region are essential for the induction of SULFATE TRANSPORTER 2;1 gene expression in arabidopsis roots under sulfur deficiency. *Plant Cell* 27:1279–1296. <https://doi.org/10.1105/tpc.114.134908>
- Moraes LG, Assis-Pereira G, Protásio T de P, et al (2022) Dendrocronologia e densitometria de raios X aplicados na avaliação das propriedades do lenho de árvores de *Tachigali vulgaris*, na Amazônia. In: Reis CAF, Gonçalves D de A, Protásio T de P (eds) Workshop Online Florestas de *Tachigali vulgaris*, 1ª Edição. Embrapa Florestas, Colombo, pp 99–111
- Moraes LG, Lima MDR, Assis-Pereira G, et al (2023) Forking and planting spacing impacts on wood density, X-ray density, and heartwood proportion of *Tachigali vulgaris*. *Trees - Structure and Function* 37:1567–1581. <https://doi.org/10.1007/s00468-023-02443-z>
- Mulenga C, Phiri D, Ortega-Rodriguez DR, Meincken M (2023) Bioaccumulation of potentially toxic elements by indigenous and exotic trees growing around a copper leaching plant in Mufulira, Zambia. *Environmental Systems Research* 12:1–12. <https://doi.org/10.1186/s40068-023-00310-x>
- Navarro H, Marcó LM, Araneda AA, Bennun L (2019) Spatial distribution of Si in Pinus Insigne (Pinus radiata) Wood using micro XRF by Synchrotron Radiation. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 39:187–197. <https://doi.org/10.1080/02773813.2018.1562473>
- Neina D, Faust S, Joergensen RG (2020) Characterization of charcoal and firewood ash for use in African peri-urban agriculture. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 7:1–10. <https://doi.org/10.1186/s40538-019-0171-2>
- Nguyen MN, Picardal F, Dultz S, et al (2017) Silicic acid as a dispersibility enhancer in a Fe-oxide-rich kaolinitic soil clay. *Geoderma* 286:8–14. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.029>
- Nicoletti MF, Machado SA, Carvalho SPC, et al (2016) Descrição do perfil do fuste de árvores por meio das funções de afilamento. *Scientia Agraria Paranaensis* 15:365–372. <https://doi.org/10.18188/1983-1471/sap.v15n4p365-372>
- Nunes MH, Görgens EB (2016) Artificial Intelligence Procedures for Tree Taper Estimation within a Complex Vegetation Mosaic in Brazil. *PLoS One* 11:e0154738. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154738>
- Olmedo GM, Hornink B, Arenhardt BB, et al (2023) Growth dynamic and climate signals on abandoned plantation of Pinus elliottii in Southern Brazil: A dendrochronological contribution. *Dendrochronologia* (Verona) 82:126136. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2023.126136>
- Orellana BBM, Vale AT Do, Gonzalez J, et al (2018) Produtividade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* por classe diamétrica em plantios experimentais na Amazônia. *Nativa* 6:773–781. <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i0.5130>
- Ortega Rodriguez DR, Carvalho HWP de, Tomazello-Filho M (2018) Nutrient concentrations of 17- year-old Pinus taeda annual tree-rings analyzed by X-ray fluorescence microanalysis. *Dendrochronologia* (Verona) 52:67–79. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.09.009>
- Ortega Rodriguez DR, Hevia A, Sánchez-Salguero R, et al (2022) Exploring wood anatomy, density and chemistry profiles to understand the tree-ring formation in Amazonian tree species. *Dendrochronologia* (Verona) 71:125915. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125915>
- Ortega Rodriguez DR, Sánchez-Salguero R, Hevia A, et al (2023) Climate variability of the southern Amazon inferred by a multi-proxy tree-ring approach using Cedrela fissilis Vell. *Science of the Total Environment* 871:162064. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162064>

- Ortega Rodriguez DR, Tomazello-Filho M (2019) Clues to wood quality and production from analyzing ring width and density variabilities of fertilized *Pinus taeda* trees. *New For (Dordr)* 50:821–843. <https://doi.org/10.1007/s11056-018-09702-9>
- Papú S, Ortega-Rodriguez DR, Roig FA, Navas F (2024) Incidence of controlled water restriction on density and chemical profiles in tree rings of *Araucaria araucana* seedlings. *Ecol Process* 13:. <https://doi.org/10.1186/s13717-024-00519-3>
- Pena-Vergara G, Castro LR, Gasparetto CA, Bizzo WA (2022) Energy from planted forest and its residues characterization in Brazil. *Energy* 239:122243. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122243>
- Portal-Cahuana LA, Kohagura-Arrunátgu JAH, Flores-Grandez CEM, et al (2023) Wood anatomical structure and density of *Tachigali* aubl species occurring in the southeastern Peruvian Amazon forest. *Floresta* 53:174–183. <https://doi.org/10.5380/rf.v53i2.83247>
- R Development Core Team (2023) R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing v. 4. 2. 3
- Ramananantoandro T, Ramanakoto MF, Rajoelison GL, et al (2016) Influence of tree species, tree diameter and soil types on wood density and its radial variation in a mid-altitude rainforest in Madagascar. *Ann For Sci* 73:1113–1124. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0576-z>
- Rodrigues GG, Raden M, Silva LD, Kahle HP (2022) Temporal annotation of high-resolution intra-annual wood density information of *Eucalyptus urophylla* and its correlation with hydroclimatic conditions. *Dendrochronologia (Verona)* 74:125978. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125978>
- Roquette JG, Ortega-Rodriguez DR, Portal-Cahuana LA, et al (2023) Environmental forensics evaluation of residual soybean sludge using trees of Brazilian savannah. *Environ Nanotechnol Monit Manag* 20:100814. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100814>
- Rosolem, CA, Steiner, F (2017) Effects of soil texture and rates of K input on potassium balance in tropical soil. *Eur J Soil Sci* 68:658–666. <https://doi.org/10.1111/ejss.12460>
- Rudra S, Rosendahl L, Kumar A (2014) Development of net energy ratio and emission factor for quad-generation pathways. *Energy Systems* 5:719–735. <https://doi.org/10.1007/s12667-014-0126-4>
- Santos EV dos, Lima MDR, Dantas K das GF, et al (2024) The Inorganic Composition of *Tachigali vulgaris* Wood: Implications for Bioenergy and Nutrient Balances of Planted Forests in the Amazonia. *Bioenergy Res* 17:114–128. <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10679-3>
- Scharnweber T, Hevia A, Buras A, et al (2016) Common trends in elements? Within- and between-tree variations of wood-chemistry measured by X-ray fluorescence — A dendrochemical study. *Science of the Total Environment* 566–567:1245–1253. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.182>
- Schöngart J, Bräuning A, Barbosa APMC, et al (2017) Dendroecological studies in the neotropics: History, status and future challenges. In: Amoroso MM, Daniels LD, Baker PJ, Camarero JJ (eds) *Dendroecology. Tree-Ring Analyses Applied to Ecological Studies*. Springer, Cham, pp 35–73
- Silva AR, Gonçalves D de A, Sales A (2016) Desempenho do tachi-branco em resposta à adubação combinada de fósforo e potássio em Latossolos. *Acta Iguazu* 5:37–48
- Silva MOS, Silva MG, Bufalino L, et al (2021) Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachi-branco trees planted at different spacings for bioenergy purposes. *J For Res (Harbin)* 32:211–224. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01068-8>
- Simetti R, Bonduelle GM, Da Silva DA (2018) Wood quality of five eucalyptus species planted in Rio Grande do Sul, Brazil for charcoal production. *Journal of Tropical Forest Science* 30:175–181. <https://doi.org/10.26525/jtfs2018.30.2.175181>

- Sindifer. Sindicato da indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais (2022) Pig iron production in Minas Gerais and Brazil. Statistical yearbook reference: 2021. Minas Gerais
- Slater D, Ennos AR (2013) Determining the mechanical properties of hazel forks by testing their component parts. *Trees - Structure and Function* 27:1515–1524. <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0898-5>
- Teixeira RAC, Lima MDR, Silva AR, et al (2023) Dynamics of experimental plantations of *Tachigali vulgaris* in response to fertilization and soil texture. *New For (Dordr)* 55:713–733. <https://doi.org/10.1007/s11056-023-09999-1>
- Tomazello M, Brazolin S, Chagas MP, et al (2008) Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of Eucalyptus wood. *Ciencia y tecnología* 10:139–149
- Trockenbrodt M (1995) Calcium oxalate crystals in the bark of *Quercus robur*, *Ulmus glabra*, *Populus tremula* and *Betula pendula*. *Ann Bot* 75:281–284. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/anbo.1995.1022>
- Ucella-Filho JGM, Dias Júnior AF, de Souza EC, et al (2023) Clues about wood density and trace-element variability of *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby for bioenergy use. *Environmental Science and Pollution Research* 30:56161–56173. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26343-4>
- Van Der Werff H (2008) A synopsis of the genus *Tachigali* (Leguminosae: Caesalpinioideae) in northern South America. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 95:618–660. <https://doi.org/10.3417/2007159>
- Vitti GC, Otto R, Saviato J, et al (2018) Enxofre. In: Fernandes MS, Souza S regina de, Santos LA (eds) *Nutrição Mineral de Plantas*, 2. ed. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, pp 377–400
- Wheeler EA, Baas P, Rodgers S (2007) Variations in dicot wood anatomy: a global analysis based on the insidewood database. *IAWA J* 28:229–258

8 CONCLUSÕES GERAIS

A espécie *T. vulgaris* vem demonstrando ser promissora para plantios energéticos na região amazônica. Todavia, várias lacunas do conhecimento precisam ser preenchidas para a indicação futura dessa espécie em escala comercial na Amazônia. Dessa forma, com a proposta da presente dissertação em avaliar dois plantios experimentais homogêneos de *T. vulgaris* aos 11 anos de idade, avaliando os efeitos da presença da adubação e bifurcação em duas diferentes texturas de solo na qualidade do lenho e crescimento das árvores de *T. vulgaris*, o estudo trouxeram insights importantes, sendo eles:

- A densidade da madeira (importante parâmetro para fins energéticos) de *T. vulgaris* é influenciada pelo diâmetro das árvores e a presença de bifurcação. Em geral, árvores de diâmetros maiores apresentam maiores densidades médias da madeira, entretanto, se houver a presença de bifurcação, essa densidade pode ser reduzida e, ainda, a variação de densidade aumenta dentro do fuste;
- A adubação utilizada no estudo não apresentou influencia significativas nas variáveis estudadas, o que pode indicar redução nos custos com fertilizantes. Entretanto, ressalta-se a importância da adubação em plantios florestais e a ausência do efeito da adubação pode estar relacionada a fatores não avaliados nesse estudo, como a variabilidade genética da espécie e a sua adaptação a solos de baixa fertilidade e aos altos teores de alumínio encontrados nos solos amazônicos. Assim, recomendam-se estudos levando consideração esses fatores;
- A equação de conversão para densidade básica pode auxiliar na quantificação e dinâmica do estoque de carbono em plantios de *T. vulgaris*;
- As técnicas de densitometria de raios X e fluorescência de raios X mostraram potencial para a caracterização física e química, respectivamente, da madeira de *T. vulgaris* para fins energéticos. Além disso, a espécie apresenta potencial para estudos de crescimento e produtividade de plantios a partir dos anéis de crescimento podendo ser utilizado para tomadas de decisões no manejo da espécie.

APÊNDICE A

Table A1 Multivariate analysis of variance addressing the variability of apparent density at different positions along the stem for 32 *Tachigali vulgaris* trees

Source of variation	Sum of squares	P
Among trees	0.65916	0.001
Within trees	1.4643	
Total	2.1234	

Table A2 Means and standard deviation of growth ring width (GRW), earlywood (EW) and latewood (LW) width, earlywood and latewood width ratio (EW/LW), earlywood density (EWD) and latewood density (LWD) for the different relative positions (%) sampled for *Tachigali vulgaris* trees sampled in two experimental areas in the district of Monte Dourado, Almeirim, Pará, Brazil

Variables	Relative height	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5	Group 6	Group 7	Group 8	General average
GRW (cm)	Base	1.15 ^(0.31)	1.01 ^(0.28)	0.95 ^(0.21)	0.92 ^(0.34)	0.84 ^(0.08)	0.76 ^(0.27)	0.81 ^(0.11)	0.86 ^(0.07)	0.91 ^(0.24)
	DBH	0.90 ^(0.14)	0.67 ^(0.05)	0.73 ^(0.17)	0.55 ^(0.09)	0.63 ^(0.02)	0.69 ^(0.08)	0.77 ^(0.14)	0.71 ^(0.19)	0.71 ^(0.14)
	25%	0.75 ^(0.10)	0.62 ^(0.08)	0.78 ^(0.15)	0.58 ^(0.07)	0.59 ^(0.07)	0.70 ^(0.13)	0.70 ^(0.03)	0.75 ^(0.11)	0.69 ^(0.11)
	50%	0.85 ^(0.09)	0.58 ^(0.09)	0.75 ^(0.15)	0.66 ^(0.04)	0.64 ^(0.10)	0.73 ^(0.20)	0.73 ^(0.06)	0.76 ^(0.03)	0.71 ^(0.12)
	75%	0.79 ^(0.21)	0.56 ^(0.14)	0.82 ^(0.36)	0.58 ^(0.12)	0.61 ^(0.21)	0.66 ^(0.14)	0.81 ^(0.05)	0.71 ^(0.12)	0.69 ^(0.20)
	100%	0.59 ^(0.25)	0.48 ^(0.27)	0.48 ^(0.06)	0.62 ^(0.20)	0.53 ^(0.07)	0.51 ^(0.06)	0.58 ^(0.07)	0.54 ^(0.02)	0.54 ^(0.15)
	Average (group)	0.84 ^(0.24)	0.67 ^(0.22)	0.76 ^(0.24)	0.65 ^(0.18)	0.66 ^(0.13)	0.68 ^(0.16)	0.75 ^(0.12)	0.72 ^(0.12)	0.71 ^(0.19)
	CV%	28.69	33.10	31.03	28.25	19.95	23.82	15.43	16.88	26.85
EW (cm)	Base	1.02 ^(0.34)	0.90 ^(0.28)	0.87 ^(0.20)	0.83 ^(0.31)	0.75 ^(0.06)	0.69 ^(0.30)	0.72 ^(0.08)	0.78 ^(0.05)	0.82 ^(0.23)
	DBH	0.81 ^(0.15)	0.59 ^(0.05)	0.66 ^(0.14)	0.49 ^(0.08)	0.58 ^(0.01)	0.63 ^(0.09)	0.69 ^(0.11)	0.65 ^(0.17)	0.64 ^(0.13)
	25%	0.66 ^(0.12)	0.53 ^(0.07)	0.72 ^(0.14)	0.53 ^(0.06)	0.55 ^(0.07)	0.64 ^(0.14)	0.63 ^(0.03)	0.69 ^(0.12)	0.62 ^(0.11)
	50%	0.74 ^(0.09)	0.52 ^(0.08)	0.69 ^(0.15)	0.61 ^(0.05)	0.59 ^(0.11)	0.68 ^(0.20)	0.68 ^(0.06)	0.69 ^(0.03)	0.65 ^(0.12)
	75%	0.70 ^(0.20)	0.48 ^(0.14)	0.73 ^(0.36)	0.54 ^(0.12)	0.55 ^(0.22)	0.59 ^(0.14)	0.75 ^(0.03)	0.65 ^(0.11)	0.62 ^(0.19)
	100%	0.49 ^(0.24)	0.39 ^(0.24)	0.37 ^(0.06)	0.57 ^(0.19)	0.42 ^(0.04)	0.45 ^(0.08)	0.49 ^(0.07)	0.49 ^(0.02)	0.46 ^(0.15)
	Average (group)	0.78 ^(0.24)	0.59 ^(0.21)	0.68 ^(0.24)	0.60 ^(0.17)	0.60 ^(0.14)	0.62 ^(0.16)	0.68 ^(0.11)	0.66 ^(0.11)	0.64 ^(0.18)
	CV%	30.70	35.79	34.72	28.37	22.61	26.13	16.86	17.01	28.72
LW (cm)	Base	0.13 ^(0.06)	0.11 ^(0.01)	0.09 ^(0.01)	0.09 ^(0.03)	0.09 ^(0.03)	0.07 ^(0.03)	0.09 ^(0.04)	0.08 ^(0.02)	0.09 ^(0.03)
	DBH	0.09 ^(0.01)	0.09 ^(0.02)	0.08 ^(0.03)	0.06 ^(0.02)	0.05 ^(0.02)	0.06 ^(0.02)	0.07 ^(0.02)	0.06 ^(0.01)	0.07 ^(0.02)
	25%	0.09 ^(0.03)	0.08 ^(0.03)	0.06 ^(0.02)	0.04 ^(0.01)	0.04 ^(0.01)	0.05 ^(0.02)	0.06 ^(0.02)	0.06 ^(0.01)	0.06 ^(0.02)
	50%	0.11 ^(0.02)	0.06 ^(0.01)	0.05 ^(0.02)	0.05 ^(0.01)	0.04 ^(0.02)	0.05 ^(0.01)	0.05 ^(0.01)	0.07 ^(0.04)	0.06 ^(0.03)
	75%	0.09 ^(0.02)	0.08 ^(0.03)	0.08 ^(0.02)	0.04 ^(0.01)	0.06 ^(0.01)	0.07 ^(0.03)	0.06 ^(0.02)	0.06 ^(0.02)	0.07 ^(0.03)
	100%	0.11 ^(0.07)	0.09 ^(0.04)	0.11 ^(0.07)	0.05 ^(0.02)	0.11 ^(0.06)	0.07 ^(0.03)	0.09 ^(0.01)	0.05 ^(0.02)	0.08 ^(0.05)
	Average (group)	0.10 ^(0.04)	0.09 ^(0.03)	0.08 ^(0.03)	0.05 ^(0.02)	0.06 ^(0.04)	0.06 ^(0.02)	0.07 ^(0.02)	0.06 ^(0.02)	0.07 ^(0.03)
	CV%	38.15	32.63	43.98	41.08	62.82	37.11	28.37	29.83	44.30
EW/LW (cm)	Base	15.94 ^(11.31)	10.83 ^(1.95)	11.64 ^(0.07)	12.28 ^(5.11)	11.32 ^(2.37)	13.39 ^(9.92)	11.33 ^(4.65)	12.08 ^(4.31)	12.42 ^(5.35)
	DBH	11.49 ^(3.94)	9.04 ^(1.87)	11.95 ^(1.41)	11.82 ^(3.01)	15.12 ^(3.98)	14.90 ^(4.10)	11.41 ^(2.74)	12.66 ^(2.00)	14.50 ^(11.70)
	25%	11.15 ^(3.18)	9.32 ^(3.52)	18.61 ^(8.44)	14.60 ^(0.94)	14.56 ^(2.56)	15.55 ^(4.93)	12.74 ^(3.60)	14.62 ^(1.19)	13.82 ^(4.50)

	50%	7.66 ^(1.47)	10.20 ^(1.49)	16.13 ^(7.05)	14.06 ^(2.13)	19.25 ^(14.68)	16.37 ^(6.24)	14.01 ^(1.52)	13.54 ^(1.75)	13.62 ^(6.15)
	75%	12.35 ^(1.42)	7.82 ^(3.09)	14.93 ^(14.72)	20.44 ^(9.32)	13.81 ^(5.17)	10.62 ^(4.85)	14.32 ^(4.73)	11.00 ^(1.74)	13.02 ^(6.98)
	100%	8.55 ^(7.85)	4.88 ^(0.90)	5.13 ^(2.73)	12.38 ^(7.97)	5.42 ^(3.31)	8.34 ^(3.94)	7.41 ^(1.31)	10.90 ^(2.40)	7.98 ^(5.10)
	Average (group)	11.71 ^(5.95)	8.79 ^(2.79)	13.42 ^(8.21)	14.57 ^(5.67)	13.84 ^(7.66)	13.46 ^(5.23)	12.10 ^(3.74)	12.41 ^(2.63)	12.76 ^(7.28)
	CV%	50.79	31.77	61.17	38.94	55.33	38.84	78.05	21.20	57.03
EWD (g cm ⁻³)	Base	0.70 ^(0.03)	0.74 ^(0.04)	0.68 ^(0.05)	0.68 ^(0.03)	0.67 ^(0.09)	0.70 ^(0.05)	0.75 ^(0.05)	0.71 ^(0.07)	0.71 ^(0.05)
	DBH	0.65 ^(0.04)	0.61 ^(0.09)	0.61 ^(0.09)	0.62 ^(0.06)	0.58 ^(0.10)	0.59 ^(0.04)	0.69 ^(0.02)	0.60 ^(0.04)	0.62 ^(0.07)
	25%	0.57 ^(0.08)	0.52 ^(0.10)	0.51 ^(0.16)	0.50 ^(0.03)	0.55 ^(0.01)	0.50 ^(0.06)	0.58 ^(0.05)	0.52 ^(0.02)	0.53 ^(0.08)
	50%	0.59 ^(0.06)	0.52 ^(0.07)	0.54 ^(0.14)	0.48 ^(0.02)	0.53 ^(0.01)	0.49 ^(0.02)	0.58 ^(0.14)	0.49 ^(0.01)	0.53 ^(0.08)
	75%	0.61 ^(0.08)	0.61 ^(0.11)	0.60 ^(0.09)	0.52 ^(0.04)	0.56 ^(0.07)	0.55 ^(0.03)	0.59 ^(0.05)	0.56 ^(0.02)	0.58 ^(0.08)
	100%	0.63 ^(0.05)	0.69 ^(0.04)	0.63 ^(0.07)	0.57 ^(0.03)	0.62 ^(0.06)	0.55 ^(0.05)	0.56 ^(0.05)	0.56 ^(0.03)	0.60 ^(0.06)
	Average (group)	0.63 ^(0.07)	0.61 ^(0.11)	0.59 ^(0.11)	0.56 ^(0.08)	0.59 ^(0.08)	0.57 ^(0.09)	0.64 ^(0.09)	0.57 ^(0.09)	0.59 ^(0.09)
	CV%	11.44	17.94	18.79	13.71	12.77	16.08	13.40	15.58	15.76
LWD (g cm ⁻³)	Base	0.90 ^(0.04)	0.93 ^(0.02)	0.87 ^(0.07)	0.87 ^(0.03)	0.84 ^(0.14)	0.87 ^(0.03)	0.92 ^(0.06)	0.90 ^(0.06)	0.89 ^(0.06)
	DBH	0.88 ^(0.03)	0.84 ^(0.06)	0.83 ^(0.08)	0.81 ^(0.08)	0.80 ^(0.13)	0.81 ^(0.05)	0.90 ^(0.03)	0.86 ^(0.06)	0.84 ^(0.08)
	25%	0.78 ^(0.10)	0.70 ^(0.08)	0.73 ^(0.16)	0.72 ^(0.07)	0.80 ^(0.10)	0.72 ^(0.09)	0.82 ^(0.11)	0.77 ^(0.05)	0.75 ^(0.10)
	50%	0.78 ^(0.10)	0.71 ^(0.05)	0.75 ^(0.13)	0.70 ^(0.05)	0.80 ^(0.09)	0.72 ^(0.02)	0.86 ^(0.17)	0.74 ^(0.05)	0.76 ^(0.10)
	75%	0.79 ^(0.12)	0.79 ^(0.10)	0.79 ^(0.10)	0.72 ^(0.05)	0.76 ^(0.07)	0.73 ^(0.04)	0.79 ^(0.02)	0.76 ^(0.03)	0.77 ^(0.08)
	100%	0.74 ^(0.02)	0.81 ^(0.04)	0.74 ^(0.07)	0.75 ^(0.07)	0.75 ^(0.02)	0.69 ^(0.04)	0.68 ^(0.11)	0.72 ^(0.05)	0.73 ^(0.06)
	Average (group)	0.83 ^(0.09)	0.79 ^(0.10)	0.78 ^(0.11)	0.76 ^(0.08)	0.80 ^(0.09)	0.76 ^(0.09)	0.85 ^(0.11)	0.79 ^(0.09)	0.79 ^(0.10)
	CV%	11.02	12.42	13.80	10.68	11.26	12.45	12.35	11.39	12.41

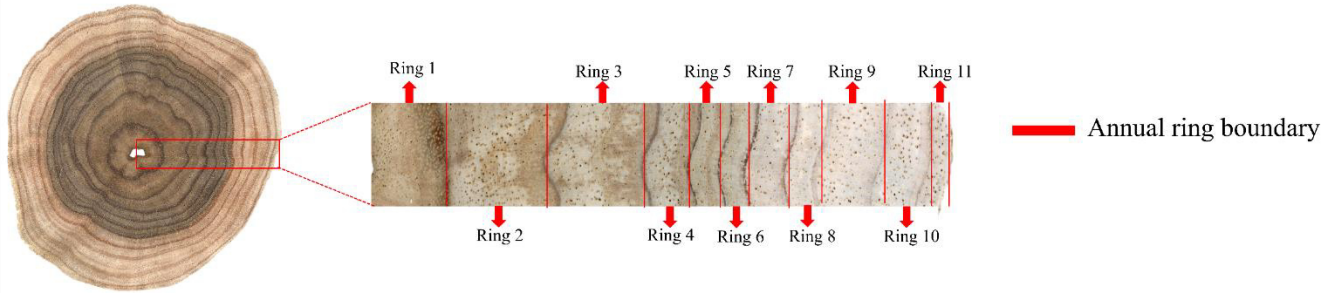
CV: Coefficient of variation, group 1: non-forked trees + sandy loam soil + without fertilization, group 2: forked trees + sandy loam soil + without fertilization, group 3: non-forked trees + sandy loam soil + with fertilization, group 4: forked trees + sandy loam soil + with fertilization, group 5: non-forked trees + very clayey soil + without fertilization, group 6: forked trees + very clayey soil + without fertilization, group 7: non-forked trees + very clayey soil + with fertilization, group 8: forked trees + very clayey soil + with fertilization

Table A3 Summary of Student's t-test for apparent density assessed for presence or absence of forking, presence or absence of fertilization and between two soil texture classes for each year and along the longitudinal direction of *T. vulgaris* trees at a 5% significance level

		Source of variation					
		Stem type		Textural class		Fertilization	
		t value	p value	t value	p value	t value	p value
Cambial age (years)							
1		-3.07	0.24	1.66	0.10	-2.48	0.14
2		-1.15	0.25	0.06	0.95	0.33	0.74
3		-0.74	0.46	-0.16	0.87	0.59	0.55
4		-0.26	0.80	0.17	0.86	0.55	0.58
5		-0.05	0.96	-0.15	0.88	0.33	0.74
6		-0.38	0.71	-0.48	0.63	0.37	0.71
7		0.04	0.97	-0.96	0.34	0.59	0.56
8		0.42	0.68	-0.74	0.46	0.06	0.95
9		0.28	0.78	-0.31	0.75	0.05	0.96
10		0.22	0.82	-1.24	0.22	0.42	0.68
11		-0.77	0.44	-0.73	0.47	0.49	0.63
Height							
Meters (m)	Relative (%)						
0.12	0	-0.43	0.67	-0.83	0.42	0.25	0.80
1.30	DBH	0.69	0.50	-0.02	0.99	-1.07	0.29
4.73	25	-0.12	0.91	-0.43	0.67	-1.66	0.11
9.47	50	-0.30	0.76	0.42	0.68	-2.14	0.05
14.20	75	-0.52	0.61	0.95	0.35	-0.58	0.56
18.93	100	-1.76	0.09	2.30	0.06	-0.51	0.62

Fig. A1 Growth rings of *T. vulgaris* trees (a) and method of weighting the density of growth rings as a function of cross-sectional area, consisting of step 1) calculating the diameter of the growth rings; step 2) calculate the cross-sectional area of the growth rings; step 3) Calculate the weighted density of the growth rings

(a)



(b) Step by step calculation used to obtain the weighted density of growth rings:

1 Calculation of the growth ring diameter (GRD)

$$\begin{aligned} GRD_{ring1} &= GRW_{ring1} * 2 \\ GRD_{ring2} &= GRW_{ring2} * 2 \\ GRD_{ring3} &= GRW_{ring3} * 2 \\ GRD_{ring4} &= GRW_{ring4} * 2 \\ GRD_{ring5} &= GRW_{ring5} * 2 \\ GRD_{ring6} &= GRW_{ring6} * 2 \\ GRD_{ring7} &= GRW_{ring7} * 2 \\ GRD_{ring8} &= GRW_{ring8} * 2 \\ GRD_{ring9} &= GRW_{ring9} * 2 \\ GRD_{ring10} &= GRW_{ring10} * 2 \\ GRD_{ring11} &= GRW_{ring11} * 2 \end{aligned}$$

2 Calculation of the cross-sectional area of growth rings (g_{ring})

$$\begin{aligned} g_{ring1} &= \frac{\pi * GRD_{ring1}^2}{4} \\ g_{ring2} &= \frac{\pi * GRD_{ring2}^2}{4} \\ g_{ring3} &= \frac{\pi * GRD_{ring3}^2}{4} \\ g_{ring4} &= \frac{\pi * GRD_{ring4}^2}{4} \\ g_{ring5} &= \frac{\pi * GRD_{ring5}^2}{4} \\ g_{ring6} &= \frac{\pi * GRD_{ring6}^2}{4} \\ g_{ring7} &= \frac{\pi * GRD_{ring7}^2}{4} \\ g_{ring8} &= \frac{\pi * GRD_{ring8}^2}{4} \\ g_{ring9} &= \frac{\pi * GRD_{ring9}^2}{4} \\ g_{ring10} &= \frac{\pi * GRD_{ring10}^2}{4} \\ g_{ring11} &= \frac{\pi * GRD_{ring11}^2}{4} \end{aligned}$$

3 Calculation of the weighted apparent ring density (WRD)

$$WRD_{ring1} = \frac{RD_{ring1} * g_{ring1}}{g_{ring1}}$$

$$WRD_{ring2} = \frac{RD_{ring1} * g_{ring1} + RD_{ring2} * g_{ring2}}{g_{ring1} + g_{ring2}}$$

$$WRD_{ring3} = \frac{RD_{ring1} * g_{ring1} + RD_{ring2} * g_{ring2} + RD_{ring3} * g_{ring3}}{g_{ring1} + g_{ring2} + g_{ring3}}$$

$$WRD_{ring4} = \frac{RD_{ring1} * g_{ring1} + RD_{ring2} * g_{ring2} + RD_{ring3} * g_{ring3} + RD_{ring4} * g_{ring4}}{g_{ring1} + g_{ring2} + g_{ring3} + g_{ring4}}$$

$$WRD_{ring5} = \frac{RD_{ring1} * g_{ring1} + RD_{ring2} * g_{ring2} + RD_{ring3} * g_{ring3} + RD_{ring4} * g_{ring4} + RD_{ring5} * g_{ring5}}{g_{ring1} + g_{ring2} + g_{ring3} + g_{ring4} + g_{ring5}}$$

$$WRD_{ring6} = \frac{RD_{ring1} * g_{ring1} + RD_{ring2} * g_{ring2} + RD_{ring3} * g_{ring3} + RD_{ring4} * g_{ring4} + RD_{ring5} * g_{ring5} + RD_{ring6} * g_{ring6}}{g_{ring1} + g_{ring2} + g_{ring3} + g_{ring4} + g_{ring5} + g_{ring6}}$$

$$WRD_{ring7} = \frac{RD_{ring1} * g_{ring1} + RD_{ring2} * g_{ring2} + RD_{ring3} * g_{ring3} + RD_{ring4} * g_{ring4} + RD_{ring5} * g_{ring5} + RD_{ring6} * g_{ring6} + RD_{ring7} * g_{ring7}}{g_{ring1} + g_{ring2} + g_{ring3} + g_{ring4} + g_{ring5} + g_{ring6} + g_{ring7}}$$

$$WRD_{ring8} = \frac{RD_{ring1} * g_{ring1} + RD_{ring2} * g_{ring2} + RD_{ring3} * g_{ring3} + RD_{ring4} * g_{ring4} + RD_{ring5} * g_{ring5} + RD_{ring6} * g_{ring6} + RD_{ring7} * g_{ring7} + RD_{ring8} * g_{ring8}}{g_{ring1} + g_{ring2} + g_{ring3} + g_{ring4} + g_{ring5} + g_{ring6} + g_{ring7} + g_{ring8}}$$

$$WRD_{ring9} = \frac{RD_{ring1} * g_{ring1} + RD_{ring2} * g_{ring2} + RD_{ring3} * g_{ring3} + RD_{ring4} * g_{ring4} + RD_{ring5} * g_{ring5} + RD_{ring6} * g_{ring6} + RD_{ring7} * g_{ring7} + RD_{ring8} * g_{ring8} + RD_{ring9} * g_{ring9}}{g_{ring1} + g_{ring2} + g_{ring3} + g_{ring4} + g_{ring5} + g_{ring6} + g_{ring7} + g_{ring8} + g_{ring9}}$$

$$WRD_{ring10} = \frac{RD_{ring1} * g_{ring1} + RD_{ring2} * g_{ring2} + RD_{ring3} * g_{ring3} + RD_{ring4} * g_{ring4} + RD_{ring5} * g_{ring5} + RD_{ring6} * g_{ring6} + RD_{ring7} * g_{ring7} + RD_{ring8} * g_{ring8} + RD_{ring9} * g_{ring9} + RD_{ring10} * g_{ring10}}{g_{ring1} + g_{ring2} + g_{ring3} + g_{ring4} + g_{ring5} + g_{ring6} + g_{ring7} + g_{ring8} + g_{ring9} + g_{ring10}}$$

$$WRD_{ring11} = \frac{RD_{ring1} * g_{ring1} + RD_{ring2} * g_{ring2} + RD_{ring3} * g_{ring3} + RD_{ring4} * g_{ring4} + RD_{ring5} * g_{ring5} + RD_{ring6} * g_{ring6} + RD_{ring7} * g_{ring7} + RD_{ring8} * g_{ring8} + RD_{ring9} * g_{ring9} + RD_{ring10} * g_{ring10} + RD_{ring11} * g_{ring11}}{g_{ring1} + g_{ring2} + g_{ring3} + g_{ring4} + g_{ring5} + g_{ring6} + g_{ring7} + g_{ring8} + g_{ring9} + g_{ring10} + g_{ring11}}$$

Fig. A2 Relationship between annual growth ring width (GRW) and mean growth ring density (WRD) in the position of DBH over 10 years (2012 to 2021) by groups of *T. vulgaris* trees

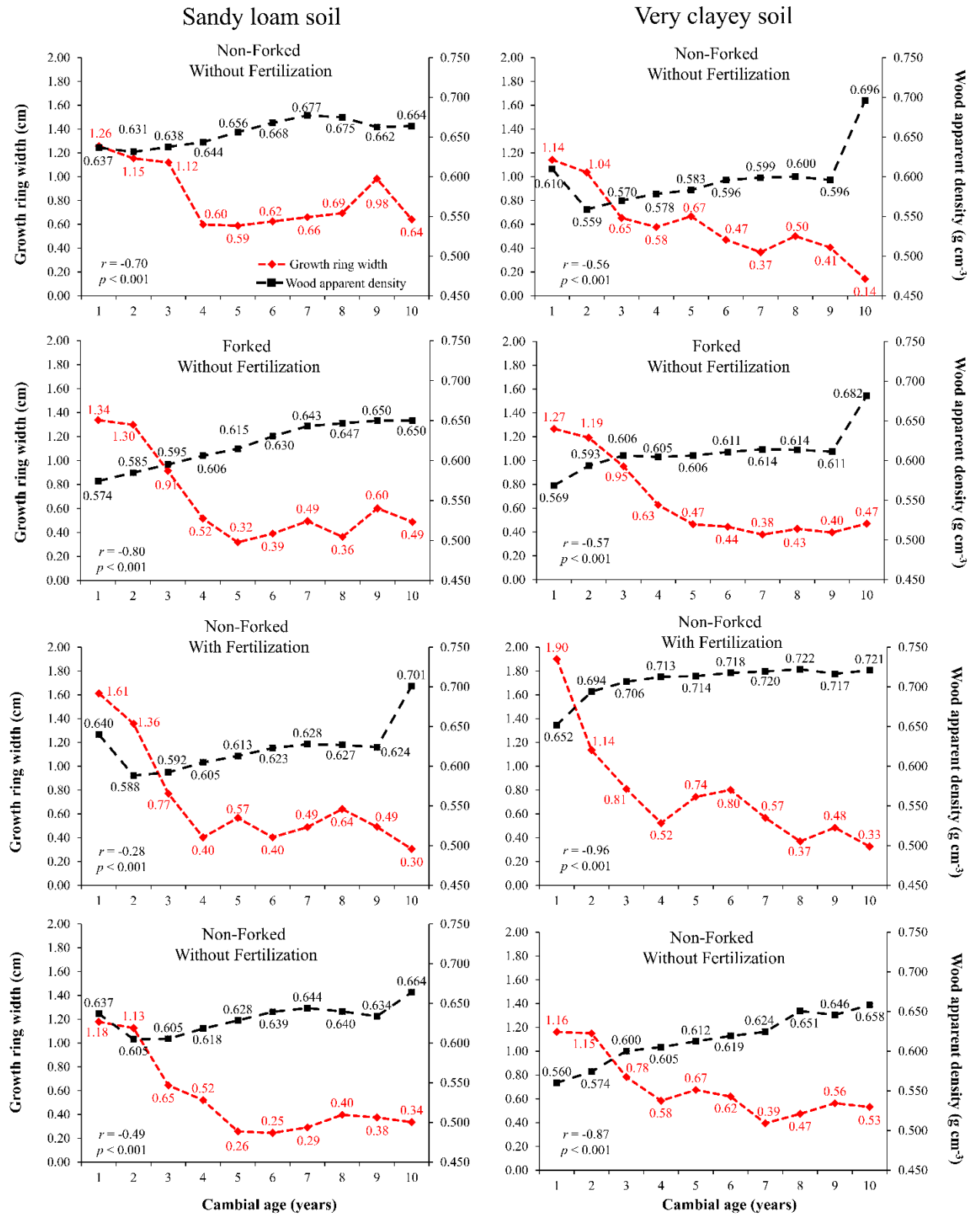
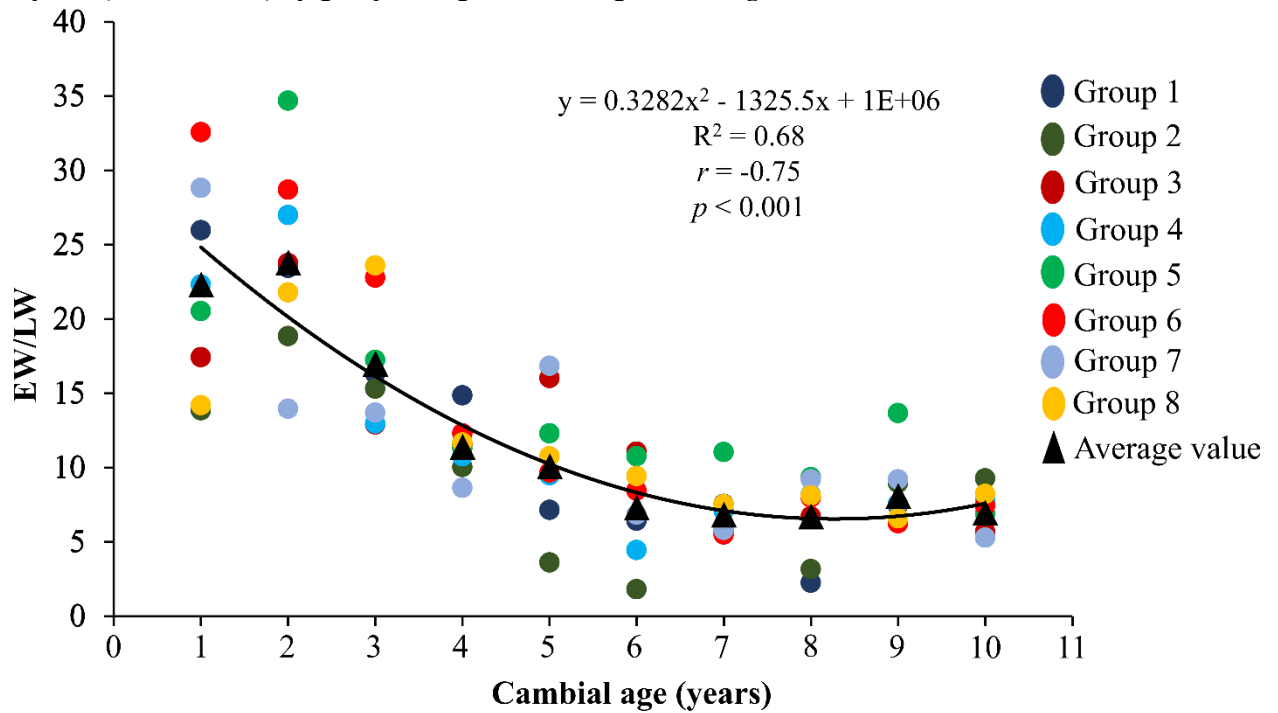


Fig. A3 Relationship between earlywood and latewood widths (EW/LW) in the position of DBH over 10 years (2012 to 2021) by groups and general average of *T. vulgaris* trees



group 1: non-forked trees + sandy loam soil + without fertilization, group 2: forked trees + sandy loam soil + without fertilization, group 3: non-forked trees + sandy loam soil + with fertilization, group 4: forked trees + sandy loam soil + with fertilization, group 5: non-forked trees + very clayey soil + without fertilization, group 6: forked trees + very clayey soil + without fertilization, group 7: non-forked trees + very clayey soil + with fertilization, group 8: forked trees + very clayey soil + with fertilization

APÊNDICE B

Fig. B1 Perfil de variação longitudinal e radial de cálcio (Ca) em árvores não bifurcadas de *T. vulgaris*.
CPS = contagens por segundo (30 s)

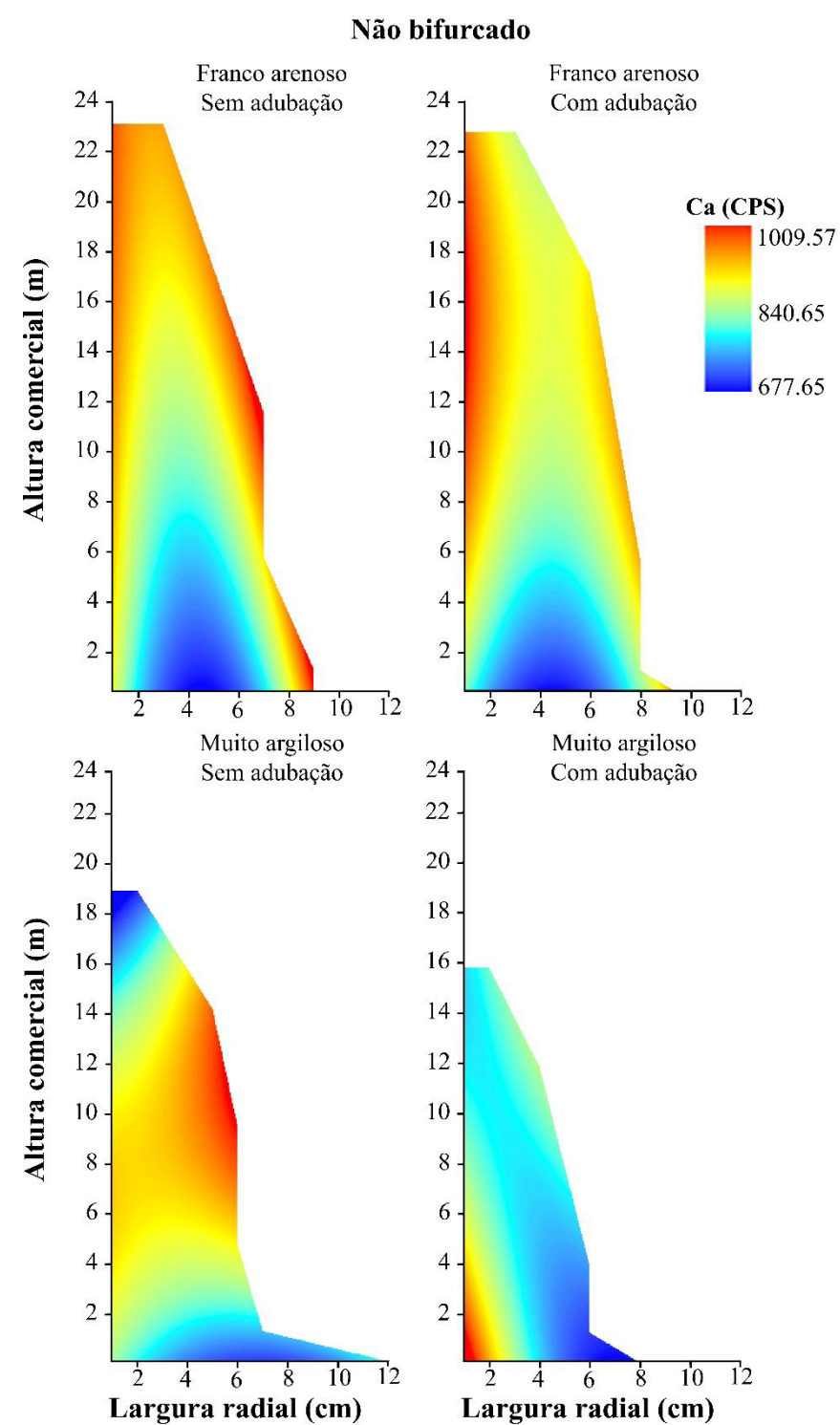


Fig. B2 Perfil de variação longitudinal e radial de cálcio (Ca) em árvores bifurcadas de *T. vulgaris*. CPS = contagens por segundo (30 s)

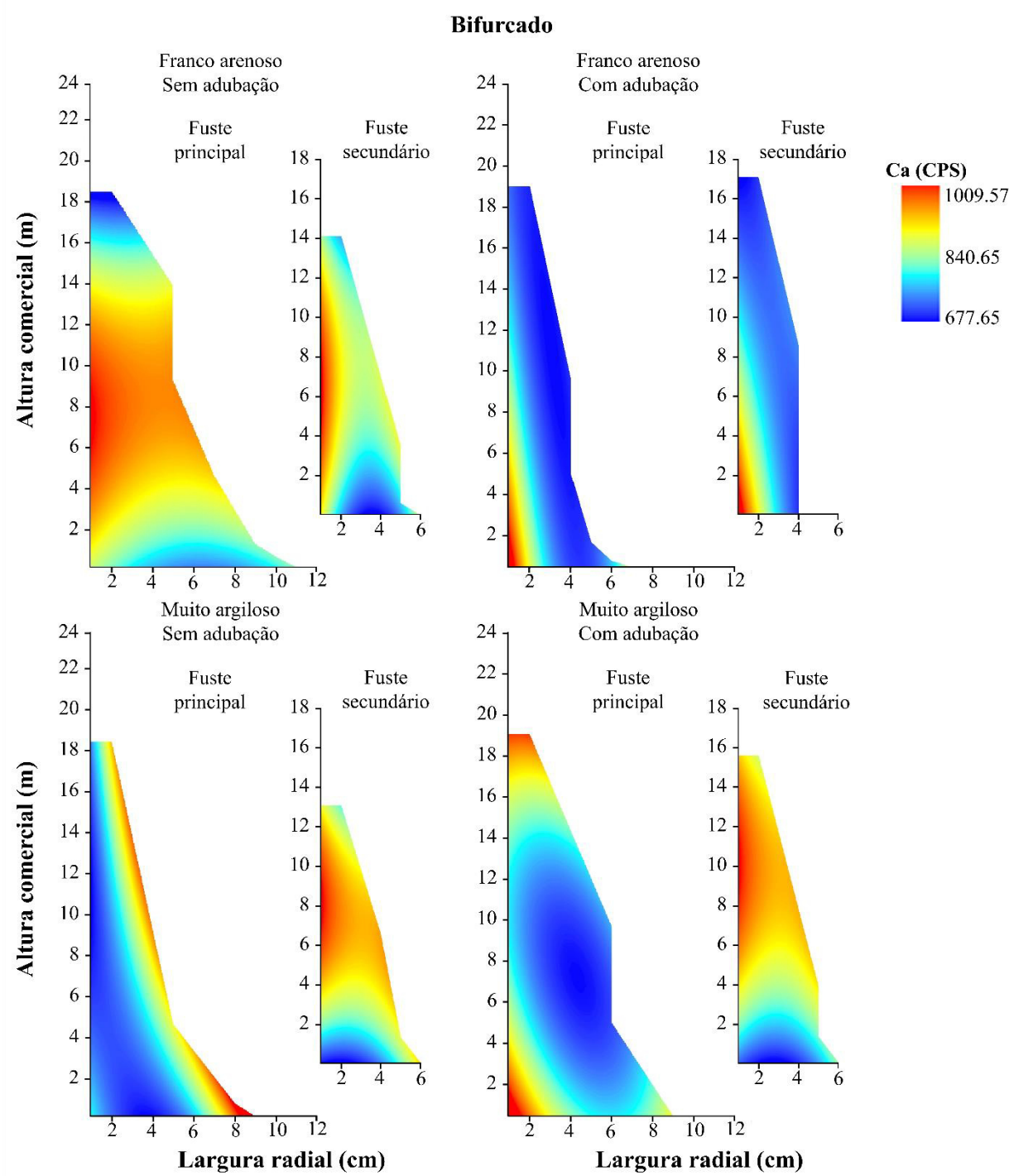


Fig. B3 Perfil de variação longitudinal e radial de enxofre (S) em árvores não bifurcadas de *T. vulgaris*.
CPS = contagens por segundo (30 s)

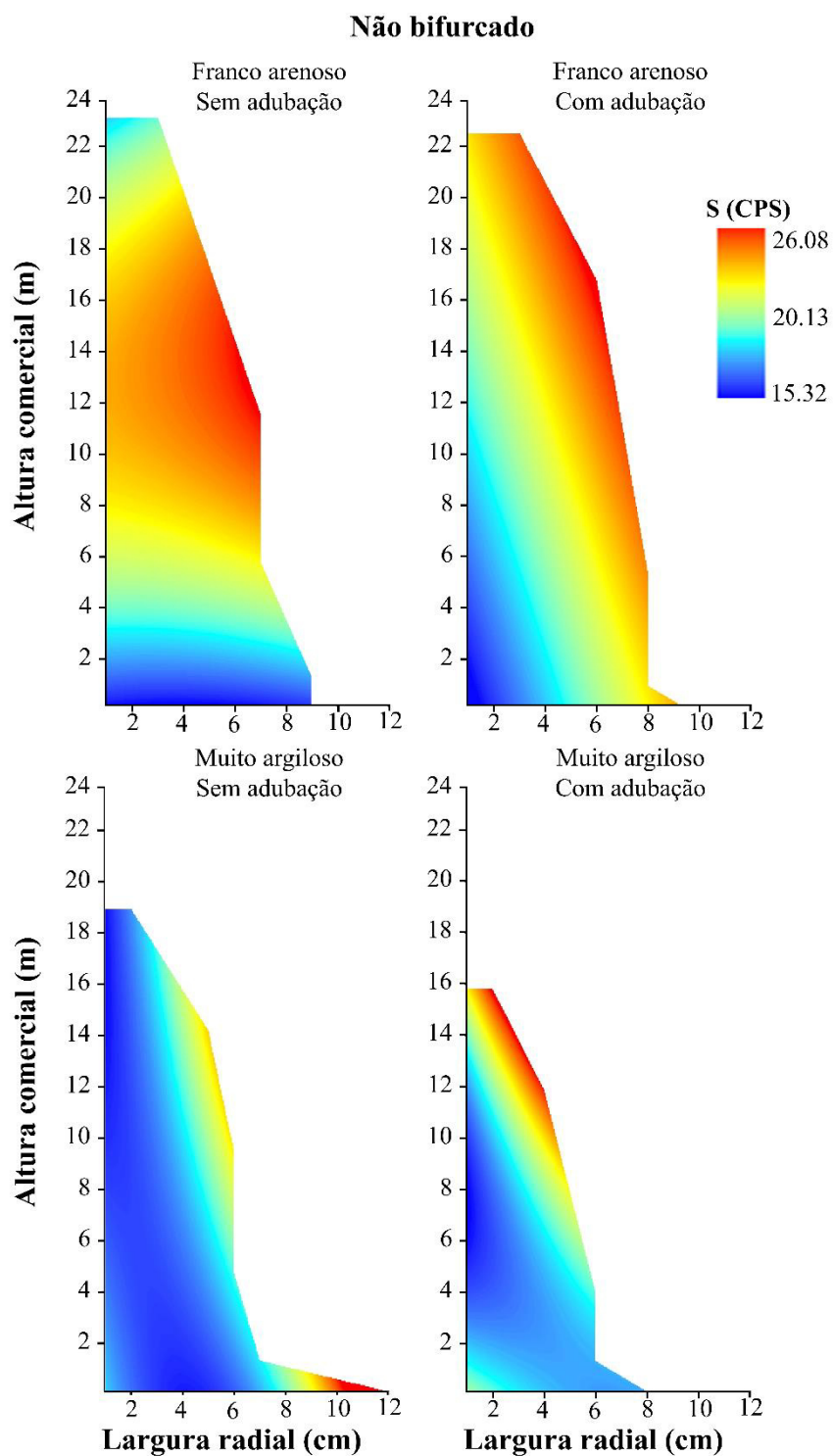


Fig. B4 Perfil de variação longitudinal e radial de enxofre (S) em árvores bifurcadas de *T. vulgaris*. CPS = contagens por segundo (30 s)

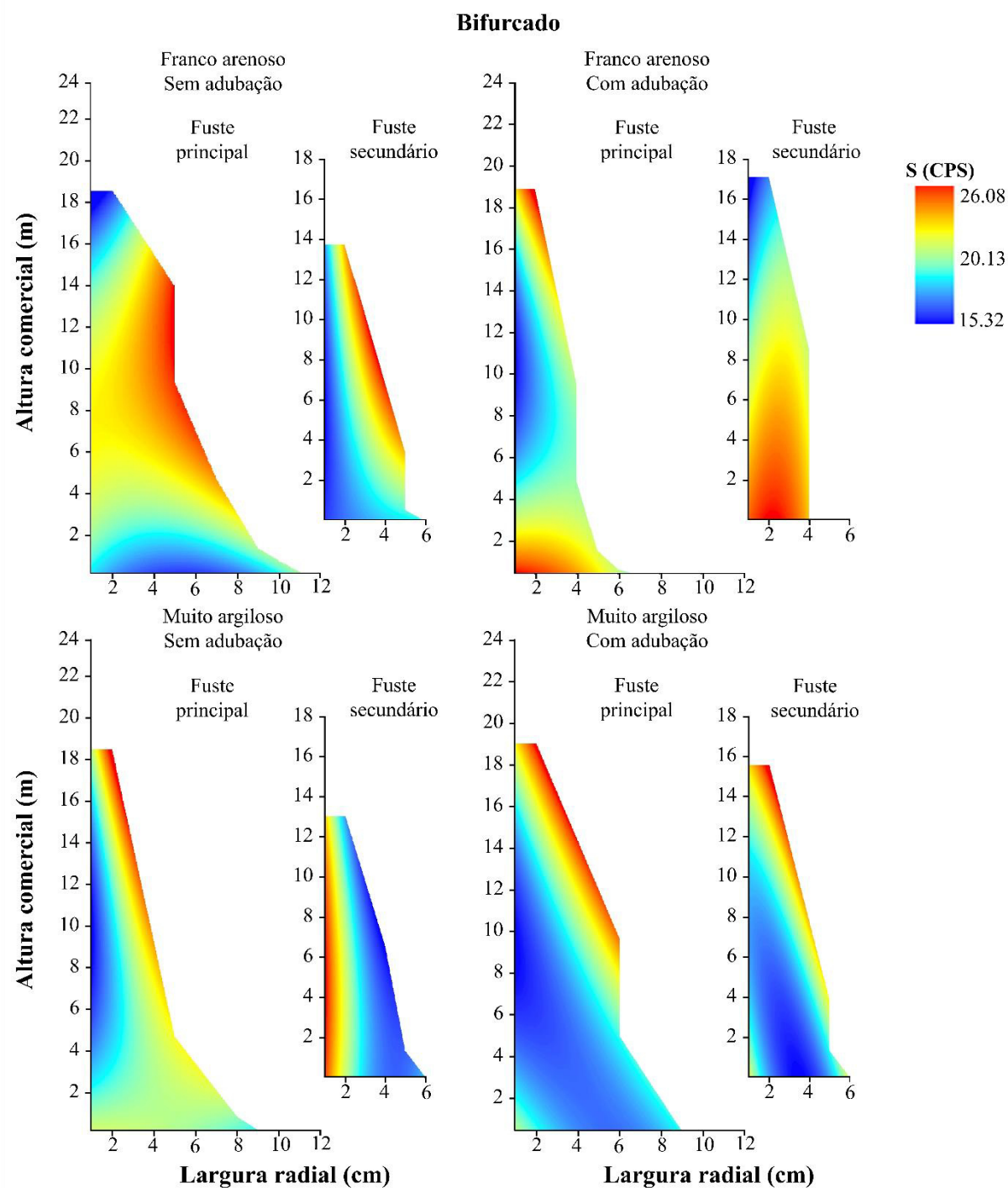


Fig. B5 Perfil de variação longitudinal e radial de silício (Si) em árvores não bifurcadas de *T. vulgaris*. CPS = contagens por segundo (30 s)

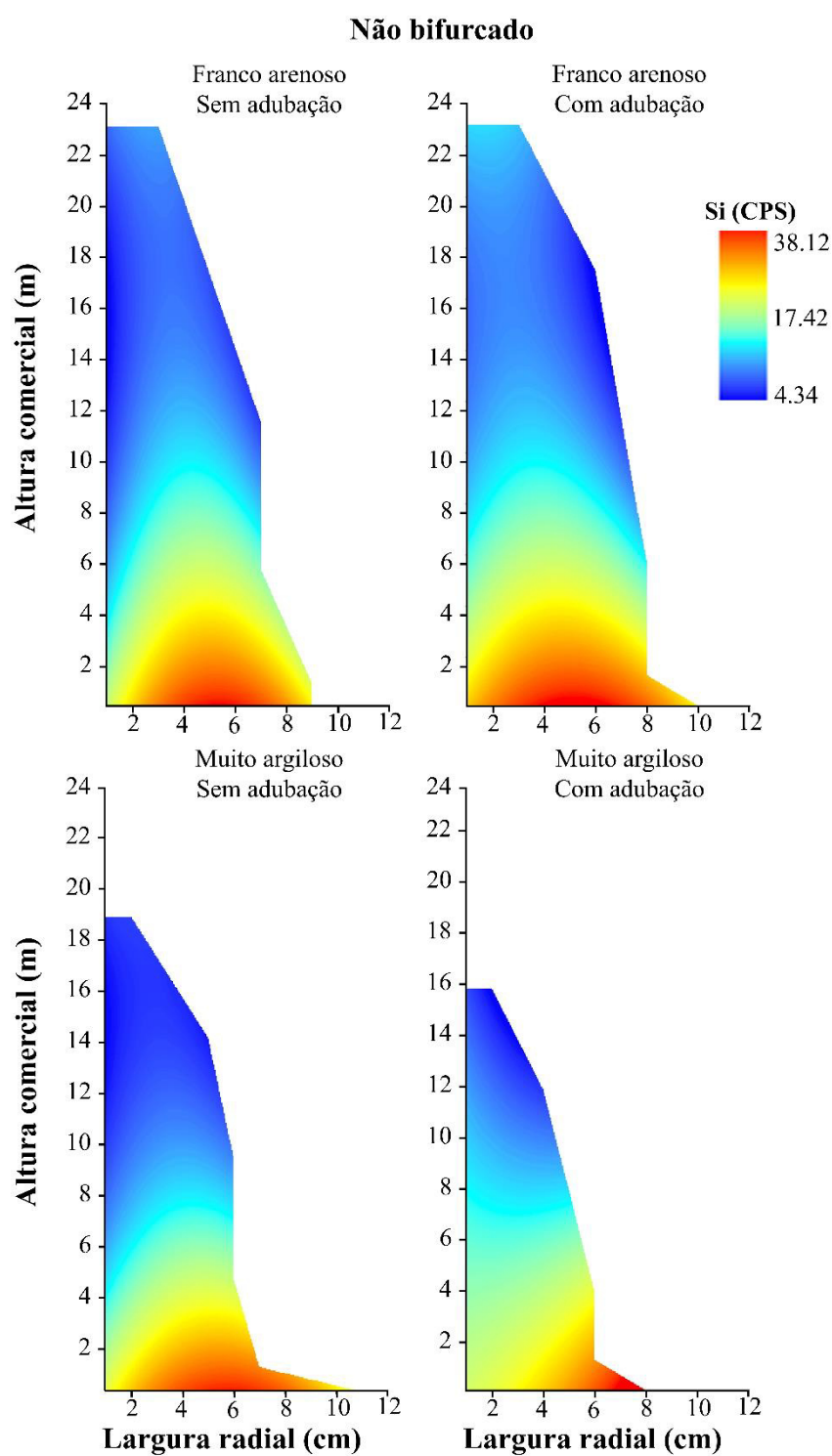


Fig. B6 Perfil de variação longitudinal e radial de silício (Si) em árvores bifurcadas de *T. vulgaris*. CPS = contagens por segundo (30 s)

