



**ELVIS VIEIRA DOS SANTOS**

**EFEITOS DO SOLO, ADUBAÇÃO E TIPO DE FUSTE NOS  
PARÂMETROS DE PRODUÇÃO E QUALIDADE DA MADEIRA  
DE *Tachigali vulgaris* VISANDO FINS ENERGÉTICOS**

**LAVRAS – MG  
2024**

**ELVIS VIEIRA DOS SANTOS**

**EFEITOS DO SOLO, ADUBAÇÃO E TIPO DE FUSTE NOS PARÂMETROS DE  
PRODUÇÃO E QUALIDADE DA MADEIRA DE *Tachigali vulgaris* VISANDO FINS  
ENERGÉTICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio

Orientador

Prof. Dr. Álvaro Augusto Vieira Soares

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho

Coorientadores

**LAVRAS – MG  
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Santos, Elvis Vieira dos.

Efeitos do solo, adubação e tipo de fuste nos parâmetros de produção e qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris* visando fins energéticos / Elvis Vieira dos Santos. - 2024.

108 p. : il.

Orientador(a): Thiago de Paula Protásio.

Coorientador(a): Álvaro Augusto Vieira Soares, Paulo  
Fernando Trugilho.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Energia da biomassa. 2. Fertilização. 3. Florestas energéticas.  
I. Protásio, Thiago de Paula. II. Soares, Álvaro Augusto Vieira. III.  
Trugilho, Paulo Fernando. IV. Título.

**ELVIS VIEIRA DOS SANTOS**

**EFEITOS DO SOLO, ADUBAÇÃO E TIPO DE FUSTE NOS PARÂMETROS DE  
PRODUÇÃO E QUALIDADE DA MADEIRA DE *Tachigali vulgaris* VISANDO FINS  
ENERGÉTICOS**

**EFFECTS OF SOIL, FERTILIZATION, AND STEM TYPE ON THE PRODUCTION  
AND QUALITY PARAMETERS OF *Tachigali vulgaris* WOOD FOR ENERGY  
PURPOSES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira para obtenção do título de Mestre.

APROVADO em 15 de fevereiro de 2024

Prof. Dra. Lina Bufalino - UFRA

Prof. Dr. Sérgio Henrique Godinho Silva - UFLA

Prof. Dr. Flávio Henrique Silveira Rabêlo - UFLA

Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio - UFLA

Orientador

Prof. Dr. Álvaro Augusto Vieira Soares - UFU

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho - UFLA

Coorientadores

**LAVRAS – MG  
2024**

## **Agradecimentos**

À minha família pelo amparo e por sempre me estimular ao estudo, desde que me lembro.

À Eliana Martins de Sousa pelo apoio e carinho.

Aos amigos que adquiri durante a pós-graduação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio, por todos os ensinamentos, orientação e incentivo. É um exemplo de profissional e cientista que sempre me norteará.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho pelos conselhos e apoio nas análises do material de pesquisa.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Álvaro Augusto Vieira Soares pelas contribuições na análise e consistência dos dados de inventário.

A todos os meus professores da graduação e pós-graduação pelo compartilhamento de seus conhecimentos e experiências profissionais.

À Universidade Federal de Lavras e às instituições de fomento Capes, CNPq e FAPEMIG. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao laboratório de ecologia florestal pela ajuda no acabamento dos discos para análise da proporção de cerne e alburno.

Ao laboratório de nutrição mineral de plantas e departamento de ciências do solo, pelo apoio nas análises de ICP-OES e em pXRF

À Embrapa pelo suporte técnico na coleta de dados e disponibilidade em nos ajudar sempre, especialmente aos pesquisadores Delman de Almeida Gonçalves e Arystides Resende Silva.

À empresa Jari Celulose S/A pela parceria durante a realização da coleta de dados.

Aos membros da banca, Prof. Dra. Lina Bufalino, Prof. Dr. Flávio Henrique Silveira Rabêlo e Prof. Dr. Sérgio Henrique Godinho Silva pelas contribuições na melhoria deste estudo.

Muito obrigado!

## RESUMO

As discussões atuais sobre mudanças climáticas exigem pesquisas que ampliem a utilização de fontes sustentáveis de energia. *Tachigali vulgaris* é uma espécie sul-americana cuja madeira vem sendo amplamente estudada para finalidade energética. Apesar de estudos anteriores mostrarem que o lenho de *T. vulgaris* apresenta características promissoras, aspectos silviculturais, como a adubação e seus efeitos na qualidade da madeira e crescimento da espécie, são desconhecidos. Além disso, é essencial compreender o efeito de bifurcações, comumente encontradas na espécie, nas características de sua madeira. O objetivo deste estudo é avaliar os efeitos do solo, adubação e bifurcação na produtividade e qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris*. A pesquisa foi realizada em 2 plantações experimentais de *T. vulgaris* localizadas no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, mesorregião do baixo Amazonas, estado do Pará, Brasil. As plantações têm diferentes texturas de solos: Latossolo amarelo textura franco arenosa e Latossolo amarelo textura argilosa. O experimento foi instalado em 2010 e tem espaçamento de 3x2 m entre árvores. Foram considerados 4 blocos por área e 3 testes de adubação: a testemunha, em que não houve adubação com fósforo e potássio; o tratamento 2, em que se adubou apenas com fósforo; e o tratamento 3, em que se adubou com fósforo e potássio. Em cada teste foram amostradas uma árvore com fuste único e uma árvore bifurcada. A dissertação foi dividida em 2 capítulos: o primeiro discute o efeito dos tratamentos nas características da madeira e carvão vegetal produzido a partir da espécie, e o segundo discute o efeito da composição inorgânica presente no lenho na qualidade da madeira para geração de energia térmica. Foram realizadas análises da densidade básica da madeira, teor de cinzas, poder calorífico, teor de extrativos, teor de lignina e componentes inorgânicos presentes na madeira. A partir do lenho da espécie também foi produzido carvão vegetal. Para este carvão vegetal foram avaliados os rendimentos, densidade aparente, composição química imediata e o poder calorífico superior. Os resultados não mostram efeitos dos tratamentos avaliados na densidade básica. Madeiras com diâmetro à altura do peito (DAP) menor que 15 cm apresentaram densidade abaixo de 0,500 g/cm<sup>3</sup>. Houve efeito dos parâmetros avaliados nas cinzas (0,35%, base seca - bs), extrativos totais (4,65% (bs) e lignina total (31,34%, bsle). Os parâmetros de crescimento têm grande efeito na produtividade energética (2,65 GJ/árvore) e devem ser considerados na avaliação do potencial da espécie para composição de plantios energéticos. A composição inorgânica presente na madeira afetou as características de crescimento e qualidade do lenho, além de apresentar implicações importantes no uso da madeira da espécie para energia, principalmente devido à ausência de K<sub>2</sub>O e aos altos valores de F<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (9,32%) e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (39,73%) estimados para as cinzas. O estudo mostra que as características da madeira da espécie são adequadas para uso energético. No entanto, a grande variação do volume não deve ser ignorada, pois afeta a produtividade energética da madeira e carvão vegetal.

Palavras-chave: desenvolvimento sustentável; lenha; Bioenergia.

## ABSTRACT

Current discussions on climate change require research that scales up the use of sustainable energy sources. *Tachigali vulgaris* is a South American species whose wood has been widely studied for energy purposes. Although previous studies have shown that *T. vulgaris* wood has promising characteristics, silvicultural aspects, such as fertilization and its effects on wood quality and species growth, are unknown. In addition, it is essential to understand the effect of bifurcations, commonly found in the species, on the characteristics of its wood. The aim of this study is to evaluate the effects of soil, fertilization, and bifurcation on the yield and quality of *Tachigali vulgaris* wood. The research was carried out in 2 experimental plantations of *T. vulgaris* located in the mesoregion of the lower Amazon, state of Pará, Brazil. The plantations have different soil textures: Yellow Latosol sandy loam texture and Yellow Latosol clay texture. The experiment was installed in 2010 and has a spacing of 3x2 m between trees. 4 blocks per area and 3 fertilization tests were considered: the control, in which there was no fertilization with phosphorus and potassium; treatment 2, in which only phosphorus was fertilized; and treatment 3, in which phosphorus and potassium were fertilized. In each test, a tree with a single stem and a bifurcated tree were sampled. The dissertation was divided into 2 chapters: the first discusses the effect of the treatments on the characteristics of the wood and charcoal produced from the species, and the second discusses the effect of the inorganic composition present in the wood on the quality of the wood for thermal energy generation. Analyses of the basic density of the wood, ash content, calorific value, extractive content, lignin content and inorganic components present in the wood were analyzed. Charcoal was also produced from the wood of the species. For this charcoal, yields, bulk density, immediate chemical composition and superior calorific value were evaluated. The results do not show effects of the evaluated treatments on the basal density. Woods with a diameter at breast height (DBH) less than 15 cm had a density below 0.500 g/cm<sup>3</sup>. There was an effect of the evaluated parameters on ash (0.35%, dry basis - db), total extractives (4.65% (db) and total lignin (31.34%, efd). Growth parameters have a great effect on energy productivity (2.65 GJ/tree) and should be considered in the evaluation of the potential of the species for energy plantation composition. The inorganic composition present in the wood affected the growth characteristics and quality of the wood, in addition to presenting important implications in the use of the wood of the species for energy, mainly due to the absence of K<sub>2</sub>O and the high values of F<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (9.32%) and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (39.73%) estimated for the ashes. The study shows that the characteristics of the species' wood are suitable for energy use. However, the large variation in volume should not be ignored, as it affects the energy productivity of wood and charcoal.

**Keywords:** sustainable development; firewood; bioenergy.

## INDICADORES DE IMPACTO

A presente pesquisa faz parte da rede de pesquisa interinstitucional entre a UFRA, Esalq, EMBRAPA, UFU, UFAM, UFLA e outras importantes instituições brasileiras, denominada "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" código: PIPB146-2017. O tema da pesquisa está relacionado aos objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU: (i) energia acessível e limpa; (ii) cidades e comunidades sustentáveis; (iii) consumo e produção responsáveis; e (iv) combate às mudanças climáticas. Nosso estudo contribui para a implantação de florestas energéticas na região amazônica, focando na fertilização e seus impactos na qualidade da madeira para energia. Esses fatores são essenciais para a implantação de plantios florestais. A madeira é um combustível renovável que pode ser utilizado como alternativa aos combustíveis fósseis nas indústrias e comunidades isoladas na Amazônia. Além disso, as florestas energéticas estocam carbono contribuindo para a minimização das mudanças climáticas.

## IMPACT INDICATORS

This research is part of the interinstitutional research network among UFRA, Esalq, EMBRAPA, UFU, UFAM, UFLA, and other important Brazilian institutions, called "Brazilian Research Network on Growth and Wood Quality of the *Tachigali vulgaris* (tachi-branco) Species from Homogeneous Plantations for Bioenergy Generation in the Amazon" code: PIPB146-2017 The research theme is related to the UN Sustainable Development Goals: (i) affordable and clean energy; (ii) sustainable cities and communities; (iii) responsible consumption and production; and (iv) climate action. Our study contributes to the implementation of energy forests in the Amazon region, focusing on fertilization and its impacts on wood quality for energy. These factors are essential for the establishment of forest plantations. Wood is a renewable fuel that can be used as an alternative to fossil fuels in industries and isolated communities in the Amazonia. Additionally, energy forests store carbon, contributing to the mitigation of climate change.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>11</b>
2.1 Objetivo geral.....	11
2.2 Objetivos específicos .....	11
2.2.1 Artigo 1: .....	11
2.2.2 Artigo 2: .....	12
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>12</b>
3.1 <i>Tachigali vulgaris</i> .....	12
3.2 Variação da densidade básica da madeira e crescimento das árvores.....	18
3.2.1 Densidade básica como fator genético .....	18
3.2.2 Densidade básica da madeira ao longo do fuste .....	19
3.2.3 Influência das condições edafoclimáticas no crescimento e densidade básica..	21
3.2.4 Efeito da adubação na densidade básica e crescimento das árvores .....	24
3.3 Sustentabilidade das biomassas florestais para uso energético .....	26
3.4 Variação das propriedades químicas da madeira e carvão: implicações na qualidade para fins bioenergéticos .....	27
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>30</b>
<b>ARTIGO 1: EFEITO DA ADUBAÇÃO, TEXTURA DE SOLO E BIFURCAÇÃO NA     QUALIDADE DA MADEIRA E PRODUTIVIDADE DE FLORESTAS     ENERGÉTICAS DE <i>T. vulgaris</i> NA AMAZÔNIA .....</b>	<b>37</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>38</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>39</b>
2.1 Área experimental da pesquisa.....	39
2.2 Amostragem das árvores e do lenho de <i>T. vulgaris</i> .....	42
2.4 Produtividade do plantio de <i>T. vulgaris</i> .....	44
2.5 Estimativa de massa de lignina, produtividade e densidade energética da madeira de <i>Tachigali vulgaris</i> .....	45
Values in parentheses are the standard deviation .....	46
2.6 Produção e qualidade do carvão vegetal de <i>T. vulgaris</i> em laboratório .....	46
2.7 Análise estatística dos dados .....	49
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>50</b>
3.1 Aspectos de crescimento individual de <i>Tachigali vulgaris</i> .....	50
3.2 Variação da densidade da madeira de <i>Tachigali vulgaris</i> .....	52
<b>3.3 Propriedades químicas e energéticas da madeira da espécie <i>T. vulgaris</i>.....</b>	<b>57</b>
3.4 Parâmetros de produtividade da madeira de <i>T. vulgaris</i> .....	62
3.5 Qualidade do carvão vegetal produzido a partir da madeira de <i>T. vulgaris</i> .....	65
3.6 Rendimentos e parâmetros químicos do carvão vegetal de <i>T. vulgaris</i> .....	66

3.7 Parâmetros de produtividade do carvão vegetal de <i>Tachigali vulgaris</i> .....	70
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>75</b>
<b>ARTIGO 2: IMPACTO DA COMPOSIÇÃO INORGÂNICA DA MADEIRA DE <i>T. vulgaris</i> PARA GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA</b> .....	<b>80</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>81</b>
<b>2 METODOLOGIA</b> .....	<b>82</b>
2.1 Áreas de estudo do experimento de adubação de <i>T. vulgaris</i> .....	82
2.2 Amostragem das árvores e do lenho de <i>T. vulgaris</i> .....	85
2.3 Determinação dos elementos inorgânicos na madeira de <i>T. vulgaris</i> por espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP OES) ...	86
2.4 Comparação com a análise de ICP-OES com dados de fluorescência de raio x.....	87
2.5 Determinação da exportação de nutrientes pelo uso da madeira de <i>T. vulgaris</i> .....	88
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>91</b>
3.1 Concentrações de nutrientes .....	91
3.1 Capacidade do equipamento de Fluorescência de Raios X Portátil em prever os nutrientes na madeira de <i>T. vulgaris</i> .....	96
3.2 Exportação de nutrientes na utilização da madeira de <i>T. vulgaris</i> .....	98
<b>4 CONCLUSÃO</b> .....	<b>106</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>106</b>
<b>CONCLUSÕES GERAIS</b> .....	<b>109</b>
<b>LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS</b> .....	<b>110</b>

## PRIMEIRA PARTE

### 1 INTRODUÇÃO

As discussões atuais sobre as mudanças climáticas exigem estudos que fomentem a utilização de fontes sustentáveis de energia. As biomassas florestais se adequam a essas discussões. É amplamente aceito que a utilização energética da madeira reduz as emissões de carbono em relação aos combustíveis fósseis (Bosch; van de Pol; Philp, 2015). Em diversos casos, a substituição de combustíveis não renováveis por produtos oriundos da biomassa é viável na indústria siderúrgica, produção de energia elétrica em termelétricas e geração de calor (Jahanshahi *et al.*, 2015; Lima *et al.*, 2020a). Em relação à densidade energética, o carvão vegetal pode corresponder entre 65% e 71% da energia armazenada na mesma massa de óleo combustível (Lima *et al.*, 2020a). Além disso, as emissões de gases poluentes são reduzidas. Estudos do ciclo de vida da utilização de carvão vegetal em substituição ao carvão mineral em siderúrgicas mostram uma redução de até 1,11 toneladas de CO<sub>2</sub> emitidos por tonelada de ferro produzido (Jahanshahi *et al.*, 2015). Combustíveis fósseis lançam carbono estocado por milhões de anos no solo para a atmosfera. Já a biomassa emite carbono fixado oriundo do seu crescimento. Em plantios florestais visando à utilização energética, o carbono é novamente estocado durante a próxima rotação (Crow *et al.*, 2016).

O grande desafio da utilização da madeira é garantir a produtividade e qualidade desse material. No Brasil, a maior parte de carvão vegetal é oriundo de floresta energética de clones de espécies do gênero *Eucalyptus*, o que garante homogeneidade dos plantios em relação a produtividade da madeira (IBÁ, 2022). No entanto, estes plantios estão concentrados no sudeste do país e não garantem o fornecimento de carvão vegetal para regiões com característica edafoclimáticas específicas como a Amazônia (IBÁ, 2022). A região Amazônica apresenta locais isolados em que a energia é fornecida por meio de combustíveis fósseis. Além disso, apresenta polos siderúrgicos importantes para o país que necessitam de carvão vegetal.

Nesse sentido, o tachi branco (*Tachigali vulgaris*) é uma espécie promissora, pois está adaptada aos solos ácidos da Amazônia, apresenta alta deposição de serapilheira e, por ser uma espécie pioneira, rápido crescimento (Farias *et al.*, 2016). A produção e qualidade da

madeira da espécie foi estudada em experimentos de espaçamento de plantio (Barros-Junior *et al.*, 2022; Silva, M. O. S. *et al.*, 2021). Verificou-se que a densidade básica da madeira de tachi pode variar, em média, entre 0,419 g/cm<sup>3</sup> e 0,606 g/cm<sup>3</sup> (Barros-Junior *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2021); apresenta 19,7 MJ/kg e teor de cinzas abaixo de 1% (Silva, M. O. S. *et al.*, 2021). Quanto ao crescimento são encontrados incrementos médios anuais de 20 m<sup>3</sup>/ha.ano para a espécie aos 6 anos (Rodrigues *et al.*, 2021). Aos 7 anos de plantio, a espécie produz até 250 m<sup>3</sup>/ha em espaçamentos 4,5 m<sup>2</sup>. Em espaçamentos mais amplos (com menor número de árvore por hectare), a produção chega a 150 m<sup>3</sup>/ha (Silva, M. O. S. *et al.*, 2021). Em diferentes texturas de solos, o volume de madeira variou entre 170 m<sup>3</sup>/ha e 200 m<sup>3</sup>/ha (Teixeira *et al.*, 2024).

*Tachigali vulgaris* tem uma grande dispersão, ocorrendo na Bolívia e Brasil, principalmente na região da Amazônia e Cerrado (Macedo *et al.*, 2014; Van der Werff, 2008). Além disso, outras espécies de *Tachigali* ocorrem em uma ampla distribuição na América do Sul (Van der Werff, 2008), indicando o potencial do gênero, assim como *Eucalyptus*, para ser cultivada em outros locais do mundo.

Apesar do potencial da espécie para utilização em plantios florestais, informações importantes para validar sua utilização comercial são incipientes. Faltam informações sobre o efeito da adubação na qualidade da madeira da espécie para uso energético, assim como o efeito de diferentes texturas de solo (Teixeira *et al.*, 2024). Além disso, a espécie comumente apresenta bifurcações que podem afetar a qualidade da madeira (Barros-Junior *et al.*, 2022). Dessa forma, são necessários estudos que forneçam essas informações para viabilizar a utilização sustentável da espécie.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar os efeitos do solo, adubação e bifurcação na produtividade e qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris*.

### **2.2 Objetivos específicos**

#### **2.2.1 Artigo 1:**

- Verificar se existe efeitos do solo, tipo de fuste e adição de diferentes níveis de superfosfato triplo e cloreto de potássio na qualidade da madeira e carvão vegetal produzido a partir da espécie *T. vulgaris*.

- Verificar as relações entre a qualidade da madeira e carvão vegetal com as características de crescimento da espécie *T. vulgaris*.

### 2.2.2 Artigo 2:

- Avaliar o efeito da composição inorgânica do lenho na qualidade da madeira destinada a conversão energética por processos termoquímicos.
- Avaliar a eficácia do equipamento portátil de fluorescência de raios X (pXRF) na predição dos inorgânicos na madeira de *T. vulgaris*.
- Avaliar a exportação de nutrientes em diferentes níveis de adubação, solo e tipos de fuste em plantios de *T. vulgaris*.

## 3 REVISÃO DE LITERATURA

### 3.1 *Tachigali vulgaris*

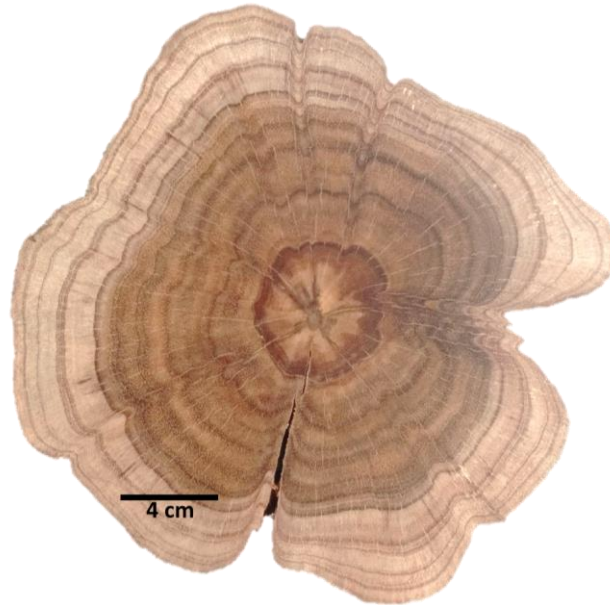
*Tachigali vulgaris* LG Silva & HC Lima, anteriormente conhecida como *Sclerobium paniculatum* (Vogel) (Silva; Lima, 2007), é uma espécie sul-americana da família Fabaceae conhecida vulgarmente como tachi branco, carvoeiro ou cachamorra branca. A espécie está presente na região amazônica e cerrado (Van der Werff, 2008). Filogeneticamente, *Tachigali* é um gênero recente da subfamília Caesalpinioideae (Bruneau *et al.*, 2001). Surgiu depois de gêneros comercialmente utilizados como *Acacia* e *Inga*, há 10 milhões de anos (Bruneau *et al.*, 2001; Sprent; Ardley; James, 2017). Nesse período, as temperaturas eram pelo menos 2 °C acima do atual (Zachos; Dickens; Zeebe, 2008). É importante investir em espécies florestais que tolerem, ou que possam ser melhoradas geneticamente para tolerar, condições edafoclimáticas desfavoráveis. Essas informações podem ser utilizadas como indicação da resistência da espécie às mudanças climáticas, por exemplo (Dick *et al.*, 2013).

Há evidências de que espécies com fixação de nitrogênio por meio de simbiose com bactérias, como é o caso do tachi, tem certa resistência à estresse hídrico (Adams *et al.*, 2016). As bactérias do gênero *Rhizobium* conseguem proteger as células e proteínas das plantas do choque osmótico e calor sob estresse hídrico por meio do acúmulo de dissacarídeos trealose durante a nodulação (Sharma *et al.*, 2020). Entretanto, isso não implica, necessariamente, que não há perdas de produtividade nessas condições.

Anatomicamente, a espécie *T. vulgaris* apresenta raios unisseriados, não estratificados, parênquimas aliformes distintos, parênquima axial vasicêntricos, parênquima axial paratraqueal escasso e, comumente, contêm corpos de sílica em suas células. Há, também, o predomínio de raios homocelulares com a presença ocasional de raios heterocelulares

(Macedo *et al.*, 2014). Seus anéis de crescimento são bem demarcados como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Lenho de *Tachigali vulgaris* oriundo de plantação experimental homogênea aos 11 anos.



Fonte: Do autor (2024)

A presença de anéis de crescimento no tachi provavelmente estão relacionados a condições ambientais desfavoráveis ao longo do ano, em que a atividade do câmbio é restringida. Esse fenômeno ocorre para outras espécies tropicais que formam anéis de crescimento como *Cedrella odorata* e *Bertholletia excelsa* (Ballantyne *et al.*, 2011; Granato-Souza *et al.*, 2019; Rozendaal; Zuidema, 2011; Schöngart *et al.*, 2015).

Em árvores de *T. vulgaris* de florestas nativas encontra-se diâmetros dos vasos de 190  $\mu\text{m}$  ( $\pm 60 \mu\text{m}$ ) e comprimento das fibras em torno de 970  $\mu\text{m}$  ( $\pm 156 \mu\text{m}$ ) (Macedo *et al.*, 2014). Em florestas plantadas de tachi aos 7 anos é relatado um comprimento das fibras de 932  $\mu\text{m}$  e espessura da parede de 3,1  $\mu\text{m}$  (Silva, M. O. S. *et al.*, 2021).

O tachi vem sendo utilizado para recuperação de áreas degradadas por ser uma espécie pioneira, apresentar alta deposição de serapilheira e fixação de nitrogênio (Farias *et al.*, 2016). A espécie, sendo nativa na Amazônia, apresenta alta adaptabilidade aos solos e a precipitação da região. Farias *et al.* (2016) compararam a deposição de serapilheira, sobrevivência e produtividade em biomassa da espécie com clones de *Eucalyptus*, aos 4 anos, em regiões de áreas degradadas na Amazônia. Eles constataram que a sobrevivência das árvores de *T. vulgaris* foi 37% maior que as de *Eucalyptus*. Além disso, o tachi produziu até

11,7 Mg/ha a mais de serapilheira. Enquanto a produção de biomassa de *Eucalyptus* foi 82,4 Mg/hectare, a do tachi foi de 241,7 Mg/hectare.

Há alguns indícios de resistência da espécie aos efeitos tóxicos do alumínio nos períodos iniciais de crescimento. Em estudos em que se avaliou o efeito da calagem e tamanho da cova em áreas degradadas por mineração, o tachi teve crescimento em altura semelhante tanto em áreas sem calagem quanto em áreas com calagem (Oliveira *et al.*, 2022). Seu maior crescimento médio foi em uma área sem calagem com alta saturação por Al e baixos teores de cálcio. No entanto, nessa área houve uma maior mortalidade das árvores. Todas as áreas tinham pH (H<sub>2</sub>O) em torno de 5,20. Além disso, o uso da espécie contribuiu para o aumento da qualidade de atributos do solo no espaçamento 3x4 m<sup>2</sup> (Narducci *et al.*, 2024).

O tachi, semelhante a outras espécies pioneiras, utiliza a luz de forma eficiente. Baseado em análises foliares, Guimarães *et al.* (2018) verificaram grande eficiência no uso de N e P. Os autores sugerem que isso pode ser devido a uma maior alocação de P foliar em P metabólico, como ATP, produção e exportação de triose-P e regeneração de ribulose-1,5-bisfosfato para fotossíntese. O aumento do P metabólico auxilia na manutenção de altas taxas fotossintéticas e, assim, melhor resistência ao excesso de energia. Outros estudos com a espécie demonstraram aumento da taxa fotossintética em períodos com maior irradiação e menores precipitações (Simões *et al.*, 2023), indicando a necessidade da espécie a alta radiação. É importante mencionar que esses dados são referentes à períodos iniciais de crescimento da espécie (inferior a 2 anos). Esse comportamento pode ser alterado em maiores idades das árvores.

Estudos têm sido realizados visando à utilização da espécie em plantios homogêneos. Recentemente, foram obtidas informações importantes em relação ao efeito do espaçamento na produtividade e qualidade da sua madeira (Barros-Junior *et al.*, 2022; Lima *et al.*, 2023; Narducci; Yared; Brienza Júnior, 2016; Rodrigues *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2021).

Em relação a produtividade de madeira, há registros de até 250 m<sup>3</sup>/ha, aos 7 anos de idade em densidade de plantio de 3 x 1,5 m (Silva *et al.*, 2021). O incremento médio anual está em torno de 20 m<sup>3</sup>/ha:ano para o tachi aos 6 anos (Rodrigues *et al.*, 2021).

Em geral, recomenda-se evitar menores espaçamentos de plantio para *T. vulgaris*, pois há aumento da mortalidade das plantas (Narducci; Yared; Brienza Júnior, 2016). Além disso, a densidade básica nesses espaçamentos é menor (Lima *et al.*, 2023). No entanto, espaçamentos muito amplos (3x4 m, por exemplo) podem causar alta variação da densidade

básica, conforme constatado por Lima *et al.* (2023). Dessa forma, espaçamentos intermediários são mais recomendados para o plantio da espécie, como 3x3 m e 3x2 m (Barros-Junior *et al.*, 2022; Lima *et al.*, 2023; Silva, M. O. S. *et al.*, 2021).

Outra vantagem dos espaçamentos intermediários é a redução da ocorrência de bifurcações em relação a espaçamentos mais amplos (Barros-Junior *et al.*, 2022). As árvores da espécie *T. vulgaris* frequentemente produzem bifurcações (Figura 2). Estas podem causar problemas na colheita e diminuir a densidade da madeira, índice de qualidade muito importante na madeira (Lima *et al.*, 2023). São observados aumento de até 35% no número de árvores bifurcadas entre espaçamento de plantio 3x1,5 m e 3x4 m (Moraes *et al.*, 2023).

Figura 2 – Bifurcações em plantios experimentais de *Tachigali vulgaris* aos 11 anos de plantio.



As causas dessas bifurcações na madeira da espécie são desconhecidas. No entanto, é fácil suspeitar de uma estratégia adaptativa para aumentar a área de copa e, conseqüentemente, absorção de luz (Christophe; David; Duncan, 2020). Como mencionado anteriormente, a alta irradiação parece favorecer a espécie. Nos menores espaçamentos, a árvore não conseguiria formar bifurcações pela alta competição entre árvores, aumentando sua altura rapidamente. Há registro de mortalidade nos menores espaçamento de plantio de até 44% para a espécie (Moraes *et al.*, 2023). É importante destacar que existem diversos outros

motivos para árvores formarem bifurcações, como o ataque de insetos e perturbações climáticas (Christophe; David; Duncan, 2020)

Aos 7 anos de idade, a densidade básica da madeira de tachi pode variar entre 0,419 g/cm<sup>3</sup> e 0,606 g/cm<sup>3</sup> no mesmo plantio e espaçamento entre árvores (Silva, M. O. S. *et al.*, 2021). A espécie comumente apresenta bifurcações (Lima *et al.*, 2023). Indícios reportados na literatura mostram que estas bifurcações influenciam na qualidade da madeira de tachi (Lima *et al.*, 2023), como a densidade básica. No entanto, esse fenômeno varia em razão da idade de plantio. Lima *et al.* (2023) encontraram diferenças de densidade básica entre árvores bifurcadas e não bifurcadas apenas para árvores de tachi com 7 anos. Aos 8 anos, as bifurcações não tiveram efeito nessas características. Os autores observaram uma variação de 0,515 g/cm<sup>3</sup> (árvore bifurcadas) à 0,530 g/cm<sup>3</sup> (árvores não bifurcadas) entre os tipos de fustes aos 102 meses. Aos 84 meses a densidade tinha variação de 0,475 g/cm<sup>3</sup> e 0,500 g/cm<sup>3</sup>. A Tabela 1 mostra alguns estudos recentes com a espécie.

Tabela 1 – Estudos recentes publicados em revistas internacionais que avaliaram a espécie *Tachigali vulgaris* visando sua utilização em plantios comerciais, (Continua)

Referências	Objetivos	Propriedades avaliadas	Condições do experiment
(Farias <i>et al.</i> , 2016)	Efeito de diferentes doses de biochar no desempenho de árvores de <i>Tachigali vulgaris</i> e híbridos de eucalipto em áreas degradadas na região Amazônica	Produção de serapilheira, sobrevivência das árvores; taxa de crescimento,	Plantas aos 4 anos; realizado no Matogrosso; Solos degradados por desmatamento, cultivo intensivo, lixiviação de nutrientes e compactação;
(Silva, M. O. S. <i>et al.</i> , 2021)	Efeitos dos diferentes espaçamentos nas propriedades da madeira	Densidade básica; proporção de cerne/alburno; diâmetro das fibras e lúmens, comprimento das fibras, espessura e fração parede; química imediata; química elementar; análise calorífica; estimativa de produtividade e densidade energética da madeira	Plantas aos 7 anos; realizado no Pará, baixo amazonas; 6 espaçamentos de plantio de 4,5 m <sup>2</sup> à 12 m; 54 árvores amostradas
(Barros-Junior <i>et al.</i> , 2022)	Efeito do espaçamento e bifurcação na densidade básica da madeira	Densidade básica	Plantas aos 7 anos; realizado no Pará, baixo amazonas; 6 espaçamentos de plantio de 4,5 m <sup>2</sup> à 12 m <sup>2</sup> ; 54 árvores amostradas

Tabela 1 – Estudos recentes publicados em revistas internacionais que avaliaram a espécie *Tachigali vulgaris* visando sua utilização em plantios comerciais,

(Conclusão)			
(Lima <i>et al.</i> , 2023)	Efeito do espaçamento de plantio, idade e bifurcação na densidade básica da madeira e crescimento de <i>Tachigali vulgaris</i>	Densidade básica; massa seca de madeira; variáveis dendrométricas (altura total e comercial, diâmetro com e sem casca na base, área basal, fator de forma, volume com e sem casca)	Plantas aos 7 anos e 8 anos; realizado no Pará, baixo amazonas; 6 espaçamentos de plantio de 4,5 m <sup>2</sup> à 12 m; 108 árvores amostradas
(Moraes <i>et al.</i> , 2023)	Efeito dos diferentes espaçamentos e tipo de fuste nas variações de densidade básica, densitometria de raios X e relação cerne/alburno	Densidade básica, densidade de raios X; proporção de cerne/alburno	Plantas aos 8 anos; realizado no Pará, baixo amazonas; 6 espaçamentos de plantio de 4,5 m <sup>2</sup> à 12 m; 54 árvores amostradas
(Santos <i>et al.</i> , 2023)	Avaliação da exportação de nutrientes e as implicações tecnológicas das cinzas na combustão da madeira em diferentes espaçamentos	Composição inorgânica da madeira; exportação de nutrientes e estimativa de composição química das cinzas da madeira	Plantas aos 7 anos; realizado no Pará, baixo amazonas; 6 espaçamentos de plantio de 4,5 m <sup>2</sup> à 12 m; 3 amostras de madeira por espaçamento.
(Teixeira <i>et al.</i> , 2024)	Avaliar as diferentes doses nutricionais nas variáveis dendrométricas em duas classes texturais de solo e determinar a dose nutricional ideal para a produção de florestas energéticas	Variáveis dendrométricas	Plantas aos 10 anos; realizado no Pará, baixo amazonas; 12 tratamentos de adubações e 2 texturas de solos; dados dendrométricos de 6 árvores por adubação e solo.
(Martins Leão <i>et al.</i> , 2023)	Estimativa de variabilidade genética de árvores de <i>Tachigali vulgaris</i> com base em características fisiológicas e físicas de sementes visando o melhoramento genético	Aspectos biométricos; massa fresca; teor de umidade das sementes; emergência; índice de velocidade de emergência; tempo de emergência	Localizado no Pará; 100 sementes de 12 árvores matrizes
(Simões <i>et al.</i> , 2023)	Efeito da sazonalidade da precipitação e da adubação fosfatada e potássica nas trocas gasosas	Temperatura foliar; eficiência no uso da água; taxa transpiratória; condutância estomática ao vapor d'água; Taxa fotossintética líquida	Plantas com 1 ano de idade; localizado no Pará; 16 plantas amostradas

Fonte: Do autor (2024)

## 3.2 Variação da densidade básica da madeira e crescimento das árvores

### 3.2.1 Densidade básica como fator genético

A densidade básica da madeira refere-se a razão entre massa de madeira seca pelo seu máximo volume (volume saturado). Esta propriedade é chamada de mínima densidade do lenho. Diversas utilizações da madeira exigem o conhecimento de sua densidade, pois ela influencia no rendimento dos processos produtivos. Em geral, para produção de carvão vegetal é importante que a madeira tenha alta densidade, pois implicará em maior produção por forno, maior densidade aparente do carvão e carvões mais resistentes, como observado entre diversos estudos (Assis *et al.*, 2016; Brito; Barrichelo, 1977; Couto *et al.*, 2023).

A densidade da madeira apresenta alta variabilidade entre espécie, entre árvores e até dentro da mesma árvore. Em estudos de densidade básica da madeira com madeiras tropicais pesquisadores encontraram amplitude de 0,110 g/cm<sup>3</sup> a 1,39 g/cm<sup>3</sup> entre espécies tropicais (Chave *et al.*, 2006). Essa alta variação entre espécies está associada a estratégias evolutivas específicas. As espécies com lenho de densidade baixa priorizam o crescimento e desenvolvimento rápido, gastando menor quantidade de energia na produção do lenho (Larjavaara; Muller-Landau, 2010). Alguns estudos indicam que essa priorização do crescimento das espécies de baixa densidade negligencia a sobrevivência. São encontradas maior mortalidade em regiões da Amazônia com maior quantidade de espécies com madeiras de densidade baixa (Chao *et al.*, 2008). Estudos sobre a ecologia da densidade da madeira constataram que ela está associada com a resistência do tronco à quebra (Larjavaara; Muller-Landau, 2010). No entanto, as espécies com madeiras de baixa densidade não tem necessariamente menor resistência do tronco. Elas apenas usam estratégias diferentes: conseguem a mesma resistência mecânica que madeiras de alta densidade aumentando o diâmetro do tronco de forma mais rápida (Anten; Schieving, 2010). Anten e Schieving, (2010) mostram que árvores de densidade próxima à 0,400 g/cm<sup>3</sup> e madeiras de densidade maiores que 0,800 g/cm<sup>3</sup> tiveram resistência semelhantes do tronco.

Há, também, algumas associações de alta densidade básica com climas mais secos. A maior espessura da parede celular dos vasos e fibras poderia contribuir para evitar problemas hídricos na árvore, como embolia (Carvalho *et al.*, 2023). Estudos amplos com espécies em diferentes climas encontraram menor densidade básica da madeira de espécies nativas em locais com maior umidade (0,502–0,612 g/cm<sup>3</sup>) que em locais mais secos (0,639–0,717 g/cm<sup>3</sup>) (Chave *et al.*, 2006).

Devido a estas estratégias evolutivas, a amplitude da variação da densidade da madeira é explicada geneticamente e filogeneticamente. Analisando 2456 espécies neotropicais, Chave *et al.* (2006) encontraram semelhanças na densidade da madeira das espécies do mesmo gênero. Os autores encontraram coeficiente de determinação de 76% entre o gênero e a densidade das espécies. Estes resultados sugerem que existe um potencial genético máximo e mínimo da densidade da madeira em diferentes espécies. No entanto, as características do ambiente nos quais as árvores foram submetidas, como clima, solo, e tratos silviculturais também afetam essa propriedade.

A Tabela 2 mostra uma comparação entre *Tachigali vulgaris* e algumas espécies comerciais. A Tabela faz uma comparação com outra espécie do gênero *Tachigali*. A espécie *Tachigali chrysophylla* apresenta densidade básica dentro da faixa encontrada para *T. vulgaris*.

Tabela 2 – Densidade básica da madeira de espécies comerciais comparadas a *Tachigali vulgaris*.

Espécies	Densidade básica (g/cm <sup>3</sup> )	Referências
<i>Corymbia citriodora</i>	0,662 (0,028)	(Massuque <i>et al.</i> , 2023)
<i>Corymbia henryi</i>	0,634 (0,030)	(Massuque <i>et al.</i> , 2023)
<i>Corymbia variegata</i>	0,614 (0,044)	(Massuque <i>et al.</i> , 2023)
<i>Corymbia torelliana</i>	0,518 (0,032)	(Massuque <i>et al.</i> , 2023)
<i>Acacia spp.</i>	0,491(0,042)	(Dinh Kha <i>et al.</i> , 2012)
<i>Cunninghamia lanceolata</i>	0,275 (0,005)	(Wang <i>et al.</i> , 2021)
<i>Pinus massoniana</i>	0,477 (0,42)	(Deng <i>et al.</i> , 2014)
<i>Eucalyptus urophylla</i>	0,542 (0,005)	(Protásio <i>et al.</i> , 2020)
<i>Eucalyptus major</i>	0,660 (0,045)	(Massuque <i>et al.</i> , 2023)
<i>Eucalyptus longirostrata</i>	0,607 (0,051)	(Massuque <i>et al.</i> , 2023)
<i>Eucalyptus amplifolia</i>	0,606 (0,022)	(Massuque <i>et al.</i> , 2023)
<i>Tachigali chrysophylla</i>	0,480 (0,04)	(Barros; Nascimento; Azevedo, 2012)
<i>Tachigali vulgaris</i>	(0,525 (0,004)	(Lima <i>et al.</i> , 2023)

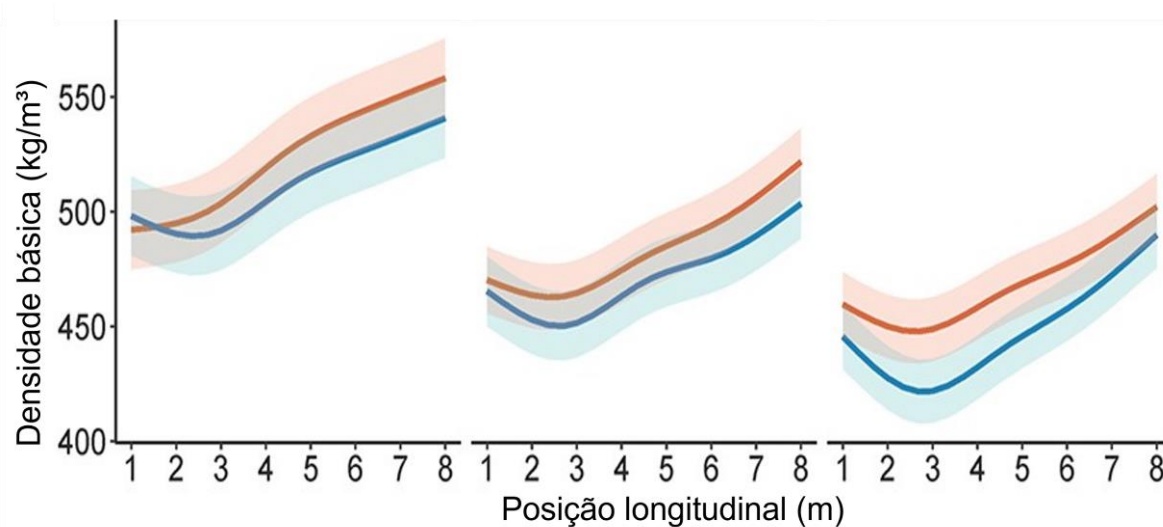
Valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão. Fonte: Do autor (2024)

### 3.2.2 Densidade básica da madeira ao longo do fuste

Além da variação da densidade entre espécies, estudos com florestas plantadas demonstram variação da densidade da madeira dentro da mesma espécie e até dentro da mesma árvore (Gendvilas *et al.*, 2022). As espécies do gênero *Eucalyptus* são amplamente utilizadas no Brasil em florestas plantadas para produção de celulose, lenha e carvão vegetal. Esse gênero foi estudado profundamente e, por isso, há uma grande quantidade de

informações sobre suas espécies. A Figura 3 mostra a variação da densidade ao longo do fuste de *Eucalyptus nitens* em estudos de desbastes. Em geral, há um decréscimo da densidade básica depois da base e então um aumento.

Figura 3 – Variação longitudinal da densidade básica de espécies de *Eucalyptus*.



Fonte: (Gendvilas *et al.*, 2022)

É importante destacar que esse efeito é bem observado em árvores com idades maiores e não constante para todas as espécies, sendo mais comum em espécies de crescimento rápido. O mesmo comportamento não foi encontrado em árvores de *Eucalyptus* com menos de 5 anos (Githiomi; Kariuki, 2010).

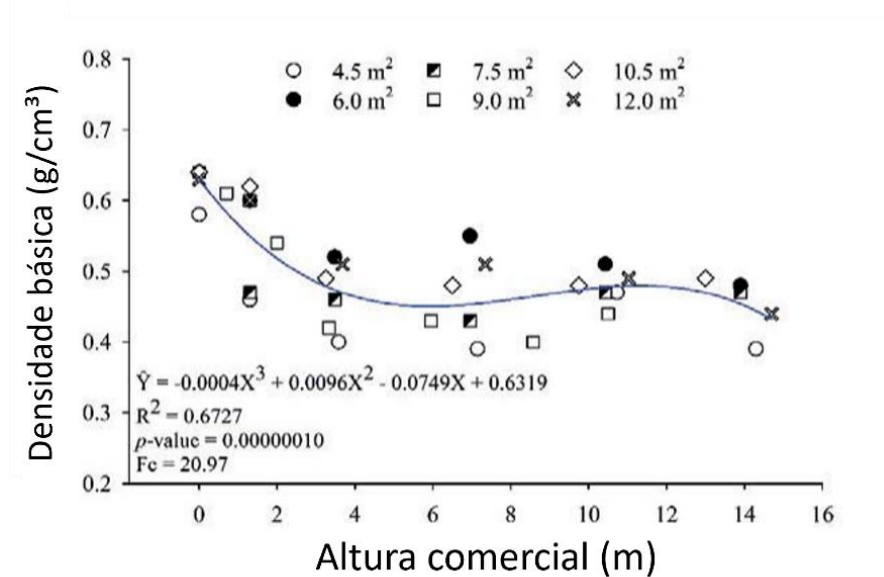
A variação longitudinal da densidade das árvores parece estar relacionada a uma resposta a condições do ambiente. As árvores precisam apresentar tanto regiões com maior rigidez como a base do tronco e regiões mais próximas do topo, que suporta o peso da árvore e copa, e regiões mais flexíveis, como nas partes mais centrais do tronco em que é preciso suportar as forças perpendiculares de ventos (Hein *et al.*, 2016; Thibaut; Gril; Fournier, 2001).

Gendvilas *et al.* (2022) encontraram diferença entre os maiores e menores valores de densidade básica na mesma árvore de até 0,068 g/cm<sup>3</sup>. Já Githiomi e Kariuki (2010) encontraram uma variação de cerca de 0,060 g/cm<sup>3</sup>. Para *Abies alba*, conífera europeia, são

observados um comportamento semelhante: a densidade básica atinge seu máximo na base da árvore, reduzindo até o meio da árvore e, então, aumentando levemente (Billard *et al.*, 2021).

Para o tachi são encontradas diferenças da base até a altura comercial de até 0,200 g/cm<sup>3</sup> (Barros-Junior *et al.*, 2022). Em geral, há um decréscimo da densidade básica no topo das árvores como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Variação da densidade básica ao longo do fuste de *T. vulgaris*



Fonte: (Barros-Junior *et al.*, 2022)

### 3.2.3 Influência das condições edafoclimáticas no crescimento e densidade básica

O desenvolvimento da madeira nas árvores acontece a partir da formação do meristema secundário ou câmbio vascular. A atividade cambial é profundamente afetada pelo ambiente (Panshin; Zeeuw, 1980), dessa forma, é natural que as características edafoclimáticas afetem a produção e qualidade da madeira.

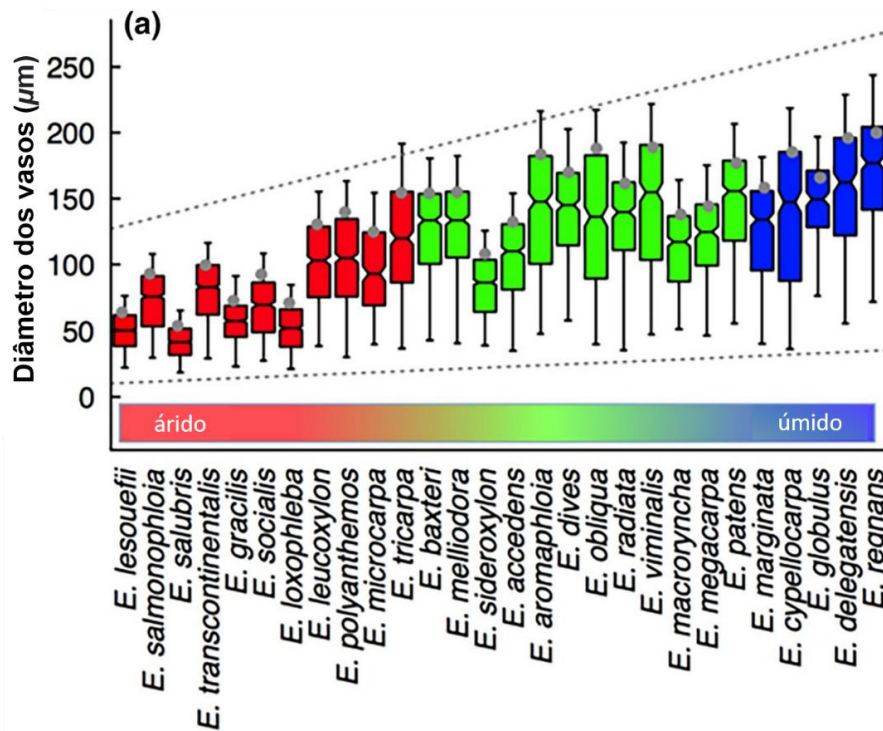
As condições edafoclimáticas influenciam na densidade básica da madeira. Em estudos com *Eucalyptus* (Rocha *et al.*, 2020) foram encontradas correlações negativas da densidade da madeira de *Eucalyptus urophylla* com a temperatura do ambiente. No entanto, o mesmo resultado não foi encontrado para outros clones de *Eucalyptus* (Rocha *et al.*, 2020). Embora em locais com menor precipitação houve aumento da densidade média, as correlações não foram significativas (Rocha *et al.*, 2020).

O material genético, densidade de plantio, temperatura do ambiente e textura do solo são fatores de grande influência na densidade básica da madeira de espécies de *Eucalyptus* (Ribeiro; Rodrigues; Ballarin, 2020). Entre os solos arenosos e argilosos foi identificado uma diferença entre 0,423 g/cm<sup>3</sup> e 0,440 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente (Ribeiro; Rodrigues; Ballarin, 2020). Os autores acrescentam que para aumentar a densidade básica da madeira desse gênero são necessários maiores espaçamentos entre árvores, maior temperatura do ambiente e textura de solo argiloso. Em contrapartida solos mais arenosos, maior precipitação e menor temperatura tendem a aumentar a produtividade volumétrica da madeira.

Em geral, o crescimento das árvores tem correlação contrária à densidade básica, visto que, em idades menores, o investimento em espessura da parede celular inviabilizará o rápido crescimento. A densidade básica pode ser uma resposta ao estresse, o que explica o aumento da densidade básica em locais com menor precipitação e maior temperatura encontrada por diversos autores para espécie do gênero *Eucalyptus* (Costa *et al.*, 2020; Ribeiro; Rodrigues; Ballarin, 2020; Rocha *et al.*, 2020).

Para esse gênero, o clima mais árido parece aumentar a densidade da madeira devido a diminuição do diâmetro dos vasos, como concluem, estudos de madeira nativa de espécies do gênero *Eucalyptus* (Pfautsch *et al.*, 2016) (Figura 5). Os autores constataram, no entanto, que esse fenômeno não se deve, em maior parte, à uma plasticidade desse gênero em modificar suas propriedades de acordo com o clima e sim ao efeito do genótipo, pois não encontraram diferenças de diâmetro dos vasos em espécies que cresceram em áreas de climas diferentes.

Figura 5 - Variação do diâmetro dos vasos de espécies de *Eucalyptus* em função do clima



Fonte: (Pfausch *et al.*, 2016)

É possível sugerir que a plasticidade desse gênero às modificações do diâmetro dos vasos e, conseqüentemente, densidade, em função das condições edafoclimáticas varia entre espécies. Essa hipótese é corroborada pelos resultados encontrados por Costa *et al.* (2020). Isso implica que, embora algumas espécies (ou clones) devam ser plantadas em locais que amplifiquem as propriedades da sua madeira, outras espécies sofrerão pouca modificação na sua qualidade em razão do clima e solo. O entendimento dessa dinâmica é fundamental para o estudo de novas espécies visando à utilização em florestas plantadas.

A Tabela 3 mostra um resumo da variação da densidade da madeira em razão de aspectos climáticos, edáficos e silviculturais (espaçamentos de plantio).

Tabela 3 - Variação da densidade da madeira (g/cm<sup>3</sup>) em razão de aspectos climáticos, edáficos e silviculturais

Espécie	Méd.	Máx.	Mín.	Ampl.	Fator	Referências
<i>Clones de E. urophylla</i>	0,477	0,563	0,45	0,113	Edafoclimáticas (diferentes sítios, clima seco-úmido)	(Costa <i>et al.</i> , 2020)
<i>Eucalyptus spp</i>	0,425	0,440	0,408	0,032	Texturas de solos (arenoso-argiloso)	(Ribeiro <i>et al.</i> , 2020)
<i>Eucalyptus spp</i>	0,438	0,488	0,415	0,073	Clima (seco-úmido)	(Ribeiro <i>et al.</i> , 2020)
<i>Pinus nigra</i>	0,592	0,644	0,543	0,101	Sítios (altitudes)	(Dias <i>et al.</i> , 2018)
<i>Tachigali vulgaris</i>	0,494	0,518	0,446	0,072	Espaçamentos	(Silva <i>et al.</i> , 2021b)
<i>Populus deltoides</i>	0,344	0,353	0,336	0,017	Espaçamentos	(Zhang, Yanhua <i>et al.</i> , 2022)
<i>E. grandis</i> × <i>E. camaldulensis</i>	0,440	0,460	0,420	0,040	Precipitação	(Rocha <i>et al.</i> , 2020)
<i>Eucalyptus saligna</i>	0,463	0,480	0,440	0,040	Precipitação	(Rocha <i>et al.</i> , 2020)
<i>Eucalyptus urophylla</i>	0,437	0,470	0,410	0,060	Precipitação	(Rocha <i>et al.</i> , 2020)
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,477	0,510	0,440	0,070	Precipitação	(Rocha <i>et al.</i> , 2020)

Méd: Média de densidade básica da madeira; Máx: Valor máximo de densidade; Mín.: Valor mínimo de densidade.; Ampl.: Amplitude total calculada pela diferença entre o maior valor e menor valor de densidade. Fonte: Do autor (2024).

A avaliação bibliográfica de aspectos como estes na madeira é um desafio, pois seria preciso uma padronização metodológica dos estudos. O grau de variação climática e edáficos são diferentes em cada estudo.

### 3.2.4 Efeito da adubação na densidade básica e crescimento das árvores

Além da água e luz solar, as plantas precisam de nutrientes absorvidos pelo solo para seu crescimento. Comumente estes nutrientes são classificados como macronutrientes e micronutrientes. Nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) são macronutrientes; ferro (Fe), zinco (Zn), manganês (Mn), cobre (Cu), molibdênio (Mo), boro (B), cloro (Cl), níquel (Ni) são micronutrientes (Malavolta, 2006). sódio (Na), silício (Si), cobalto (Co), selênio (Se) e alumínio (Al) são reportados como elementos benéficos (MARSCHNER, 2012).

N, P e K são particularmente importantes para a produção de madeira das árvores, pois estão envolvidos na fotossíntese, atividade cambial e, conseqüentemente, na assimilação de carbono e qualidade da madeira (Amtmann; Armengaud, 2009).

Em condições de estresse nutricional, as plantas desenvolvem mecanismos para sobreviver, tais como redução da área foliar e aumento da biomassa das raízes visando ampliar a absorção de certos nutrientes (Amtmann; Armengaud, 2009; Moriuchi; Winn, 2005). Esse fenômeno de adaptação fisiológica e de desenvolvimento é denominado plasticidade. A densidade da madeira é uma característica que pode se modificar em razão dessas adaptações fisiológicas. Heineman *et al.* (2016) encontraram menores concentrações de P em árvores com madeiras mais densas. Os autores sugerem que baixas concentrações de P na madeira é relacionado à sobrevivência de espécies arbóreas tropicais em habitats de baixa fertilidade.

Qi *et al.* (2021) encontraram correlação negativa ( $r=-89$ ) entre a densidade básica da madeira e a eficiência no uso de P. P faz parte da molécula de ATP, que fornece energia para a divisão celular (Thomas; Montagu; Conroy, 2006). A falta de ATP limita a atividade cambial e crescimento da planta (Qi *et al.*, 2021). Dessa forma, os fotoassimilados que seriam utilizados nesse crescimento são utilizados no espessamento da parede celular das fibras, aumentando a densidade da madeira (Thomas; Montagu; Conroy, 2006). Os autores citados encontraram redução da densidade básica 0,520 g/cm<sup>3</sup> para 0,380 g/cm<sup>3</sup> em uma adição de 70 mg de P/kg de solo. Os autores demonstram que essa relação não é linear, já que o aumento de P para 1000 mg de P/kg de solo não diminuiu a densidade proporcionalmente. Adubações nitrogenada também podem ter efeito na densidade da madeira, devido às modificações estruturais e ao aumento da largura das fibras (Pitre; Cooke; Mackay, 2007).

Alguns fatores que afetam a resposta a aplicação de fertilizantes em plantios florestais são a idade do plantio e condições dos solos. Em solos intemperizados, a fertilização por P tem grande efeito no crescimento do plantio. Além disso, após o fechamento do dossel (camada sobreposta das copas em uma floresta), as árvores tendem a ter uma menor resposta a adubação. Isso se deve a maturação das plantas, redução do seu crescimento e ciclagem dos nutrientes já disponíveis (Gonçalves *et al.*, 2004). As maiores respostas à adubação no crescimento das plantas acontecem nos períodos iniciais de plantio em que as plantas têm exigências de maior quantidade de nutrientes (Gonçalves *et al.*, 2004). A indisponibilidade de nutrientes nas plantas como Mg e N causam redução do crescimento e produção de massa seca de madeira (Jeyanny *et al.*, 2009).

### 3.3 Sustentabilidade das biomassas florestais para uso energético

Diferente das fontes fósseis de energia, que lançam carbono estocado no solo para a atmosfera, a geração de energia por meio da biomassa emite carbono fixado oriundo do seu crescimento. Assim, as emissões de carbono causadas pela queima da biomassa não aumentam de forma expressiva os níveis de carbono na atmosfera (Crow *et al.*, 2016). As florestas energéticas de ciclo de corte rápido são fontes particularmente interessantes de biomassas, pois o carbono emitido durante sua queima é rapidamente fixado no novo ciclo de plantio. Em uma pesquisa com plantação florestal de *Eucalyptus grandis* foi encontrado estoque de carbono de 68 Mg/ha na biomassa das árvores. Em contrapartida, foi estimado emissões de 1 Mg.C/ha por rotação da floresta (Crow *et al.*, 2016). Os autores consideraram diversos parâmetros do ciclo produtivo como implantação da floresta, fertilizantes, colheita e transporte.

Além do estoque de carbono na parte das árvores acima do solo, existem o estoque de carbono abaixo do solo de plantio (Viera; Rodríguez-Soalleiro, 2019) Em plantações de híbridos de *Eucalyptus* são encontradas uma participação do estoque de carbono abaixo do solo, de metade do estoque de carbono total do plantio. Outros estudos relatam 10 vezes mais carbono estocado no solo que na biomassa acima do solo (Crow *et al.*, 2016). Isso torna as emissões de C praticamente nulas, mesmo considerando todo o ciclo produtivo da floresta.

Considerando o uso da madeira para geração de calor em caldeiras, análises de ciclo de vida relatam emissões de 14,3 g CO<sub>2eq</sub> por Megajoule (MJ) de energia térmica gerada para pellets de madeira de salgueiro (Dias *et al.*, 2017). Para combustíveis fósseis, os autores encontram 75,1 g CO<sub>2eq</sub>/MJ, considerando todo o ciclo de vida. No entanto, o potencial de eutrofização de rios foi maior para a madeira devido ao uso de fertilizantes nitrogenados.

É importante mencionar que aspectos como produtividade e densidade básica da madeira tem grande influência na sustentabilidade de florestas plantadas, já que influenciam diretamente no estoque de carbono (Silva *et al.*, 2021b) e os processos produtivos como colheita e transporte da biomassa, que, além de influenciar as emissões de CO<sub>2</sub>, irão afetar a viabilidade econômica do plantio. Outro aspecto econômico importante está relacionado à fertilização. Em plantio de *Eucalyptus*, a fertilização pode representar até 12% dos gastos com adubação. A exportação de nutrientes afeta a produtividade do plantio e gastos com fertilizantes (Silva *et al.*, 2016).

### 3.4 Variação das propriedades químicas da madeira e carvão: implicações na qualidade para fins bioenergéticos

A eficiência das transformações termoquímicas da biomassa como carbonização, torrefação, gaseificação e liquefação é afetada pela sua composição química, tanto qualitativamente como quantitativamente (García *et al.*, 2014; Pang, 2019; Protásio *et al.*, 2021b).

A caracterização química da madeira visando à geração de calor geralmente envolve a avaliação da química imediata, química elementar, teor de lignina e extrativos. Estes parâmetros afetam o poder calorífico, combustibilidade da madeira e aspectos relacionados ao rendimento em carvão e líquido pirolenhoso, por exemplo (Lima *et al.*, 2020b).

A análise química imediata abrange os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas. Ela está relacionada a combustibilidade e reatividade da madeira e carvão (García *et al.*, 2014). Alta proporção carbono fixo/materiais voláteis implica em liberação de calor e ignição em temperaturas maiores. Protásio *et al.* (2019) encontraram desvio padrão de 0.6% para os materiais voláteis (MV) da madeira de clones de *Eucalyptus*. Uma variação semelhante foi encontrada para árvores de *T. vulgaris* em plantios por semeadura, sem controle das matrizes (Silva *et al.*, 2021a). Lima *et al.* (2022) encontrou variação de MV de 76,7% a 82,8% para resíduos lenhosos de 20 espécies amazônicas. Isso representa uma diferença de 7%. A variação da densidade básica das mesmas espécies chega a 70%.

Para o carvão os materiais voláteis variam entre 23% e 26% (Lima *et al.*, 2020b; Protásio *et al.*, 2021a). Essas variações estão relacionadas principalmente a composição elementar da biomassa (Shen *et al.*, 2010). A madeira é formada principalmente por carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e componentes inorgânicos. O carbono, hidrogênio e oxigênio formam as moléculas de celulose, hemiceluloses e lignina, substâncias fundamentais da madeira. Mesmo pequenas variações nestes componentes podem afetar os processos termoquímicos de conversão energética da biomassa lignocelulósica.

A Tabela 4 mostra características de qualidade da madeira e parâmetros de combustibilidade de *T. vulgaris* em testes de espaçamento comparado ao lenho de diversos clones de *Eucalyptus*.

Tabela 4 - características de qualidade da madeira e parâmetros de combustibilidade de *T. vulgaris* em testes de espaçamento comparado ao lenho de diversos clones de *Eucalyptus*

Parâmetros químicos de qualidade	<i>T. vulgaris</i> (7 anos)	<i>Eucalyptus</i> spp. (7 anos)***
N (% bs)*	0,75	0,55
H (% bs)*	6,30	6,20
O (% bs)*	42,6	44,80
C (% bs)*	49,80	48,20
S (% bs)	0,02	0,07
Matérias voláteis (% bs)*	78,54	83,15
Carbono fixo (% bs)*	21,00	16,60
Cinzas (% bs)*	0,49	0,19
<sup>1</sup> Lignina total (% bsle) (16 e 20 anos)**	30,28	28,65
Extrativos totais (% bs) (16 e 20 anos)**	5,15	1,52
Temperatura de ignição (°C)****	233,70	236,46
Temperatura final de combustão (°C)****	451,60	437,72

Fonte:\*\*\* (Protásio *et al.*, 2019); \*\*(Orellana, 2015); \*\*\*\*(Silva *et al.*, 2021b) \*(Silva *et al.*, 2021a). bs: base massa seca livre de extrativos; bsle: base massa seca livre de extrativos.

Os percentuais mais discrepantes entre as espécies foram materiais voláteis, carbono fixo, cinzas e extrativos totais. As diferenças entre os materiais voláteis não parecem afetar a temperatura de ignição entre *T. vulgaris* e *Eucalyptus* spp. No entanto, *T. vulgaris* apresentou temperatura final de combustão significativamente maior que *Eucalyptus*, provavelmente devido aos maiores percentuais de carbono fixo e extrativos totais.

Alguns estudos demonstram que o ambiente afeta as características químicas da madeira n(Gava; Gonçalves, 2008; Kilpelainen *et al.*, 2005; Paroshy *et al.*, 2021). Temperaturas elevadas tendem a aumentar o teor de lignina em pinus escocês e reduzir extrativos solúveis em acetona (Kilpelainen *et al.*, 2005).

Para características edáficas, (Gava e Gonçalves (2008) encontraram maior teor de lignina na madeira de *Eucalyptus grandis* em solos arenosos comparado a solos argilosos. Já o teor de extrativos não foi afetado pela textura do solo. Os autores sugeriram que esse fenômeno está relacionado a disponibilidade de água. A lignina confere maior rigidez a parede celular aumentando a resistência dos poros à problemas causados pela seca (Ménard *et al.*, 2022).

Nutrientes como Ca e N afetam negativamente as propriedades e concentração da lignina como a relação siringil/guaiacil, pois estão relacionados a regulação da produção desses compostos (Euring *et al.*, 2012; Lautner *et al.*, 2007). Maiores concentrações de lignina

e menor relação siringil/guaiacil afetam positivamente o rendimento em carvão vegetal (Massuque *et al.*, 2021; Protásio *et al.*, 2021b).

A composição das cinzas varia consideravelmente entre espécies. Em resíduos florestais, Lima *et al.* (2020a) encontram uma amplitude de cerca de 0,3% a 2,4% entre espécies. As cinzas são compostas por elementos absorvidos pela planta durante seu crescimento e por contaminação do solo, principalmente em resíduos (Negrão *et al.*, 2021). Os mais abundantes são Al, P, Ca, Si, K, S, Fe, Mg, Na, Mn e Ti (Vassilev *et al.*, 2013). A variação destes componentes na madeira está relacionada a disponibilidade no solo e aspectos intrínsecos à espécie como eficiência nutricional (Medeiros *et al.*, 2020) e adaptações para armazenamento de certos nutrientes (Amtmann; Armengaud, 2009). Os teores destes elementos na madeira irão afetar aspectos importantes da qualidade deste combustível. Altos percentuais de elementos alcalinos (K e Na), que tem baixo ponto de fusão, podem causar escórias e incrustações, diminuindo a vida útil dos equipamentos de combustão. S é um elemento potencialmente poluente. A norma ISO 17225-2 determina um limite 0,05% de enxofre para pellets (ISO, 2021).

Os termos matéria inorgânica, matéria mineral, cinzas e teor de cinzas não são sinônimos: matéria mineral, assim como a matéria inorgânica, pode se referir ao material contido na biomassa e cinzas, no entanto, a matéria mineral tem um sentido mais mineralógico excluindo a fase amorfa dos compostos. Já o termo cinzas é entendido como o resíduo sólido resultante da combustão completa ou incompleta da biomassa. O teor ou rendimento em cinzas é a relação entre a massa das cinzas e a massa da biomassa que a produziu após a sua combustão completa em condições de laboratório (Vassilev *et al.*, 2013).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os aspectos de crescimento e qualidade da madeira estudadas, até o presente momento para *Tachigali vulgaris*, demonstram que a espécie é promissora para a diversificação das plantações florestais no Brasil, especialmente na região da Amazônia Legal e Cerrado.

As características da madeira, principalmente a densidade básica, e o crescimento podem ser entendidos como uma resposta ao ambiente em que as plantas estão inseridas. Efeitos de tratamentos silviculturais como fertilização podem afetar a qualidade da madeira. A resposta a essas características varia entre espécies devido a fatores genéticos e, por isso, para a implantação sustentável de novas espécies em plantios florestais é essencial o entendimento dessas respostas. Para a espécie *T. vulgaris* o efeito da fertilização em características da

madeira, como teor de lignina, densidade da madeira e poder calorífico são desconhecidos. Avaliar os efeitos silviculturais nestes parâmetros para a madeira da espécie é essencial para garantir a qualidade da sua madeira e viabilizar seu uso energético na Amazônia e em outras regiões tropicais do globo.

## REFERÊNCIAS

- ADAMS, M. A. *et al.* Legumes are different: Leaf nitrogen, photosynthesis, and water use efficiency. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 15, p. 4098–4103, abr. 2016.
- AMTMANN, A.; ARMENGAUD, P. Effects of N, P, K and S on metabolism: new knowledge gained from multi-level analysis. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 12, n. 3, p. 275–283, jun. 2009.
- ANTEN, N. P. R.; SCHIEVING, F. The Role of Wood Mass Density and Mechanical Constraints in the Economy of Tree Architecture. **The American Naturalist**, v. 175, n. 2, p. 250–260, fev. 2010.
- ASSIS, M. R. *et al.* Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**, v. 50, n. 3, p. 519–536, maio. 2016.
- BALLANTYNE, A. P. *et al.* Regional Differences in South American Monsoon Precipitation Inferred from the Growth and Isotopic Composition of Tropical Trees\*. **Earth Interactions**, v. 15, n. 5, p. 1–35, fev. 2011.
- BARROS-JUNIOR, 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. **J Trop For Sci**, v. 34, n. 1, p. 11–23, jan. 2022.
- BILLARD, A. *et al.* Vertical variations in wood basic density for two softwood species. **European Journal of Forest Research**, v. 140, n. 6, p. 1401–1416, dez. 2021.
- BOSCH, R.; VAN DE POL, M.; PHILP, J. Policy: Define biomass sustainability. **Nature**, v. 523, n. 7562, p. 526–527, jul. 2015.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlations between the physical and chemical characteristics of wood and the yield of charcoal. I. Density and lignin content of Eucalyptus wood. **IPEF**, v. 1, n. 14, p. 9–20, 1977.
- BRUNEAU, A. *et al.* Phylogenetic Relationships in the Caesalpinioideae (Leguminosae) as Inferred from Chloroplast trnL Intron Sequences. **Systematic Botany**, v. 26, n. 3, p. 487–514, 2001.
- CARVALHO, E. C. D. *et al.* Xylem anatomical traits determine the variation in wood density and water storage of plants in tropical semiarid climate. **Flora**, v. 298, p. 152185, jan. 2023.

CHAO, K.-J. *et al.* Growth and wood density predict tree mortality in Amazon forests. **Journal of Ecology**, v. 96, n. 2, p. 281–292, mar. 2008.

CHAVE, J. *et al.* Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species. **Ecological Applications**, v. 16, n. 6, p. 2356–2367, dez. 2006.

CHRISTOPHE, D.; DAVID, R.; DUNCAN, S. Demystifying Tree Forks: Vices and Virtues of Forks in Arboriculture. **Journal of Botany Research**, v. 3, n. 1, p. 100–113, set. 2020.

COSTA, S. E. DE 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. 117807, fev. 2020.

COUTO, A. M. *et al.* Influence of physical-anatomical wood variables on charcoal physical–mechanical properties. **Journal of Forestry Research**, v. 34, n. 2, p. 531–538, abr. 2023.

CROW, S. E. *et al.* Carbon balance implications of land use change from pasture to managed eucalyptus forest in Hawaii. **Carbon Management**, v. 7, n. 3–4, p. 171–181, jul. 2016.

DIAS, A. *et al.* Within- and between-tree variation of wood density components in *Pinus nigra* at six sites in Portugal. **Annals of Forest Science**, v. 75, n. 2, p. 58, jun. 2018.

DIAS, G. M. *et al.* Life cycle assessment of thermal energy production from short-rotation willow biomass in Southern Ontario, Canada. **Applied Energy**, v. 204, p. 343–352, out. 2017.

DICK, C. W. *et al.* Neogene origins and implied warmth tolerance of Amazon tree species. **Ecology and Evolution**, v. 3, n. 1, p. 162–169, jan. 2013.

EURING, D. *et al.* Nitrogen fertilization has differential effects on N allocation and lignin in two *Populus* species with contrasting ecology. **Trees - Structure and Function**, v. 26, n. 6, p. 1933–1942, dez. 2012.

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

GARCÍA, R. *et al.* Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data. **Fuel**, v. 117, n. PARTB, p. 1139–1147, jan. 2014.

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

GENDVILAS, V. *et al.* Effects of thinning on the longitudinal and radial variation in wood properties of *Eucalyptus nitens*. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, v. 95, n. 4, p. 504–517, ago. 2022.

GITHIOMI, J. K.; KARIUKI, J. G. Wood basic density of *Eucalyptus grandis* from plantations in central rift valley, kenya: variation with age, height level and between sapwood

and heartwood. **Source: Journal of Tropical Forest Science**, v. 22, n. 3, p. 281–286, Jul. 2010.

GONÇALVES, J. L. M. *et al.* Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 45–61, maio. 2004.

GRANATO-SOUZA, D. *et al.* Tree rings and rainfall in the equatorial Amazon. **Climate Dynamics**, v. 52, n. 3–4, p. 1857–1869, fev. 2019.

GUIMARÃES, Z. T. M. *et al.* Leaf traits explaining the growth of tree species planted in a Central Amazonian disturbed area. **Forest Ecology and Management**, v. 430, p. 618–628, dez. 2018.

HEIN, P. R. G. *et al.* Spatial variation of wood density, stiffness and microfibril angle along Eucalyptus trunks grown under contrasting growth conditions. **Trees**, v. 30, n. 3, p. 871–882, jun. 2016.

HEINEMAN, K. D.; TURNER, B. L.; DALLING, J. W. Variation in wood nutrients along a tropical soil fertility gradient. **The New phytologist**, v. 211, n. 2, p. 440–454, jul. 2016.

**ISO 17225-2:2021.** Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 2: Graded wood pellets. 2021.

IBÁ - BRAZILIAN TREE INDUSTRY. **IBÁ annual report 2022.** São Paulo. Disponível em: <<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2019-final.pdf>>. Acesso em: jul. 2023.

JAHANSHAHI, S. *et al.* Development of Low-Emission Integrated Steelmaking Process. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 1, n. 1, p. 94–114, mar. 2015.

JEYANNY, V. *et al.* Effects of macronutrient deficiencies on the growth and vigour of khaya ivorensis seedlings. **Source: Journal of Tropical Forest Science**, v. 21, n. 2, p. 73–80, jun. 2009.

KILPELAINEN, A. *et al.* Scots pine responses to elevated temperature and carbon dioxide concentration: growth and wood properties. **Tree Physiology**, v. 25, n. 1, p. 75–83, jan. 2005.

LARJAVAARA, M.; MULLER-LANDAU, H. C. Rethinking the value of high wood density. **Functional Ecology**, v. 24, n. 4, p. 701–705, mar. 2010.

LAUTNER, S. *et al.* Calcium nutrition has a significant influence on wood formation in poplar. **New Phytologist**, v. 173, n. 4, p. 743–752, mar. 2007.

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, p. 105660, set. 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. 142, nov. 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, n. 3, p. 491–513 maio. 2023.
- MACEDO, T. M. *et al.* Wood Anatomy Of Seven Species Of Tachigali (Caesalpinioideae–Leguminosae). **IAWA Journal**, v. 35, n. 1, p. 19–30, jan. 2014.
- MALAVOLTA, E. (EURÍPEDES). **Manual de nutrição mineral de plantas**. 1. ed. São paulo: Editora Agronomica Ceres Ltda, 2006.
- MARSCHNER, P. **Marschner’s Mineral Nutrition of Plants**. 4. ed. London: Elsevier, 2023.
- MARTINS LEÃO, N. V. *et al.* Genetic variability of Tachigali vulgaris trees based on seed morphophysiological traits. **Southern Forests**, 2023.
- MASSUQUE, J. *et al.* Influence of lignin on wood carbonization and charcoal properties of Miombo woodland native species. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 79, n. 3, p. 527–535, maio 2021.
- MASSUQUE, J. *et al.* Evaluating the Potential of Non-commercial Eucalyptus spp. and Corymbia spp. for Bioenergy in Brazil. **Bioenergy Research**, v. 16, n. 3, p. 1592–1603, set. 2023.
- MEDEIROS, P. L. *et al.* Efficiency of nutrient use for biomass production of a *Eucalyptus* clone as a function of planting density in short-rotation cropping. **Australian Forestry**, v. 83, n. 2, p. 66–74, abr. 2020.
- MÉNARD, D. *et al.* Plant biomechanics and resilience to environmental changes are controlled by specific lignin chemistries in each vascular cell type and morphotype. **Plant Cell**, v. 34, n. 12, p. 4877–4896, dez. 2022.
- MORAES, L. G. *et al.* Forking and planting spacing impacts on wood density, X-ray density, and heartwood proportion of Tachigali vulgaris. **Trees**, ago. 2023.
- MORIUCHI, K. S.; WINN, A. A. Relationships among growth, development and plastic response to environment quality in a perennial plant. **New Phytologist**, v. 166, n. 1, p. 149–158, abr. 2005.
- NARDUCCI, T. S. *et al.* Efeito de diferentes espaçamentos de plantio de Tachigali vulgaris L.G.Silva & H.C.Lima na fertilidade do solo. **Scientia Forestalis**, v. 51, jan. 2024.
- NARDUCCI, T. S.; YARED, J. A. G.; BRIENZA JÚNIOR, S. Growth and survival of *Sclerolobium paniculatum* Vogel and the relationship between Rainfall and the increment in diameter at different planting spacing. **Revista Árvore**, v. 40, n. 3, p. 447–454, jun. 2016.
- NEGRÃO, D. R. *et al.* Inorganics in sugarcane bagasse and straw and their impacts for bioenergy and biorefining: A review. **Renew Sust Energ Rev**, v. 148, p. 111268, set. 2021.

OLIVEIRA, V. P. *et al.* Are liming and pit size determining for tree species establishment in degraded areas by kaolin mining? **Ecological Engineering**, v. 178, p. 106599, maio 2022.

ORELLANA, J. B. P. **Valorização tecnológica da madeira de *Tachigali vulgaris* proveniente de plantios de dois sítios distintos localizados no estado do Amapá.** Dissertação—Brasília: Universidade de Brasília, maio 2015.

PANG, S. Advances in thermochemical conversion of woody biomass to energy, fuels and chemicals. **Biotechnology Advances**, v. 37, n. 4, p. 589–597, jul. 2019.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. DE. **Textbook of wood technology. Volume I. Structure, identification, uses, and properties of the commercial woods of the United States and Canada.** 4. ed. New York: McGraw-Hill Book Co., 1980.

PAROSHY, N. J. *et al.* Carbon concentration in the world's trees across climatic gradients. **New Phytologist**, v. 232, n. 1, p. 123–133, out. 2021.

PFAUTSCH, S. *et al.* Climate determines vascular traits in the ecologically diverse genus *Eucalyptus*. **Ecology Letters**, v. 19, n. 3, p. 240–248, mar. 2016.

PITRE, F. E.; COOKE, J. E. K.; MACKAY, J. J. Short-term effects of nitrogen availability on wood formation and fibre properties in hybrid poplar. **Trees - Structure and Function**, v. 21, n. 2, p. 249–259, mar. 2007.

PROTÁSIO, T. DE 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, fev. 2021a.

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, n. 3, p. 626–641, set. 2019.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Influence of Extractives Content and Lignin Quality of *Eucalyptus* Wood in the Mass Balance of Pyrolysis Process. **BioEnergy Research**, v. 14, n. 1, p. 175–189, mar. 2021b.

QI, J.-H. *et al.* Differential determinants of growth rates in subtropical evergreen and deciduous juvenile trees: carbon gain, hydraulics and nutrient-use efficiencies. **Tree Physiology**, v. 41, n. 1, p. 12–23, jan. 2021.

RIBEIRO, M. D. DOS S. B.; RODRIGUES, S. A.; BALLARIN, A. W. Multivariate association of wood basic density with site and plantation variables in *Eucalyptus* spp. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 50, n. 2, p. 193–202, fev. 2020.

ROCHA, S. M. G. *et al.* Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species. **Forest Ecology and Management**, v. 473, p. 118290, out. 2020.

RODRIGUES, R. P. *et al.* Growth and mortality of *Tachigali vulgaris* L. G. Silva and H. C. Lima in different planting spacing for biomass production. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 48, n. 128, fev. 2021.

ROZENDAAL, D. M. A.; ZUIDEMA, P. A. Dendroecology in the tropics: a review. **Trees**, v. 25, n. 1, p. 3–16, fev. 2011.

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**, 29 set. 2023.

SCHÖNGART, J. *et al.* Age and Growth Patterns of Brazil Nut Trees (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) in Amazonia, Brazil. **Biotropica**, v. 47, n. 5, p. 550–558, set. 2015.

SHARMA, M. P. *et al.* Deciphering the Role of Trehalose in Tripartite Symbiosis Among Rhizobia, Arbuscular Mycorrhizal Fungi, and Legumes for Enhancing Abiotic Stress Tolerance in Crop Plants. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, set. 2020.

SHEN, J. *et al.* The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 5, p. 983–987, maio 2010.

SILVA, L. F. G.; LIMA, H. C. Mudanças nomenclaturais no gênero *Tachigali* Aubl. (Leguminosae - Caesalpinioideae) no Brasil. **Rodriguésia**, v. 58, n. 2, p. 397–401, abr. 2007.

SILVA, M. O. S. *et al.* Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachi-branco trees planted at different spacings for bioenergy purposes. **Journal of Forestry Research**, v. 32, n. 1, p. 211–224, fev. 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, n. 129, mar. 2021b.

SILVA, R. M. L. *et al.* Fertilization response, light use, and growth efficiency in Eucalyptus plantations across soil and climate gradients in Brazil. **Forests**, v. 7, n. 6, maio. 2016.

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**, abr. 2023.

SPRENT, J. I.; ARDLEY, J.; JAMES, E. K. Biogeography of nodulated legumes and their nitrogen-fixing symbionts. **New Phytologist**, v. 215, n. 1, p. 40–56, 17 jul. 2017.

TEIXEIRA, R. A. C. *et al.* Dynamics of experimental plantations of *Tachigali vulgaris* in response to fertilization and soil texture. **New Forests**, set. 2023.

THIBAUT, B.; GRIL, J.; FOURNIER, M. Mechanics of wood and trees: some new highlights for an old story. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIB - Mechanics**, v. 329, n. 9, p. 701–716, set. 2001.

THOMAS, D. S.; MONTAGU, K. D.; CONROY, J. P. Why does phosphorus limitation increase wood density in *Eucalyptus grandis* seedlings? **Tree Physiology**, v. 26, n. 1, p. 35–42, jan. 2006.

VAN DER WERFF, H. A Synopsis of the Genus *Tachigali* (Leguminosae: Caesalpinioideae) in Northern South America. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, v. 95, n. 4, p. 618–661, dez. 2008.

VASSILEV, S. V. *et al.* An overview of the composition and application of biomass ash. **Fuel**, v. 105, p. 19–39, mar. 2013.

VIERA, M.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. A Complete Assessment of Carbon Stocks in Above and Belowground Biomass Components of a Hybrid *Eucalyptus* Plantation in Southern Brazil. **Forests**, v. 10, n. 7, p. 536, jun. 2019.

ZACHOS, J. C.; DICKENS, G. R.; ZEEBE, R. E. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. **Nature**, v. 451, n. 7176, p. 279–283, jan. 2008.

ZHANG, Y. *et al.* Responses of radial growth, wood density and fiber traits to planting space in poplar plantations at a lowland site. **Journal of Forestry Research**, v. 33, n. 3, p. 963–976, jun. 2022.

## SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

### ARTIGO 1: EFEITO DA ADUBAÇÃO, TEXTURA DE SOLO E BIFURCAÇÃO NA QUALIDADE DA MADEIRA E PRODUTIVIDADE DE FLORESTAS ENERGÉTICAS DE *T. vulgaris* NA AMAZÔNIA

#### RESUMO

A substituição de combustíveis fósseis por renováveis é essencial para a redução das mudanças climáticas do planeta. A biomassa, e especificamente as florestas plantadas, são fontes renováveis de energia que podem suprir a necessidade de substituição do carvão mineral por carvão vegetal, por exemplo. No entanto, para a utilização da madeira, é preciso garantir a produtividade e qualidade desse material. Apesar de estudos anteriores mostrarem que o lenho de *T. vulgaris* apresenta características promissoras, aspectos silviculturais, como a adubação e seus efeitos na qualidade da madeira e crescimento da espécie, são limitados. Além disso, é essencial compreender o efeito de bifurcações, comumente encontradas na espécie, nas características da madeira da sua madeira. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do tipo de fuste, solo e adubação na qualidade e crescimento do lenho de *T. vulgaris* visando fins energéticos. O estudo foi realizado em 2 plantações experimentais de *T. vulgaris* localizadas no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, mesorregião do baixo Amazonas, estado do Pará, Brasil. As plantações têm diferentes texturas de solos: Latossolo amarelo textura franco arenosa e Latossolo amarelo textura muito argilosa. O experimento foi instalado em 2010 e tem espaçamento de 3x2 m entre árvores. Foram considerados 4 blocos por área e 3 testes de adubação: a testemunha, em que não houve adubação com fósforo e potássio; o tratamento 2, em que se adubou apenas com fósforo; e o tratamento 3, em que se adubou com fósforo e potássio. Em cada teste, foram amostradas uma árvore com fuste único e uma árvore bifurcada. A partir do lenho amostrado, foi obtida a densidade básica da madeira, teor de cinzas, poder calorífico, teor de extrativos e teor de lignina. Em laboratório foi produzido carvão vegetal, sendo avaliados o rendimento, densidade aparente, a composição química imediata e o poder calorífico superior. A partir dessas análises e das características de crescimento individual e produção do plantio por hectare foram estimados parâmetros de produtividade energética como massa seca de madeira, massa de lignina e a produtividade energética da madeira e carvão vegetal. Os resultados não mostram efeito dos tratamentos avaliados na densidade básica, que tem média de 0,514 g/cm<sup>3</sup>. Madeiras com diâmetro à altura do peito menor que 15 cm apresentaram densidade abaixo de 0,500 g/cm<sup>3</sup>. Houve efeito dos parâmetros avaliados nas cinzas (0,35, % base seca – bs), extrativos totais (4,65% - bs) e lignina total (31,34% bsle). Em relação às análises do carvão, o rendimento gravimétrico apresentou média de 37,75% e foi superior no tratamento sem adubação e solo muito argiloso. Os valores médios para o carbono fixo foram de 68,65% bs e foram inferiores no tratamento sem adubação. Os parâmetros de crescimento têm grande efeito na produtividade energética (2,65 GJ/árvore) e devem ser considerados na avaliação do potencial da espécie para composição de florestas energéticas.

Palavras-chave: carvão vegetal; desenvolvimento sustentável; bioenergia.

## 1 INTRODUÇÃO

A substituição de combustíveis fósseis por combustíveis renováveis é essencial para garantir a demanda por energia nas próximas décadas e redução das mudanças climáticas do planeta (Bosch; Van De Pol; Philp, 2015). Previsões estimam aumento de 40% da demanda mundial de energia elétrica até 2040 (Ahmad; Zhang, 2020). A biomassa, e particularmente a biomassa proveniente das florestas plantadas, é um recurso renovável que pode contribuir para o atendimento dessa demanda.

Em 2018, o consumo de madeira como lenha industrial e carvão no Brasil foi de 78,9 milhões de metros cúbicos. Esse valor representa cerca de 36% do consumo total da madeira de florestas plantadas (IBÁ, 2019). Apesar da diversidade de material genético das florestas brasileiras, cerca de 96% destas plantações florestais no país provém de espécies exóticas, principalmente do gênero *Eucalyptus*, *Corymbia*, *Pinus* e *Acacia* (IBÁ, 2019). Essas espécies têm alta produtividade, mas não atendem as necessidades energéticas de regiões com características edafoclimáticas específicas (Elli; Sentelhas; Bender, 2020), como a Amazônia, pois as altas temperaturas, comuns na região, reduzem a produtividade das espécies cultivadas no Brasil atualmente (Elli; Sentelhas; Bender, 2020). Nesse sentido, é importante que seja promovida a diversificação de espécies que possam ser cultivadas nessas regiões. A Amazônia tem polos siderúrgicos importantes que precisam de fornecimento constante de carvão vegetal. Além disso, regiões isoladas na Amazônia tem energia elétrica fornecida por óleo diesel que pode ser substituído por biomassa (Araujo *et al.*, 2022).

*Tachigali vulgaris* L.F. Gomes da Silva & H.C. Lima, conhecida vulgarmente como tachi-branco ou carvoeiro, é uma espécie presente na Amazônia e cerrado do Brasil (Van Der Werff, 2008). Estudos tem demonstrados que a espécie é adaptada aos solos ácidos da região Amazônica (Farias *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2023).

O crescimento e qualidade da madeira para uso energético da espécie foram estudados recentemente. *Tachigali vulgaris* pode apresentar média de 127 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> aos 6 anos em espaçamento 3x2 m (Teixeira *et al.*, 2024). Isso representa um incremento médio anual de 21 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>. Já foram reportados até 175 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> aos 7 anos, no mesmo espaçamento de plantio (25 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>) (Silva *et al.*, 2021a). A densidade da madeira varia entre 0,419 g/cm<sup>3</sup> e 0,606 g/cm<sup>3</sup> e o poder calorífico superior tem valores em torno de 19,0 MJ/kg (Silva *et al.*, 2021a).

Apesar destes estudos fornecerem informações importantes, o estabelecimento da espécie em plantios comerciais para produção de lenha e carvão só é possível com o

entendimento adequado do efeito da adubação e texturas de solo no crescimento e qualidade da madeira e as suas implicações na produção de carvão vegetal. Para *Pinus* foram observadas reduções de 7,5% na densidade básica dos anéis de crescimento em razão de adubações com macronutrientes (Albaugh *et al.*, 2004). Para *Eucalyptus grandis*, a adubação potássica aumentou a proporção do cerne de 33% para 49% (Chambi-Legoas *et al.*, 2021).

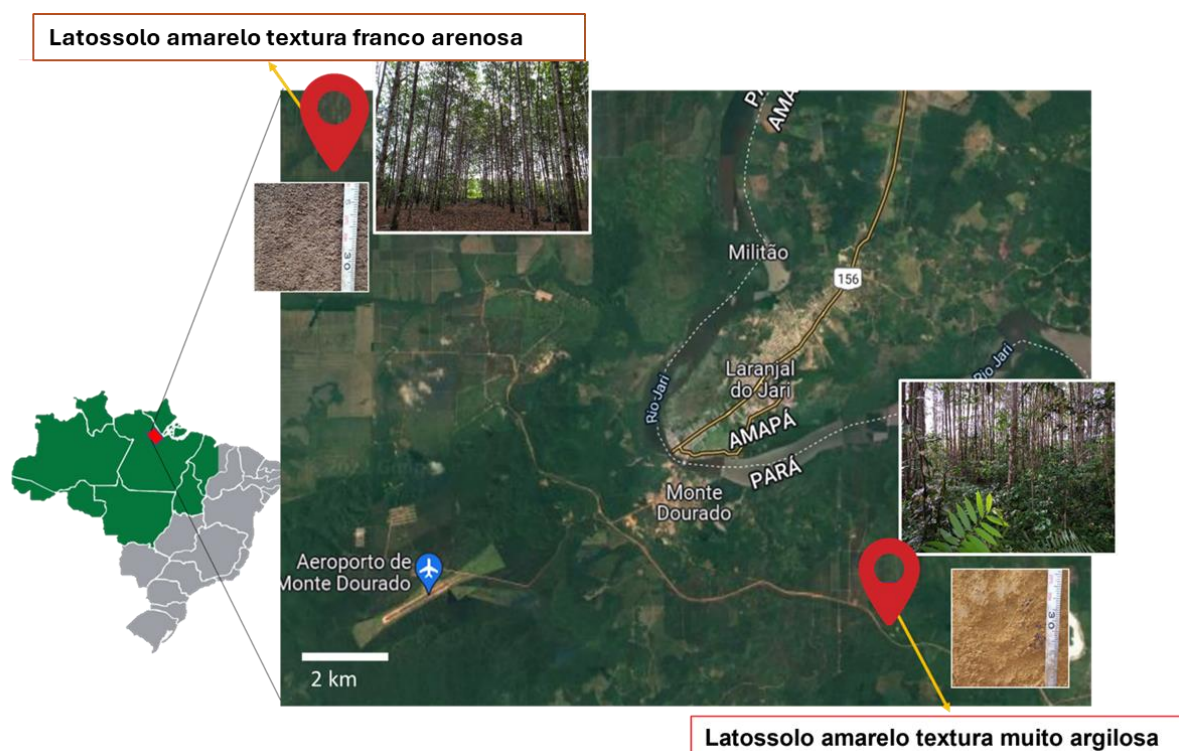
Pesquisas recentes para a espécie aos 10 anos avaliaram os efeitos da adubação em aspectos de crescimento como diâmetro, altura e volume de madeira (Teixeira *et al.*, 2024). Não foram encontradas diferenças significativas no crescimento. No entanto, estes estudos não avaliaram as implicações da adubação nas características do lenho e na produção e qualidade do carvão vegetal siderúrgico. Além disso, não foram avaliados o efeito destes tratamentos na qualidade das árvores bifurcadas, comuns em plantios experimentais da espécie. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito das bifurcações, adubações e texturas de solos nos parâmetros de produção e qualidade da madeira e carvão vegetal de *T. vulgaris*.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área experimental da pesquisa

O estudo foi realizado em dois plantios homogêneos de *Tachigali vulgaris*, com idade de 11 anos, localizados no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, mesorregião do baixo Amazonas, estado do Pará, Brasil. Os experimentos foram implantados na empresa Jari Celulose S.A. em áreas de 1,6 ha, geolocalizados pelas coordenadas 0°47'17,6"S 52°37'08,80"W e 0°53'29,41"S 52°29'15,91"W (Figura 1). O clima, segundo classificação de Köppen é *am* com características intermediárias entre *Af* e *Aw*. A temperatura média anual é de aproximadamente 26 °C e precipitação entre 1,970 mm e 2,300 mm. As áreas têm aproximadamente 1,6 hectares, com texturas de solos diferentes, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Localização do plantio experimental de *Tachigali vulgaris*, em solos arenosos e argilosos, em Monte Dourado, cidade de Almeirim – PA



Fonte: Do autor

Em cada solo foram implantados 12 tratamentos de adubação (Tabela 1). A Tabela apresenta os valores convertidos do adubo para  $P_2O_5$  e  $K_2O$ . O superfosfato triplo apresenta 41% de  $P_2O_5$  e 11% de cálcio. O cloreto de potássio apresenta cerca de 58% de  $K_2O$  e cerca de 42% de cloro. Para a amostragem das árvores neste experimento foram selecionados os tratamentos extremos de P e mediano. Os tratamentos escolhidos estão destacados em cinza na tabela. A caracterização química do solo antes do plantio está demonstrada na Tabela 2. Antes da instalação dos experimentos, as áreas eram ocupadas por plantios de *Eucalyptus*.

Tabela 1 - Adubação e dosagem (g/planta) nos diferentes tratamentos de *T. vulgaris*.

Códigos	Enxofre/nitrogênio		Fósforo/cálcio		Potássio/cloro			
	Sulfato de amônio	N	Superfosfato triplo	$P_2O_5$	Cloreto de potássio		$K_2O$	
	( $kg \cdot ha^{-1}$ )	( $kg \cdot ha^{-1}$ )	( $kg \cdot ha^{-1}$ )	( $kg \cdot ha^{-1}$ )	( $kg \cdot ha^{-1}$ )	Total	( $kg \cdot ha^{-1}$ )	
		20 dias após o plantio	Antes do plantio, fundo cova	20 dias após o plantio	90 dias após o plantio			
<b>0P+0K</b>	<b>100</b>	<b>21</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
0+172K	100	21	0	0	69	103	172	100
0P+343K	100	21	0	0	137	206	343	199

195P+0K	100	21	195	80	0	0	0	0
195P+172K	100	21	195	80	69	103	172	100
195P+343K	100	21	195	80	137	206	343	199
<b>390P+0K</b>	<b>100</b>	<b>21</b>	<b>390</b>	<b>160</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
390P+172K	100	21	390	160	69	103	172	100
390P+343K	100	21	390	160	137	206	343	199
780P+0K	100	21	780	320	0	0	0	0
780P+172K	100	21	780	320	69	103	172	100
780P+343K	100	21	780	320	137	206	343	199

A análise de madeira não foi feita em todos os 12 tratamentos por questões de praticidade e inviabilidade de transporte do material. Em estudos de crescimento no mesmo plantio, não foi observado diferenças no crescimento da espécie entre os tratamentos (TEIXEIRA *et al.*, 2024), portanto, considerou-se que os tratamentos escolhidos representam as variações que possam ocorrer na qualidade da madeira em razão da adubação. A caracterização do solo foi realizada conforme metodologia da Embrapa (BERNARDI *et al.*, 2002).

Tabela 2 – Caracterização química dos solos de plantio em diferentes profundidades

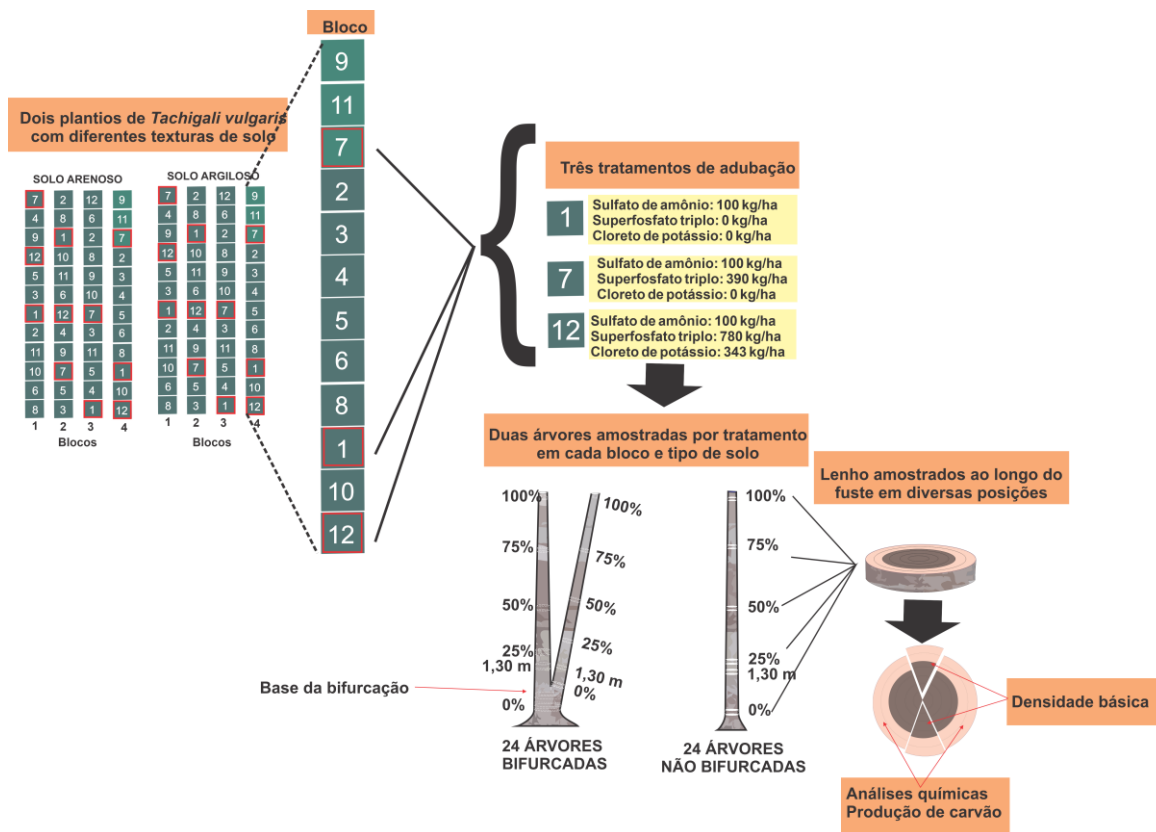
Textura	Prof. (cm)	Física (g kg <sup>-1</sup> )				Química								V%
		Areia	Silte	Argila	pH (H <sub>2</sub> O)	MO (g dm <sup>-3</sup> )	P (mg dm <sup>-3</sup> )	C (mmol dm <sup>-3</sup> )						
								K	Ca	Mg	H+Al	Al	CTC	
Muito argilosa	0 – 10	195	195	674	4,2	21,5	3,1	0,5	5,3	3,0	56	11,1	64,8	13,6
	10 – 20	158	108	734	4,1	14,8	1,9	0,2	3,6	1,7	50	11,1	55,8	9,8
	20 – 40	105	156	739	4,0	11,3	0,7	0,2	3,5	1,6	45	11,6	50,3	10,5
Franco arenosa	0 – 10	804	55	105	4,0	11,1	5,6	0,3	1,5	0,6	47	12,7	49,4	4,8
	10 – 20	856	11	133	4,1	10,5	5,9	0,2	1,4	0,6	48	12,7	50,3	4,4
	20 – 40	804	26	170	4,2	9,5	3,3	0,2	1,4	0,6	43	11,7	45,2	4,9

pH: potencial hidrogênio; Mo: matéria orgânica; CTC: capacidade de troca catiônica; V%: saturação por bases.

## 2.2 Amostragem das árvores e do lenho de *T. vulgaris*

Para as análises, foram coletadas 48 árvores da espécie *Tachigali vulgaris*, sendo 2 árvores amostradas em cada tratamento de adubação, aos 11 anos de idade, sendo 24 bifurcadas e 24 não bifurcadas. As árvores foram escolhidas considerando a representatividade da classe de área basal média da parcela. A Figura 2 mostra o delineamento experimental realizado e a amostragem de madeira.

Figura 2 - Delineamento experimental e a amostragem da madeira de *Tachigali vulgaris*.



Fonte: Do autor (2024)

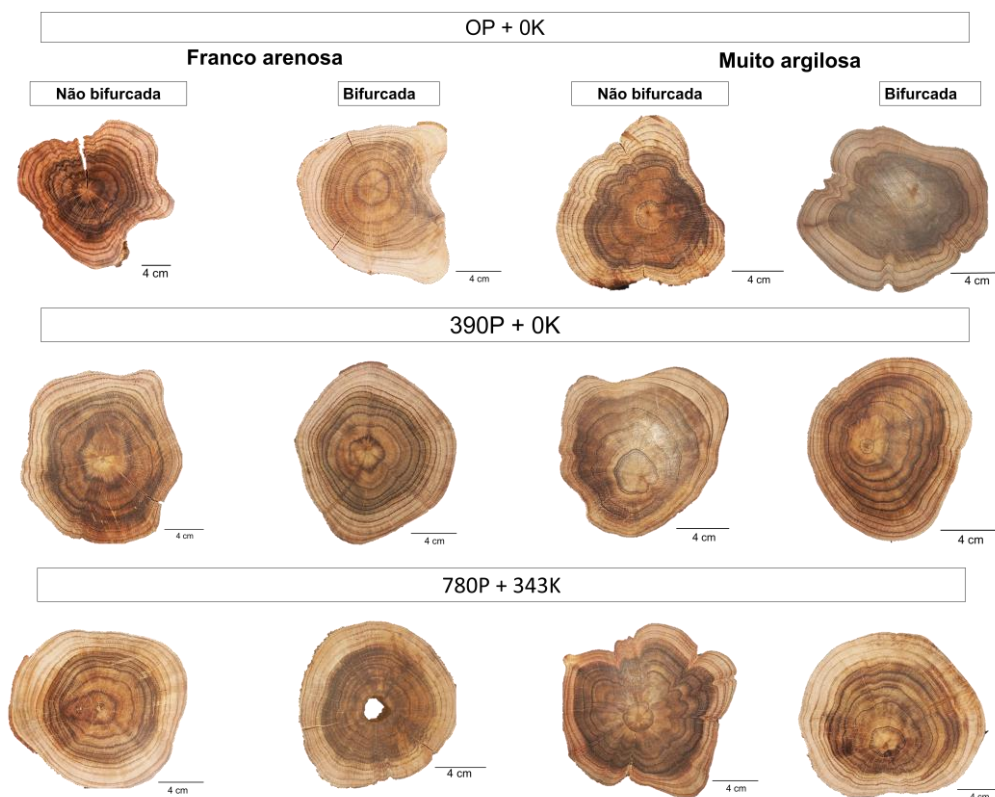
Os blocos são utilizados aqui para separar o efeito dos tratamentos das variações naturais que acontecem no solo. Para que isso seja possível, em todos os blocos deve haver todos os tratamentos disposto de forma aleatória. A partir das variações dos valores da variável resposta por bloco, é possível distinguir o que é efeito de variações que ocorreram no solo e o que é efeito dos tratamentos.

## 2.3 Qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris*

Como apresentado na Figura 2, foram retiradas cunhas opostas dos discos amostrados para determinação da densidade básica da madeira ao longo do fuste visando avaliar a variação da densidade da base ao topo da árvore. Para a determinação da densidade básica média das árvores, foi realizada média aritmética da densidade dos discos. Para as árvores bifurcadas, a densidade básica média de cada fuste foi obtida pela média aritmética. A partir desses valores, foi feita a média ponderada em proporção ao volume de cada fuste. Esse procedimento foi realizado, pois em algumas árvores há grande diferença entre o volume dos fustes principais e secundários das árvores. A determinação da densidade básica foi realizada pelo método de imersão conforme NBR11941 (ABNT, 2003).

As áreas do cerne e albarno foram obtidas por meio de fotografias dos discos à altura de 1,30 m do fuste (Figura 3). Os discos foram previamente lixados para a obtenção de melhor nitidez dos limites entre cerne e albarno. A análise das imagens para obtenção da área foi feita por meio do software ImageJ (SCHINDELIN *et al.*, 2015)

Figura 3 – Disco de *Tachigali vulgaris* coletados à altura de 1,30 m do fuste.



Fonte: Do autor (2024)

Os extrativos totais serão obtidos conforme a NBR 14853 (ABNT, 2010) utilizando cerca de 2 g de amostra previamente seca em estufa. A extração é realizada com etanol-tolueno (2:1 v/v) por 6 h, uma extração com etanol por 5 h em extrator soxhlet e uma extração em água destilada quente. Depois dessas etapas as amostras foram secas em estufa com circulação de ar a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  por 24 horas para obtenção da massa seca.

O teor de lignina insolúvel foi determinado pelo método de hidrólise ácida conforme a norma NBR 7989 (ABNT, 2010). Inicialmente, foram obtidas as massas 0,3 g das amostras seca em estufa do lenho de tachi livre de extrativos, sendo adicionado 3 ml por amostra de ácido sulfúrico (72%) durante 1 hora em banho-maria a  $30 \pm 0,2^\circ\text{C}$ . Posteriormente, as amostras foram fervidas por 1h acondicionadas a frascos de vidro de 100 ml, com 84 ml de água destilada. Sendo lacrados com tampa de borracha e lacre de alumínio. Depois foram filtradas em cadinhos de vidro porosidade 2 forrados com óxido de alumínio em fibras, usando-se aproximadamente 500 ml de água destilada. Os cadinhos com lignina insolúvel foram secos por 24 horas a uma temperatura de  $40^\circ\text{C}$  e em seguida colocados em estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  por 4 horas. A lignina solúvel foi determinada por espectroscopia UV. A lignina total, base massa seca livre de extrativos, foi considerada a soma da lignina insolúvel e solúvel.

O poder calorífico superior (PCS), foi determinado com a utilização de uma bomba calorimétrica digital (modelo IKA C-200), de acordo com a norma E711-87 (ASTM, 2004).

O teor de cinzas foi realizado à temperatura de  $575^\circ\text{C}$  em forno mufla por 4 horas. A análise foi feita com madeira moída que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retido na peneira de 60 mesh.

#### **2.4 Produtividade do plantio de *T. vulgaris***

As análises de crescimento do plantio de *Tachigali vulgaris* foram realizadas de 2 formas: a primeira foi feita com as medições das árvores selecionada para a análise da madeira. As árvores selecionadas foram abatidas, medida a altura total e comercial, além da circunferência nas posições 0,10 cm, 0,70 cm, 1,30 m, 2,0 m, a partir daí, de 2 em 2 m até a altura comercial definida como a altura onde o diâmetro é no mínimo 5 cm. Para o cálculo de volume individual, com e sem casca, foi utilizada a equação de Smalian em que se calcula o volume por secção (ex: a secção de 0,10 m a 0,70 m) pela média das áreas das circunferências das suas extremidades multiplicado pelo seu comprimento.

A segunda forma de análise do crescimento do plantio de *Tachigali vulgaris* sob diferentes níveis de adubação foi avaliada por meio de inventários aos 11 anos de idade. No inventário do plantio se avalia a altura e DAP de todas as árvores das parcelas. Para

determinação do volume foi utilizada a equação 1, anteriormente utilizada para estimativa de volume para plantios da espécie *T. vulgaris* com eficácia (TEIXEIRA *et al.*, 2024). A partir do volume das 48 árvores amostradas, a equação foi validada. Para estimativa do volume sem casca, foi realizada a subtração do volume da casca conforme a Equação 2. Para a determinação da estimativa de massa seca foi utilizada a Equação 3, onde MSM é a massa seca de madeira (kg/ha), Vsc é o volume sem casca (m<sup>3</sup>/ha), DB é a densidade básica da madeira (t/m<sup>3</sup>).

$$V_{cc} = e^{(-9.164635 + 1.912123 \ln[D_{eq}] + 0,751405 \ln[h]} \quad (1)$$

$$V_{sc} = V_{cc} - \left( V_{cc} * \frac{\text{casca}(\%)}{100} \right) \quad (2)$$

$$\text{MSM} = V_{sc} \times \text{DB} \quad (3)$$

## 2.5 Estimativa de massa de lignina, produtividade e densidade energética da madeira de *Tachigali vulgaris*

A estimativa de massa de lignina (t/ha), densidade energética da madeira (MJ/kg) e produtividade energética são descritas nas equações abaixo (equação 4, 6 e 7). A produtividade energética foi realizada tanto para as árvores individuais (GJ/árvore) como por hectare (GJ/ha).

$$\text{Massa de lignina} = \text{teor de lignina} (\%, \text{ base seca}) \times \text{MSM} \quad (4)$$

Para este cálculo, o teor de lignina obtido com base massa seca livre extrativos é convertido através da equação 5.

$$TL_{bs} = \frac{TL_{bmsle} \times (100 - \%ext)}{100} \quad (5)$$

Onde TL<sub>bs</sub> é o teor de lignina base seca; TL<sub>bmsle</sub> é o teor de lignina base massa seca livre de extrativos e %ext é o teor de extrativo base seca.

$$\text{Densidade energética} = \text{PCS} \times \text{DB} \quad (6)$$

$$\text{Produtividade energética} = \text{PCS} \times \text{MSM} \quad (7)$$

Onde MSM: Massa seca de madeira (kg/ha); PCS: Poder calorífico superior da madeira (GJ/kg) e DB: densidade básica.

Alguns aspectos do comportamento silvicultural de *Tachigali vulgaris* no plantio florestal como mortalidade, percentual de bifurcação e incremento médio anual (IMA) são apresentados na Tabela 3

Tabela 3 – Características inventariadas na floresta de *T. vulgaris* sob diferentes níveis de adubação

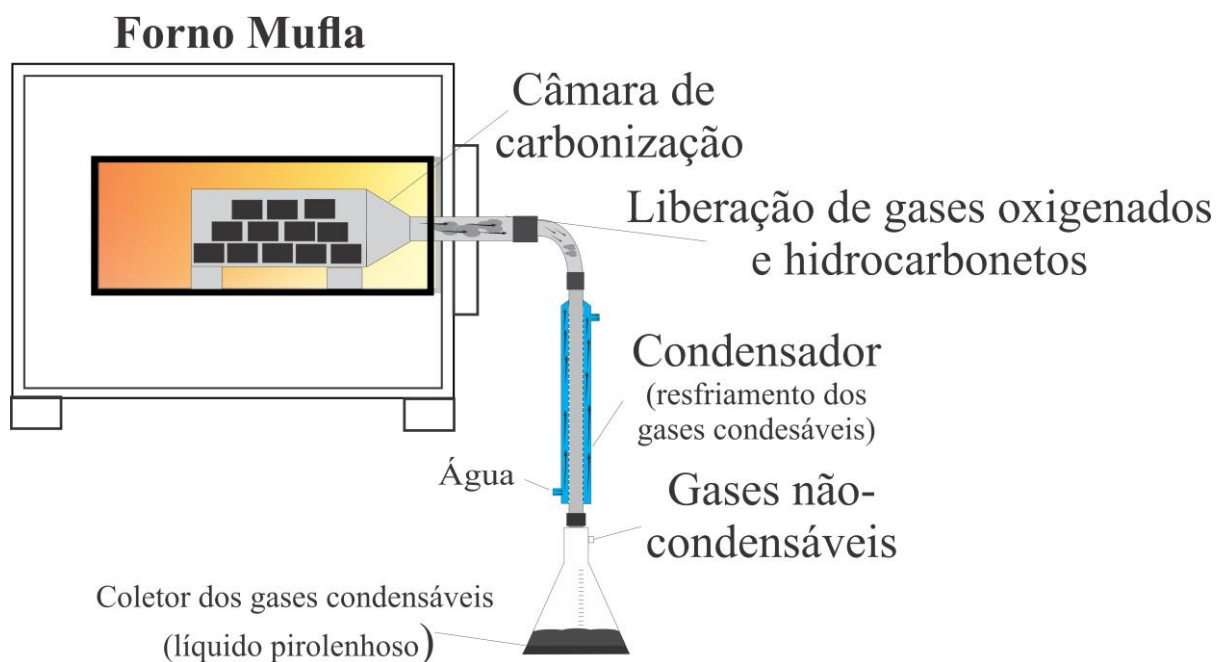
Textura	Adubação	Idade	Incremento médio anual (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	Sobrevivência (%)	Densidade (árvore.ha <sup>-1</sup> )	Árvores Bifurcadas (%)
Franco arenosa	0K + 0P	11	23,57 (7,21)	66,67 (23,57)	1111,11 (392,84)	75,00 (21,52)
Franco arenosa	390P+0K	11	24,94 (8,85)	66,67 (23,57)	1111,11 (392,84)	62,50 (8,33)
Franco arenosa	780P+343 K	11	27,97 (17,47)	58,33 (16,67)	972,22 (277,78)	43,75 (42,70)
Média			25,49 (11,07)	63,89 (19,89)	1064,81 (331,50)	60,42 (28,68)
Muito argilosa	0K + 0P	11	29,88 (18,50)	58,33 (21,52)	972,22 (358,61)	55,00 (52,60)
Muito argilosa	390P+0K 780P+343	11	26,26 (6,62)	45,83 (15,96)	763,89 (265,95)	75,00 (50,00)
Muito argilosa	K	11	18,44 (12,84)	45,83 (28,46)	763,89 (474,40)	25,83 (21,15)
Média			24,86 (13,23)	50,00 (21,32)	833,33 (355,33)	51,94 (44,75)
Média geral			25,18 (11,93)	56,94 (21,38)	949,07 (356,26)	56,18 (37,01)

Values in parentheses are the standard deviation

## 2.6 Produção e qualidade do carvão vegetal de *T. vulgaris* em laboratório

A produção de carvão de *T. vulgaris* foi realizada em forno elétrico tipo mufla com condensador resfriado à água e coletor de gases condensáveis (Figura 4). Foi realizado o agrupamento dos discos retirados ao longo do fuste das árvores em uma única amostra, totalizando 48 carbonizações.

Figura 4 - Sistema de carbonização laboratorial utilizado na carbonização da madeira de *T. vulgaris*



Fonte: Do autor (2024)

Entre 200g e 400g de madeira previamente seca em estufa ( $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  por 24 h) foram carbonizadas. O tempo total de carbonização foi de 4 h e 30 min, e a temperatura máxima foi de  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ , que foi mantida por 30 min.

As Equações 8, 9 e 10 referem-se aos rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (RGC), líquido pirolenhoso (RLP) e gases não condensáveis (RGNC). Para a realização dos cálculos são obtidas a massa seca em estufa à  $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  da massa de madeira inseridas no forno mufla. Após a carbonização são obtidas a massa do carvão e líquido pirolenhoso. O rendimento em gases não condensáveis é realizado pela diferença entre RGC e RLP.

$$RGC = \left( \frac{\text{Massa seca de carvão vegetal}(g)}{\text{Massa seca de madeira}(g)} \right) \times 100 \quad (8)$$

$$RLP = \left( \frac{\text{Massa de líquido pirolenhoso}(g)}{\text{Massa seca de madeira}(g)} \right) \times 100 \quad (9)$$

$$RGNC = 100 - (RGC + RLP) \quad (10)$$

Onde: RGNC é o rendimento de gases não condensáveis (% , base seca); RGC é o rendimento gravimétrico do carvão vegetal (% , base seca); e RLP é o rendimento do líquido pirolenhoso (% , base seca).

A densidade relativa aparente do carvão vegetal foi determinada de acordo com o método hidrostático, determinando-se o volume por meio de imersão em água e a massa seca do carvão vegetal em estufa.

Para determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo do carvão vegetal da espécie *T. vulgaris* foi utilizado o procedimento descrito na norma D1762-84 (ASTM, 2013).

Para a determinação de PCS, as frações das amostras que passaram pela peneira de malha 40 e ficaram retidos na peneira de malha 60 foram utilizados e analisados com Ika Bomba calorimétrica digital C200, conforme descrito na norma E711-87 (ASTM, 2013)

A massa seca de carvão vegetal foi estimada pela equação 11. A obtenção da densidade e produtividade energética do carvão da espécie foi realizada a partir da Equação 12 e Equação 13.

$$\text{Massa seca de carvão vegetal} = \text{RGC} \times \text{MSM} \quad (11)$$

$$\text{Densidade energética} = \text{PCS} \times \text{DRA} \quad (12)$$

$$\text{Produtividade energética} = \text{PCS} \times \text{MSC} \quad (13)$$

Onde MSM: Massa seca de madeira (0 % de umidade); RGC: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (% , base massa seca); PCS: Poder calorífico superior do carvão vegetal (MJ/kg); DRA: densidade aparente do carvão vegetal (kg/m<sup>3</sup>) e MSC refere-se a massa seca de carvão vegetal (t/ha).

A Equação 14 refere-se ao consumo específico teórico, ou seja, o volume de madeira necessário para produzir uma tonelada de carvão vegetal.

$$CE = \frac{1}{DB (t/m^3) \left[ \frac{RGC (\%)}{100} \right]} \quad (14)$$

Em que: CE é o consumo específico (m<sup>3</sup> de madeira/t de carvão vegetal); DB é a densidade básica da madeira (t/m<sup>3</sup>); e RGC é o carvão rendimento gravimétrico (% , base seca).

A Equação 15 refere-se a estimativas de eficiência energética teórica da transformação da madeira de *T. vulgaris* em carvão vegetal. Esse parâmetro avalia a quantidade de energia mantida no carvão vegetal após a carbonização.

$$\text{Eficiência energética} = RGC * \left( \frac{PCS \text{ carvão}}{PCS \text{ madeira}} \right) \quad (15)$$

Em que: RGC é o rendimento gravimétrico do carvão vegetal (% , base seca); PCS é o poder calorífico superior (MJ/kg, base massa seca)

As equações 16 e 17 referem-se aos rendimentos em carbono fixo e a estimativa de produtividade em carbono fixo considerando um forno com capacidade de 283 m<sup>3</sup> de madeira

$$RCF = \left( \frac{RGC * TCF}{100} \right) \quad (16)$$

Em que: RFC é o rendimento fixo de carbono (% , base seca); RGC é o rendimento gravimétrico de carvão vegetal (% , base seca), e CF é o carbono fixo teor de carvão vegetal (% , base seca).

$$PCF = DB * 283 * \left( \frac{RCF}{100} \right) \quad (17)$$

Em que: PCF é a produção estimada de carbono fixo por ciclo de carbonização (t/ciclo); DB é a densidade básica da madeira (t/m<sup>3</sup>); 283 é o volume nominal hipotético de um forno de tijolos retangulares (m<sup>3</sup>). Este volume hipotético também foi utilizado por Protásio *et al.* (2021a); e RCF é o rendimento fixo de carbono (% , base seca).

## 2.7 Análise estatística dos dados

O experimento apresentou como fatores o tipo de solo, adubações e o tipo de fuste. Foi considerado um delineamento em blocos casualizados (DBC). Devido ao grande número de variáveis explicativas, foram utilizados modelos mistos para avaliar o efeito dos fatores nas características de qualidade da madeira e carvão. Modelos estatísticos lineares mistos são utilizados para analisar dados que possuem uma estrutura de agrupamento ou hierarquia. A partir destes modelos foi possível avaliar a interação entre os fatores. O tipo de solo, adubações e o tipo de fuste foram considerados como efeitos fixos e os blocos como efeito aleatório (Equação 18). Ademais, foram realizadas correlações entre as características de crescimento e as propriedades da madeira e carvão vegetal. O processamento dos dados foi realizado no software R (Core Team, 2023).

$$VR = A + F + S + A \times S + F \times S + A \times F + A \times F \times S + Bloco + \mathcal{E} \quad (18)$$

Em que: *VR* é a variável resposta, *A* é a adubação, *S* é a textura de Solo e *F* é o tipo fuste.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Aspectos de crescimento individual de *Tachigali vulgaris*

A Tabela 4 mostra as características médias de crescimento das 48 árvores amostradas. Não houve efeitos estatísticos significativos dos tratamentos analisados nestes parâmetros (Tabela 5). Os valores médios de DAPEq são semelhantes aos encontrados para a espécie aos 8,5 anos (15,40 cm) no espaçamento 3 x 2 m (MORAES *et al.*, 2023), demonstrando baixo crescimento da espécie após essa idade, como é caso do nosso estudo. De maneira geral, os valores médios de massa seca de madeira (MSM) foram maiores no solo franco arenoso (145,13 kg ± 61,56 kg) que no solo de textura muito argilosa (133,95 kg ± 86,78 kg). A massa seca de madeira é produto da densidade básica (discutida no próximo tópico) e volume de madeira, portanto, maiores valores dessa variável implicam em maior produção de carvão vegetal e energia térmica.

Em *Eucalyptus* aos 6 anos, idade dentro da faixa do ciclo de corte do gênero no Brasil, encontra-se valores de DAP variando entre 14,00 cm e 17,10 cm e a altura total entre 21,93 cm e 25,73 cm (Protásio *et al.*, 2020).

Tabela 4 - Características de crescimento das árvores amostradas de *T. vulgaris*.

Textura	Adub	DAPEq (cm)	Dsc (cm)	HT (m)	Vsc (m <sup>3</sup> )	MSM (kg)
Franco arenosa	0K + 0P	18,70 (2,83)	21,56 (4,01)	21,76 (1,88)	0,33 (0,09)	177,09 (55,07)
Franco arenosa	390P+0K	16,66 (2,25)	20,10 (2,58)	19,74 (2,94)	0,26 (0,08)	131,53 (43,72)
Franco arenosa	780P+343K	15,80 (4,43)	18,52 (5,86)	19,56 (2,91)	0,24 (0,13)	126,76 (75,77)
<b>Média</b>		<b>17,06 (±3,39)</b>	<b>20,06 (4,36)</b>	<b>20,35 (2,71)</b>	<b>0,28 (0,10)</b>	<b>145,13 (61,56)</b>
Muito argilosa	0K + 0P	16,55 (4,15)	19,94 (5,10)	17,52 (2,97)	0,241 (0,16)	126,90 (92,23)
Muito argilosa	390P+0K	17,78 (5,56)	21,69 (7,28)	19,95 (3,24)	0,319 (0,23)	158,52 (111,49)
Muito argilosa	780P+343K	16,38 (2,95)	19,64 (3,20)	17,56 (2,44)	0,219 (0,10)	116,42 (52,04)
<b>Média</b>		<b>16,91 (±4,21)</b>	<b>20,42 (5,29)</b>	<b>18,34 (3,01)</b>	<b>0,26 (0,17)</b>	<b>133,95 (86,78)</b>
Textura	Fuste	DAPEq (cm)	Dsc (cm)	HT (m)	Vsc (cm)	MSM (kg)
Franco arenosa	BF	17,13 (2,80)	19,77 (4,86)	19,42 (3,10)	0,280 (0,10)	147,11 (56,49)

Muito argilosa	BF	18,43 (4,81)	21,51 (5,51)	17,85 (3,23)	0,311 (0,21)	161,79 (106,86)
<b>Média</b>		<b>17,80</b> <b>(3,95)</b>	<b>20,67</b> <b>(5,18)</b>	<b>18,60</b> <b>(3,20)</b>	<b>0,30</b> <b>(0,16)</b>	<b>154,74</b> <b>(85,02)</b>
Franco arenosa	NB	16,98 (4,02)	20,35 (3,98)	21,29 (1,95)	0,274 (0,11)	143,148 (68,73)
Muito argilosa	NB	15,11 (2,53)	19,14 (4,97)	18,93 (2,75)	0,198 (0,07)	101,041 (37,66)
<b>Média</b>		<b>16,09</b> <b>(3,45)</b>	<b>19,77</b> <b>(4,42)</b>	<b>20,16</b> <b>(2,61)</b>	<b>0,24</b> <b>(0,099)</b>	<b>123,01</b> <b>(58,90)</b>
<b>Média geral</b>		<b>16,98</b> <b>(3,77)</b>	<b>20,24</b> <b>(4,80)</b>	<b>19,35</b> <b>(3,00)</b>	<b>0,27</b> <b>(0,13)</b>	<b>139,54</b> <b>(74,64)</b>

Adub.: tratamentos de adubação; DAPEq: Diâmetro à altura do peito equivalente; Dsc: diâmetro da base. HT: altura total; Vsc: volume sem casca; MSM: massa seca de madeira; BF: bifurcada; NB: não bifurcada. Valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão. Fonte: Do autor (2024).

Tabela 5 - Resultados de p-valor dos modelos mistos para os parâmetros de crescimento de *T. vulgaris*.

	DAPEq	Dsc	HT	Vsc	MSM
Parâmetros	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor
Fustes	0,9041	0,9390	0,0555	0,9967	0,8859
Adubação	0,5171	0,4814	0,1570	0,2954	0,5004
Solos	0,3644	0,7909	0,1142	0,6520	0,6259
Solosxfustes	0,1698	0,8309	0,5333	0,2037	0,2056
Solosxadubação	0,2648	0,9805	0,0660	0,3005	0,3371
Adubaçãoxfustes	0,9514	0,9050	0,8421	0,9412	0,8646
Solosxadubaçãoxfustes	0,9032	0,7450	0,9663	0,9874	0,9179

DAPEq: Diâmetro à altura do peito equivalente; Dsc: diâmetro da base. HT: altura total; Vsc: Volume sem casca; MSM: massa seca de madeira. Fonte: Do autor (2024)

Em geral, espera-se que as fertilizações tenham grande efeito no crescimento em florestas plantadas. Em teste de adubação potássica para plantios de *Eucalyptus grandis*,

foram encontrados aumento de 0,07 m<sup>3</sup>/árvore para 0,20 m<sup>3</sup>/árvore pela adição de K (Chambi-Legoas *et al.*, 2021). Para espécies nativas, sem melhoramento genético, o efeito pode ser variável. A adubação fosfatada não causou efeito no crescimento das espécies amazônicas *Apuleia leiocarpa* e *Dipteryx odorata* com estágios iniciais de crescimento (Carvalho *et al.*, 2022). Já para *Cedrela fissilis* houve efeito significativos da adubação. Essas diferenças foram atribuídas a estratégias contrastantes no uso de nutrientes por essas plantas: algumas espécies têm estratégias mais conservadoras no uso de nutrientes e, por isso, a resposta a adubação é mais lenta (Carvalho *et al.*, 2022).

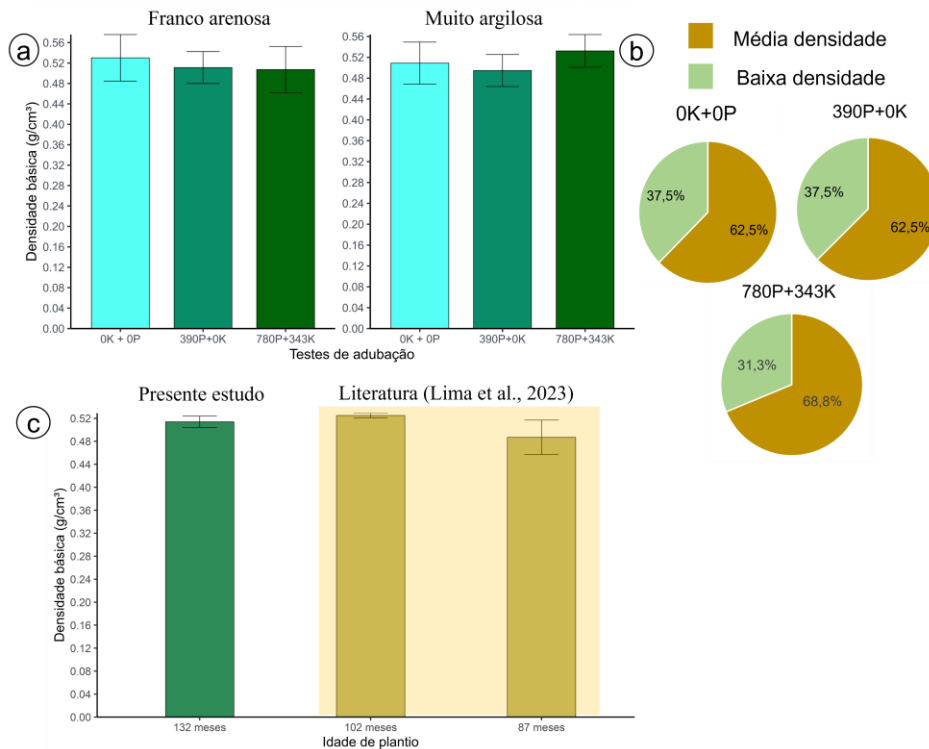
Além disso, espécies tropicais tem adaptações para manutenção de altas taxas de crescimento em locais com baixa concentrações de fósforo devido a maior capacidade em utilizar fósforo orgânico, ou seja, ainda não mineralizado, no seu metabolismo (Aoyagi; Kitayama; Turner, 2022). Além disso, elas apresentam alta capacidade de absorção e eficiência no uso de fósforo. Para *Tachigali vulgaris* aos 3 anos foi verificado aumento da biomassa total das plantas em razão da adubação potássica e fosfatada (Simões *et al.*, 2022). No entanto, para plantas aos 10 anos não foi verificada efeito da adubação nas características de crescimento (Teixeira *et al.*, 2024). Isso sugere que a espécie apresenta melhor resposta a adubação nos primeiros anos de crescimento. Espécies de *Eucalyptus* também apresentam essa característica (Gonçalves *et al.*, 2004).

### 3.2 Variação da densidade da madeira de *Tachigali vulgaris*

A densidade da madeira de *Tachigali vulgaris* nas diferentes texturas de solo e níveis de adubação é apresentada na Figura 5a. Não houve diferenças significativas na densidade básica entre as texturas de solo. Para o solo classificado como latossolo amarelo de textura franco arenosa, a densidade básica foi de 0,516 g/cm<sup>3</sup> ( $\pm$  0,04 g/cm<sup>3</sup>). Já para o latossolo amarelo de textura muito argilosa, a densidade básica foi de 0,512 g/cm<sup>3</sup> ( $\pm$  0,04 g/cm<sup>3</sup>). Em solos de textura franco arenosa, as maiores densidade apresentadas foram para o tratamento sem adubações potássicas e fosfatadas (0K+0P) com média de 0,530 g/cm<sup>3</sup> ( $\pm$ 0,05 g/cm<sup>3</sup>). Já para os solos em textura muito argilosa, a maior densidade básica média foi observada no tratamento 780P+343K (0,532 $\pm$ 0,03 g/cm<sup>3</sup>). A Figura 5b mostra a proporção entre densidade básica classificada como baixa densidade (<0,500 g/cm<sup>3</sup>) e média densidade ( $\geq$ 0,500 g/cm<sup>3</sup>) (Csanády; Magoss; Tolvaj, 2015). Os tratamentos apresentaram proporções semelhantes entre as classes de densidade. No entanto, o tratamento 780P+343K apresentou as maiores proporções de árvores com média densidade básica (68,8 %).

Comparando os valores encontrados para *T. vulgaris* com valores encontrados para a espécie com menores idades de plantio (Lima *et al.*, 2023) (Fig. 5c), é possível observar que houve maior desvio dos dados aos 87 meses. Já os valores de densidade média básica foram superiores aos 102 meses ( $0,525 \pm 0,004 \text{ g/cm}^3$ ). Aos 132 meses, a média geral foi de  $0,514 \text{ g/cm}^3 (\pm 0,01 \text{ g/cm}^3)$  e aos 87 meses a média foi de  $0,487 \text{ g/cm}^3 (\pm 0,03 \text{ g/cm}^3)$ .

Figura 5 - (a) Densidade básica da madeira de *Tachigali vulgaris* em diferentes tipos de solo e níveis de adubação; (b) proporção entre árvores de *T. vulgaris* que tiveram madeira de baixa densidade básica ( $<0,500$ ) e média densidade básica ( $\geq 0,500$ ); (c) comparação da densidade básica de *Tachigali vulgaris* encontrada no presente estudo, aos 132 meses com dados encontrados na literatura para 102 meses e 87 meses.



Fonte: Do autor (2024)

Embora houve variação da densidade básica entre os solos e adubações, a análise de modelo linear misto não identificou efeito significativos destes parâmetros. No entanto, observou-se que árvores com DAP equivalente (DAPEq) superiores apresentaram maiores densidades. Este efeito se estende ao tipo de fuste quando se considera apenas o fuste de maior diâmetro das árvores bifurcadas (fuste principal). A Tabela 6 mostra os resultados das estatísticas dos parâmetros avaliados na análise de modelo misto

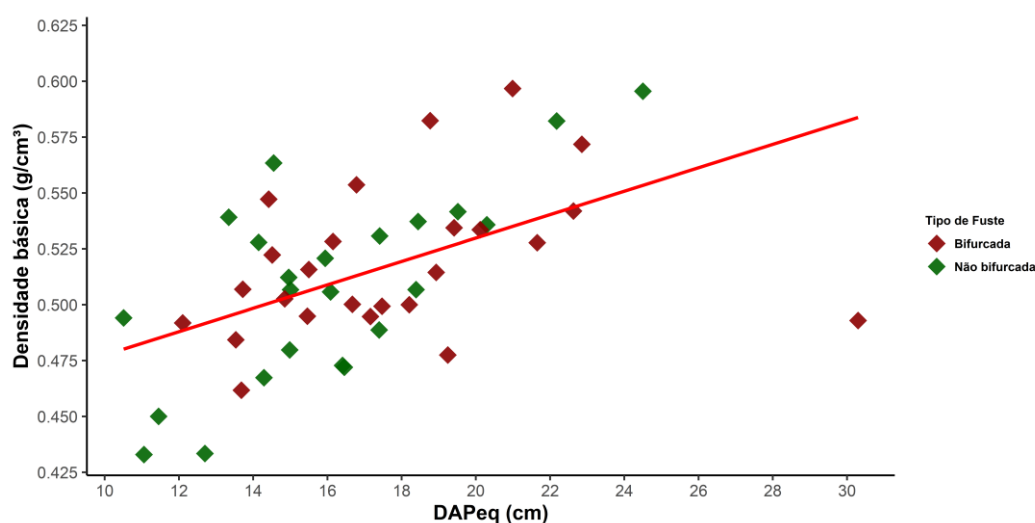
Tabela 6 - Análise de modelo linear misto para a densidade média da árvore e fuste de maior diâmetro.

	Densidade média	Densidade do fuste principal*
Parâmetros	p-valor	p-valor
Solo	0,4840	0,8276
Adub	0,1719	0,1989
Fuste	0,5359	0,0395
DAPeq	0,0000	0,0001
Solo x Adub	0,3565	0,1733
Solo x Fuste	0,3252	0,4111
Adub x Fuste	0,4035	0,5325
Adub x DAPeq	0,0750	0,0517
Solo x Adub x Fuste	0,8124	0,8466

\*Neste modelo foi considerado o DAP apenas do fuste principal. Fonte: Do autor (2024)

A partir do modelo gerado pode se estimar que para cada 2 cm de DAPeq acrescido em relação ao DAPeq médio (16,98 cm), a densidade básica da madeira aumentará 0,01 g/cm<sup>3</sup>. Árvores com DAP < 15 cm apresentaram densidade básica média abaixo de 0,500 g/cm<sup>3</sup>. Essa faixa de densidade não é considerada adequada para carbonização devido à redução da produtividade de carvão vegetal por ciclo nos fornos de alvenaria utilizados no Brasil (Protásio *et al.*, 2021a). Esses resultados sugerem que o DAP pode ser um parâmetro para classificação de árvores de *Tachigali vulgaris* adequadas para produção de carvão vegetal. A Figura 6 mostra a relação entre DAPeq e densidade básica da madeira da espécie.

Figura 6 – Relação entre DAPeq e densidade básica da madeira da espécie *Tachigali vulgaris*



Fonte: Do autor (2024)

O aumento da densidade em razão do DAPEq pode estar relacionado a proporção de lenho com maiores densidades radialmente na árvore (da medula até a base). A região mais próxima da medula foi formada nos primeiros anos de crescimento e geralmente apresenta lenho de menor densidade como já observado em alguns estudos (Hein *et al.*, 2016; Machado *et al.*, 2014). Dessa forma, em árvores com diâmetro maior, a proporção entre o lenho de densidade menor, formado no início do crescimento e o lenho mais recente, com densidade básica maior, diminuí. Em árvores de *T. vulgaris* foi observado maior proporção de densidade aparente em árvores com maior diâmetro, indicando o mesmo comportamento para densidade básica (Moraes *et al.*, 2023).

A ausência de efeito significativo do tipo de fuste na densidade básica é diferente do encontrado para a espécie aos 87 meses (Lima *et al.*, 2023), onde foi encontrado maiores densidades para as árvores não bifurcadas. Esse efeito parece estar relacionado a maturidade das árvores. Embora maiores densidades foram encontradas para as árvores não bifurcadas aos 87 meses, aos 102 meses não houve diferenças significativas entre a densidade das árvores bifurcadas e não bifurcadas (Lima *et al.*, 2023). Isso sugere que a densidade das árvores bifurcadas se igualou as árvores não bifurcadas, mostrando variação do comportamento observado conforme a idade do plantio aumenta. A idade promove aumento da maturidade do câmbio lateral. Por causa disso, há um aumento da densidade básica (Kärenlampi; Riekkinen, 2004).

Quando se considera somente o fuste principal, os resultados mostram que a densidade das árvores não bifurcadas é estatisticamente inferior à densidade das árvores bifurcadas. Em média, a densidade básica do fuste principal das árvores bifurcadas foi 0,02 g/cm<sup>3</sup> maior que o das árvores não bifurcadas.

A Figura 7 mostra o comportamento da densidade básica ao longo do fuste. Em geral, a posição com maior densidade básica foi observada na base da árvore com resultados médios de 0,624 g/cm<sup>3</sup> ( $\pm 0,09$  g/cm<sup>3</sup>). Dessa forma, considera-se que a posição da base não é adequada para amostragem da madeira da espécie visando à avaliação da densidade básica média da árvore. Esse valor é cerca de 22% superior a densidade básica média das árvores.

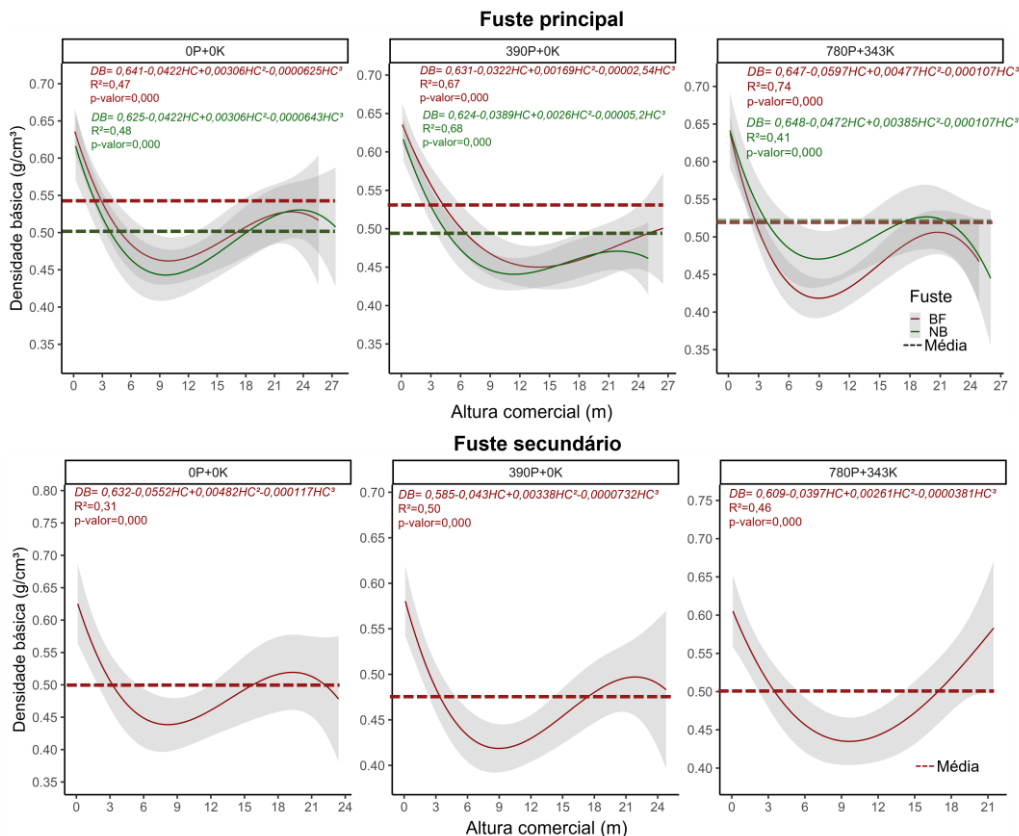
A partir da base, a densidade básica da árvore tem um decréscimo, um leve aumento e então uma segunda redução, que ocorre na altura de 100% ou 75% em relação à altura total da árvore. Moraes *et al.* (2023) encontraram o mesmo comportamento para a espécie *T. vulgaris* aos 102 meses em experimento de espaçamento de plantio. No primeiro decréscimo (0,418

$\text{g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ ), há uma redução de 33,8% ( $\pm 7,0\%$ ) da densidade básica e acontece, em média, até 8,4 metros de altura na árvore, variando entre 3 e 13,6 metros. Em relação a densidade média, essa redução equivale a 23,7% ( $\pm 9,0\%$ ).

Embora a posição das bifurcações tenha variado entre 0,23 m e 1,23 m, a densidade básica na base da bifurcação foi equivalente à da base da árvore  $0,624 \text{ g/cm}^3$  ( $\pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ ). As bifurcações são áreas passíveis de rompimento devido a forças da gravidade e ventos. O aumento da densidade nessa área promove maior resistência a essas forças e provavelmente é causada por modificações anatômicas. Para *Corylus avellana* foi encontrada menor quantidade de vasos e maior espessamento da parede celular nessa região (Slater *et al.*, 2014). Como consequência, os autores encontraram maior densidade da madeira na área da bifurcação para essa espécie.

Com base nos modelos gerados é possível verificar as posições ao longo do fuste em que as árvores de *T. vulgaris* apresentaram valores de densidade semelhantes às da densidade básica média. Em geral, as posições com valores mais semelhantes à média de densidade básica das árvores variaram entre 2,5 e 6,0 metros.

Figura 7 - Comportamento da densidade básica de *T. vulgaris* ao longo do fuste.



Entender o comportamento da densidade básica ao longo do fuste é importante para melhor utilização da madeira. Se o tronco das árvores de tachi forem seccionados para diversas finalidades, é preciso saber, por exemplo, que a densidade no fuste na altura de 6 m a 12 m é diferente da altura de 0,1 m a 3 m. A densidade básica nessas secções foi de 0,472 g/cm<sup>3</sup> (0,06 g/cm<sup>3</sup>) e 0,620 g/cm<sup>3</sup> (0,62), respectivamente. Para melhor comparação na produção de carvão vegetal, um forno hipotético, que pode conter o volume de 283 m<sup>3</sup> de madeira, alocaria cerca 133 toneladas de madeira seca considerando o lenho oriundo das alturas 6 a 12 metros. Já para a altura de 0,1 a 3 metros, o forno alocaria 175 toneladas de madeira. Maiores massa de madeiras por forno implicam em maior produção de carvão vegetal. Se considerado que cerca de 30% da massa de madeira se tornará carvão vegetal, a diferença de produção entre os 2 casos foi de aproximadamente 12 toneladas (40 t e 52 t). Mais detalhes sobre a produção, produtividade e qualidade do carvão vegetal serão discutidos no tópico 3.5.

### 3.3 Propriedades químicas e energéticas da madeira da espécie *T. vulgaris*

A Tabela 7 mostra os resultados da análise de modelo linear misto encontrados para as propriedades químicas e energéticas de *T. vulgaris*. Houve efeito dos parâmetros avaliados, com 95% de confiabilidade, nos teores de cinzas, extrativos, lignina solúvel e lignina total. As cinzas foram influenciadas pelo tipo de fuste. Os fatores adubação e tipo de fuste foram estatisticamente significativos para o teor de extrativos. A interação entre fuste e solo afetaram a lignina insolúvel e lignina total.

Tabela 7 – Resultados da análise de modelo misto para as variáveis químicas e energéticas da madeira de *T. vulgaris*.

	Ceme	PCS	Cinzas	Extrativos	Lignina solúvel	Lignina Insolúvel	Lignina total	Densidade Energética
Parâmetros	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor
Adub	0,981	0,648	0,930	0,038*	0,972	0,543	0,545	0,309
Fuste	0,674	0,107	0,040*	0,001*	0,317	0,062	0,057	0,571
Solo	0,746	0,409	0,904	0,160	0,271	0,181	0,091	0,417
Adub x solo	0,608	0,237	0,417	0,868	0,998	0,838	0,517	0,175
Fuste x solo	0,928	0,944	0,187	0,459	0,968	0,003*	0,002*	0,881
Adub x fuste	0,244	0,458	0,982	0,411	0,078	0,843	0,987	0,897
Adub x fuste x solo	0,749	0,944	0,974	0,920	0,937	0,669	0,864	0,882

Fonte: Do autor (2024)

As Tabelas 8 e 9 apresentam os valores médios encontrados entre os testes de adubação e bifurcações, respectivamente. A Tabela 8 também apresenta uma comparação com a qualidade de outras biomassas amplamente utilizadas energeticamente.

Tabela 8 – Propriedades energéticas e químicas da madeira de *T. vulgaris* por textura de solo e teste de adubação.

T	Adub.	Cz (%, bs)	Cerne (%)	PCS (MJ/kg)	Ext (%, bs)	Lignina Insolúvel (%) <sup>1</sup>	Lignina Solúvel (%) <sup>1</sup>	Lignina Total (%) <sup>1</sup>	DE (GJ/m <sup>3</sup> )	PE (GJ/árvore)
Franco										
franco	0K+0P	0,31 (0,12)	48,22 (5,69)	18,88 (0,46)	4,18 (0,99)	29,22 (1,04)	1,94 (0,50)	31,17 (1,00)	10,02 (0,93)	3,34 (1,05)
arenosa										
Franco										
franco	390P+0K	0,33 (0,15)	52,89 (6,57)	19,00 (0,50)	4,41 (0,92)	29,90 (0,83)	1,86 (0,23)	31,75 (0,76)	9,70 (0,52)	2,49 (0,81)
arenosa										
Franco										
franco	780P+343K	0,32 (0,15)	51,60 (2,89)	18,59 (0,48)	4,54 (0,91)	29,61 (0,91)	1,77 (0,22)	31,38 (0,94)	9,44 (0,95)	2,37 (1,45)
arenosa										
<b>Média</b>		<b>0,32</b> (±0,13)	<b>50,90</b> (5,44)	<b>18,82</b> (0,49)	<b>4,38</b> (0,91)	<b>29,58</b> (0,93)	<b>1,86</b> (0,34)	<b>31,43</b> (0,90)	<b>9,72</b> (0,82)	<b>2,73</b> (1,17)
Muito										
Argilosa	0K + 0P	0,31 (0,17)	50,81 (10,0)	19,02 (0,42)	4,50 (0,28)	29,39 (1,21)	2,07 (0,37)	31,45 (0,95)	9,67 (0,73)	2,42 (1,76)
Muito										
Argilosa	390P+0K	0,42 (0,19)	51,22 (9,63)	18,98 (0,54)	5,04 (0,53)	29,26 (1,17)	1,99 (0,07)	31,25 (1,14)	9,39 (0,67)	3,03 (2,17)
Muito										
Argilosa	780P+343K	0,42 (0,07)	53,29 (8,78)	19,06 (0,30)	5,24 (0,80)	29,19 (0,67)	1,83 (0,26)	31,02 (0,86)	10,15 (0,70)	2,22 (0,99)
<b>Média</b>		<b>0,38</b> (±0,16)	<b>51,77</b> (9,15)	<b>19,02</b> (0,42)	<b>4,93</b> (0,64)	<b>29,28</b> (1,00)	<b>1,96</b> (0,27)	<b>31,24</b> (0,97)	<b>9,74</b> (0,74)	<b>2,56</b> (1,68)
<b>Média geral</b>		<b>0,35</b> (±0,05)	<b>51,34</b> (1,80)	<b>18,92</b> (0,17)	<b>4,65</b> (0,40)	<b>29,43</b> (0,28)	<b>1,91</b> (0,11)	<b>31,34</b> (0,26)	<b>9,73</b> (0,78)	<b>2,65</b> (1,43)
<i>Eucalyptus</i> spp. <sup>2</sup> (Literatura)		<b>0,20*</b> (±0,04)	<b>63,2**</b> (10,9)	<b>19,40*</b> (0,20)	<b>4,25**</b> (0,92)	<b>24,2***</b> (3,4)	<b>3,95***</b> (5,6)	<b>29,8*</b> (1,49)	<b>10,39*</b> (0,70)	<b>1,88</b> (0,39)
<b>Bagaço de cana</b> <sup>3</sup> (Literatura)		<b>2,29<sup>A</sup></b> (± 0,03)	-	<b>16,94<sup>A</sup></b> (1,24)	<b>5,63<sup>B</sup></b> (2,31)	<b>19,40<sup>B</sup></b> (1,76)	<b>3,36<sup>B</sup></b> (1,06)	<b>22,76<sup>B</sup></b> (1,74)	-	-

T: textura; Adub: Adubação; Cz: teor de cinzas; PCS: Poder calorífico superior; Ext. Extrativos. DE: Densidade energética; PE: Produtividade energética; <sup>1</sup>base massa seca livre de extrativos; <sup>2</sup>Fonte: \*(Protásio *et al.*, 2020);\*\*(Gominho *et al.*, 2020);\*\*\*(Zanuncio *et al.*, 2021). Fonte: <sup>A</sup>(Arni, 2018); Adaptado de <sup>B</sup>(Rocha *et al.*, 2015). Valores entre parênteses representam o desvio padrão. Fonte: Do autor (2024)

De maneira geral, os resultados da madeira de *T. vulgaris* para o teor de lignina (31,34%±0,26%, base seca livre de extrativos), extrativos (4,65%±0,40%, base seca) e poder calorífico superior (18,92 ± 0,17 MJ/kg, base seca) foram semelhantes ou levemente maiores

que os encontrados para espécies do gênero *Eucalyptus*, cuja lenha e carvão vegetal são amplamente comercializadas no Brasil (Pena-Vergara *et al.*, 2022). Esses resultados indicam o potencial da espécie para uso energético. Outros estudos com a espécie demonstraram esse potencial (Santos *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2021a). A lignina e extrativos, são componentes de grande influência na produção de carvão vegetal. Maiores teores de lignina e extrativos implicam em maior rendimento em carvão, pois possuem constituintes químicos termicamente estáveis (Demirbaş, 2003; Protásio *et al.*, 2021b; Uzoejinwa *et al.*, 2018).

Baseado nas análises de modelo linear misto, as árvores não bifurcadas apresentaram percentuais significativamente maiores de extrativos ( $4,94\% \pm 0,77$ ) na madeira que as árvores bifurcadas ( $4,39\% \pm 0,80\%$ ). As maiores áreas de cerne nas árvores não bifurcadas podem ter influenciado positivamente os teores de extrativos nessas árvores. Entre os testes de adubação, o maior tratamento (780P+343K) também apresentou valores superiores de extrativos. Em relação à lignina insolúvel e lignina total, as árvores não bifurcadas no solo argiloso apresentaram os menores valores ( $30,62 \pm 0,54\%$  base massa seca livre de extrativos). O menor teor de lignina no solo muito argiloso pode estar associado a maior disponibilidade hídrica apresentada em solos argilosos. São relatados maiores teores de lignina sob condições de estresse hídrico (Barker-Rothschild *et al.*, 2023). Além disso, esse resultado pode estar relacionado ao maior teor de nitrogênio nessa textura solo. Essa hipótese é baseada em estudos que encontraram uma correlação negativa entre o nitrogênio do solo e teor de lignina em florestas de *Pinus sylvestris* (Mandre; Pärn; Ots, 2006) e pesquisas que, além de encontrarem maiores teores de lignina em solos pobres em nitrogênio, descobriram que dois genes responsáveis pela síntese da lignina foram negativamente regulados pela presença de nitrogênio (Novaes *et al.*, 2009). Embora não tenham sido feitas análises de nitrogênio das áreas de plantio estudadas, o solo muito argiloso apresentou maior quantidade de matéria orgânica ( $21,5 \text{ g/dm}^3$ ) em relação ao solo de textura franco arenosa ( $11,1 \text{ g/dm}^3$ ). Maiores teores de material orgânica do solo é indicativo de maior quantidade de nitrogênio (Sparling *et al.*, 2006).

O teor de cinzas da madeira de *T. vulgaris* ( $0,35 \pm 0,05\%$  bs) foi relativamente maior que o encontrado para espécies de *Eucalyptus* ( $0,20 \pm 0,04\%$  bs). No entanto, ainda é considerado baixo. Biomassas lenhosas podem apresentar teor de cinzas entre 0,1% e 10,7% (Vassilev *et al.*, 2017). Os testes de adubação e textura de solo não afetaram o teor de cinzas (média geral de  $0,35\% \pm 0,05$ ). No entanto, as árvores bifurcadas apresentaram estatisticamente valores maiores de cinzas ( $0,39\% \pm 0,15$ ) que as árvores não bifurcadas ( $0,31\% \pm 0,14$ ).

Tabela 9 – Propriedades energéticas e químicas da madeira de *T. vulgaris* por textura de solo e tipo de Fuste.

Textura	Tipo de Fuste	Cinzas (%)	Razão C/A	PCS (MJ/kg)	Extrativos (%)	Lignina insolúvel (%)*	Lignina solúvel (%)*	Lignina total (%)*	Densidade energética (GJ/M <sup>3</sup> )
Franco arenosa	BF	0,38 (±0,14)	1,09 (±0,15)	18,72 (±0,34)	4,02 (±0,94)	29,24 (±0,94)	1,87 (±0,40)	31,10 (±0,89)	9,80 (±0,63)
Muito argilosa	BF	0,39 (±0,17)	1,11 (±0,35)	18,98 (±0,41)	4,73 (±0,45)	29,77 (±1,00)	1,99 (±0,21)	31,77 (±0,95)	9,78 (±0,70)
<b>Média</b>		<b>0,39</b>	<b>1,10</b>	<b>18,85</b>	<b>4,39</b>	<b>29,52</b>	<b>1,93</b>	<b>31,45</b>	<b>9,79</b>
<b>Desvio padrão</b>		<b>0,15</b>	<b>0,27</b>	<b>0,39</b>	<b>0,80</b>	<b>0,99</b>	<b>0,32</b>	<b>0,96</b>	<b>0,65</b>
Franco arenosa	NB	0,25 (±0,10)	1,03 (±0,28)	18,93 (±0,60)	4,74 (±0,75)	29,92 (±0,82)	1,85 (±0,27)	31,76 (±0,81)	9,64 (±1,00)
Muito argilosa	NB	0,37 (±0,15)	1,17 (±0,41)	19,08 (±0,44)	5,16 (±0,76)	28,69 (±0,64)	1,93 (±0,34)	30,62 (±0,54)	9,69 (±0,82)
<b>Média</b>		<b>0,31</b>	<b>1,10</b>	<b>19,00</b>	<b>4,94</b>	<b>29,33</b>	<b>1,89</b>	<b>31,22</b>	<b>9,67</b>
<b>Desvio padrão</b>		<b>0,14</b>	<b>0,34</b>	<b>0,52</b>	<b>0,77</b>	<b>0,96</b>	<b>0,30</b>	<b>0,90</b>	<b>0,90</b>

\*base massa seca livre de extrativos – bmsle. Fonte: Do autor (2024)

As cinzas têm efeito negativo na qualidade da madeira para energia, pois podem causar problemas nas caldeiras (Vassilev *et al.*, 2017). Nas caldeiras, os inorgânicos presentes nas cinzas podem entrar em ponto de fusão, diminuindo a transferência de calor e corroendo os equipamentos de queima. Além dos custos de manutenção decorrentes desses processos, há a perda econômica devido a inatividade da caldeira (Kumar; Kumar; Handa, 2018).

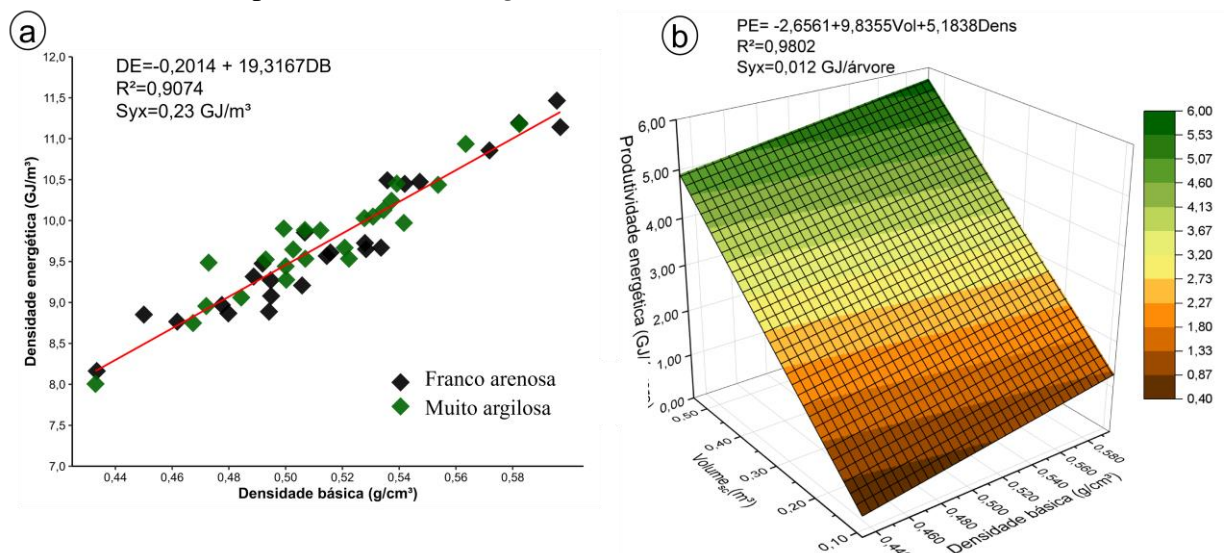
Para melhor visualização do que representa essa diferença de percentuais de cinzas entre os tipos de fustes, é possível realizar uma estimativa da massa das cinzas produzidas em caldeira entre os dois tratamentos: considerando o sistema de combustão de caldeira de leito fluidizado circulante de biomassa descrito por Wei *et al.* (2023) com fluxo de biomassa de 35286 kg/h com umidade de 20% (base úmida) é possível estimar que a produção de cinzas utilizando árvores não bifurcadas seria de 82,50 kg/h (±39,52 kg/h) enquanto as árvores bifurcadas produziriam 110,09 kg/h (±42,34 kg/h).

O maior teor de cinzas na madeira das árvores bifurcadas pode estar relacionado ao cerne e alburno. Embora os percentuais dessas características não diferiram entre os tratamentos, a área diferiu significativamente entre os tipos de fuste. As árvores bifurcadas apresentaram área de cerca de 40,46 cm<sup>2</sup> a mais de alburno que as árvores não bifurcadas. A área de cerne foi 39,79 cm<sup>2</sup> superior as árvores não bifurcadas. Maiores áreas de alburno representam maiores quantidades de células ativas no tronco e, portanto, maior absorção de água e nutrientes (Bonomelli *et al.*, 2020; Gartner; Meinzer, 2005; Siebrecht *et al.*, 2003)

O alburno, embora não seja uma característica química, está relacionada diretamente a ela. A formação do cerne acontece por processos de morte celular e deposição de extrativos (Celedon; Bohlmann, 2018). Na madeira de *Quercus faginea*, vulgarmente conhecido como carvalho-português, foram encontrados até 2 vezes mais extrativos totais no cerne em comparação ao alburno (Miranda *et al.*, 2017). O cerne também se relaciona com a reciclagem de nutrientes observaram maior quantidade de nutrientes no alburno em relação ao cerne em árvores de *Chamaecyparis thyoides* (cedro branco). Os autores observaram correlação negativa entre a disponibilidade de nutrientes no solo e os nutrientes no cerne, indicando a translocação e armazenamento de nutrientes conforme a necessidades da planta.

A relação de produtividade energética e densidade energética com densidade básica e volume de madeira por árvore estão demonstradas na Figura 8. A densidade energética é diretamente afetada pela densidade básica. A variação de 0,440 g/cm<sup>3</sup> para 0,600 g/cm<sup>3</sup> é equivalente a variação de cerca de 3,04 GJ/m<sup>3</sup>. Para *Eucalyptus* spp. foram encontradas densidades energéticas de 10,39 GJ/m<sup>3</sup> ( $\pm 0,70$  GJ/m<sup>3</sup>) e para *Corymbia* spp., um valor de 11,56 GJ/m<sup>3</sup> ( $\pm 1,27$  GJ/m<sup>3</sup>). Esses valores são superiores aos encontrados para o tachi (9,7 GJ/m<sup>3</sup>). Para alcançar os valores de *Eucalyptus*, *T. vulgaris* deve apresentar densidade básica média de pelo menos 0,550 g/cm<sup>3</sup>. *T. vulgaris* só apresentou valores próximos de *Corymbia* densidades acima de 0,600 g/cm<sup>3</sup>.

Figura 8 - Relação de produtividade energética e densidade energética com densidade básica e volume de madeira por árvore de *T. vulgaris*



Fonte: Do autor (2024)

A densidade energética tem grande importância na quantidade de energia armazenada na floresta, ou seja, na produtividade energética. Esse parâmetro deve ser considerado quando

se deseja utilizar a madeira para geração de calor e energia elétrica em substituição aos combustíveis fósseis. O óleo diesel, combustível fóssil geralmente utilizado em sistemas isolados de energia no Brasil, tem poder calorífico superior de cerca de 45 MJ/kg (Amin *et al.*, 2016). A madeira de *T. vulgaris* obteve valores médios de 18,92 MJ/kg ( $\pm 0,17$  MJ/kg), representando 42% da energia liberada do óleo diesel. Para produzir a mesma energia é preciso 2,4 vezes mais massa de madeira em relação a massa de óleo diesel. Dessa forma, para utilização economicamente e operacionalmente sustentável é essencial que os plantios tenham alta produtividade energética.

### 3.4 Parâmetros de produtividade da madeira de *T. vulgaris*

A Tabela 10 apresenta os valores por hectare de volume, massa seca de madeira, massa de lignina e produtividade energética de *T. vulgaris*. Houve alta variação do volume de madeira dentro dos tratamentos (de 36,01 m<sup>3</sup>/ha a 485 m<sup>3</sup>/ha). Já entre os tratamentos, a variação foi de 173,93 m<sup>3</sup>/ha à 284 m<sup>3</sup>/ha. Essa grande amplitude dos valores de volume implicou em grandes variações na sua produção em massa seca de madeira, massa de lignina e produtividade energética. Não houve efeito da adubação e textura de solo nas variáveis respostas analisadas. Essa variação parece ser causada tanto pela mortalidade das árvores em alguns blocos, quanto pela variação genética das árvores.

Tabela 10 – Parâmetros de produtividade obtidas para a madeira de *Tachigali vulgaris*.

Textura	Adubação	DAPeq (cm)	Volume (m <sup>3</sup> /ha)	MSM (t/ha)	Massa de lignina (t/ha)	Produtividade energética (GJ/ha)
Franco arenosa	0K + 0P	12,29	223,09	119,13	35,58	2261,62
		(2,03)	(68,72)	(39,27)	(11,66)	( $\pm 781,51$ )
Franco arenosa	390P+0K	12,18	229,86	116,31	35,33	2206,70
		(0,98)	(89,44)	(40,57)	(12,40)	( $\pm 753,08$ )
Franco arenosa	780P+343K	13,39	262,70	136,74	41,26	2549,25
		(3,57)	(167,33)	(97,45)	(29,82)	( $\pm 1836,67$ )
<b>Média</b>		<b>12,62</b>	<b>238,55</b>	<b>124,06</b>	<b>37,39</b>	<b>2339,19</b>
		<b>(<math>\pm 2,28</math>)</b>	<b>(106,92)</b>	<b>(59,57)</b>	<b>(18,16)</b>	<b>(1125,11)</b>
Muito argilosa	0K + 0P	12,39	284,65	144,12	43,16	2760,07
		(3,23)	(177,96)	(90,76)	(27,05)	( $\pm 1741,24$ )
Muito argilosa	390P+0K	13,86	243,35	120,41	35,73	2290,31
		(1,61)	(66,81)	(33,60)	(9,98)	( $\pm 693,73$ )
Muito argilosa	780P+343K	12,49	173,93	91,55	27,07	1739,23
		(1,82)	(121,79)	(61,85)	(18,36)	( $\pm 1166,63$ )
<b>Média</b>		<b>12,91</b>	<b>233,98</b>	<b>118,70</b>	<b>35,32</b>	<b>2263,20</b>
		<b>(<math>\pm 2,22</math>)</b>	<b>(127,19)</b>	<b>(64,05)</b>	<b>(19,13)</b>	<b>(1232,56)</b>
<b>Média geral</b>		<b>12,77</b>	<b>236,26</b>	<b>121,38</b>	<b>36,35</b>	<b>2301,20</b>
		<b>(<math>\pm 2,21</math>)</b>	<b>(114,93)</b>	<b>(60,55)</b>	<b>(18,27)</b>	<b>(1154,77)</b>

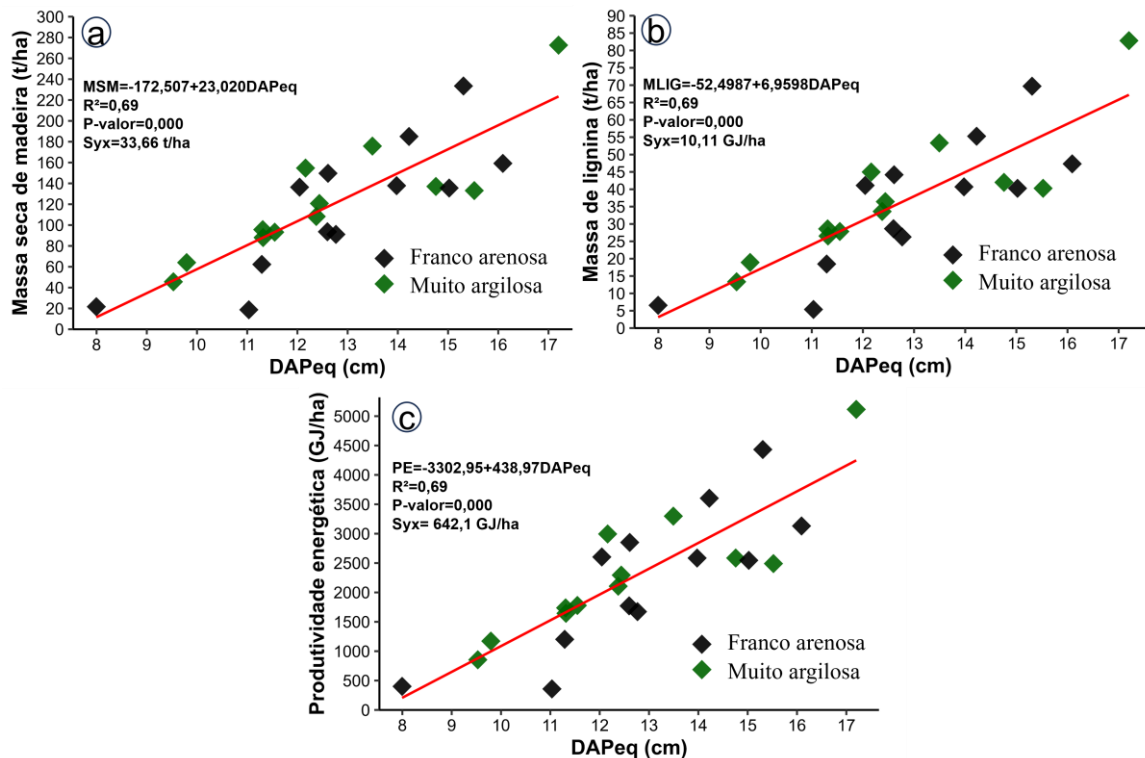
MSM: massa seca de madeira; DAPeq: diâmetro equivalente à altura do peito. Valores entre parênteses representam o desvio padrão. Fonte: Do autor (2024)

Como mencionado anteriormente, a massa seca de madeira, parâmetro importante para produção energética, é produto da densidade básica e volume da madeira. Essa variável responde uma questão importante: para produção de energia, é melhor o aumento do crescimento ou o aumento da densidade básica? A resposta é que a redução de um parâmetro deve estar relacionada ao aumento do outro de forma que a massa seca permaneça a mesma. Para a manutenção da mesma massa seca de madeira em situação de redução de 10 m<sup>3</sup> do volume médio de *T. vulgaris*, deve haver aumento da densidade básica média de 0,514 g/cm<sup>3</sup> para 0,537 g/cm<sup>3</sup> da densidade básica. Já uma redução de 0,01 g/cm<sup>3</sup> da densidade básica deve corresponder ao aumento de cerca de 236,26 m<sup>3</sup>/ha para 241 m<sup>3</sup>/ha.

Os testes de adubação não mostraram efeito no volume e densidade básica. No entanto, a adubação 780P+343K obteve valores mínimos de volume (36,0 m<sup>3</sup>/ha) muito inferiores a adubação 390P+0K (163,6 m<sup>3</sup>/ha). Isso demonstra, no caso de *T. vulgaris*, que as grandes variações de volume têm mais efeito sobre a produtividade energética que a densidade básica. Além disso, sustenta a escolha dos níveis de P do tratamento 390P+0K para a fertilização de plantios de *T. vulgaris*.

A Figura 9 mostra as relações entre o DAPEq e a massa seca de madeira, massa de lignina e produtividade energética. A DAPEq é uma variável de fácil mensuração e, dessa forma, é interessante que seja possível estimar características de produtividade energética com essa variável. As correlações positivas demonstram a importância do crescimento das árvores para o uso energético da madeira.

Figura 9 - Relações entre o DAPEq e a massa seca de madeira, massa de lignina e produtividade energética.



Fonte: Do autor (2024)

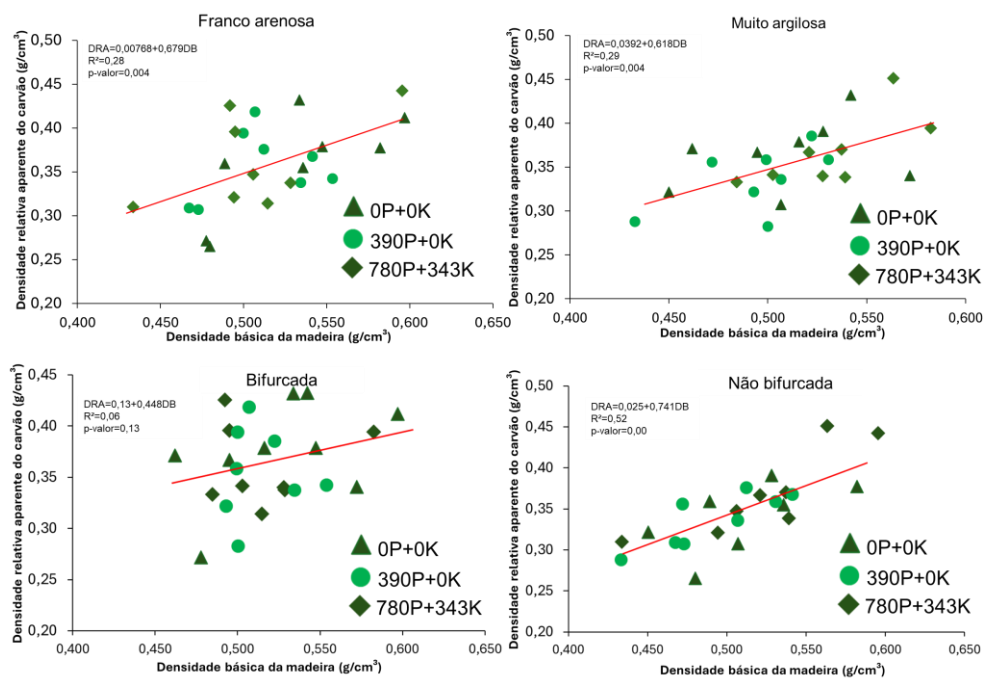
Cada centímetro acima da média de DAPEq (12,77 cm) equivale ao acréscimo de 6,95 t/ha (19,1%) de lignina em relação à sua média geral (36,35 t/ha). A produtividade energética aumenta 438,97 MJ/ha por centímetro de DAPEq. Estudos de plantios de *Eucalyptus* spp. com espaçamento de plantio semelhantes (9 m<sup>2</sup>, 4,5 m<sup>2</sup>) obtêm um valor médio de 2218±418 GJ/ha (valores entre 1680 GJ/ha e 2880 GJ/ha). Para a obtenção desse valor para *Tachigali vulgaris* é preciso que as árvores tenham valor médio de DAPEq acima de 12,58 cm.

Embora a média geral de *T. vulgaris* tenha sido maior que a encontrada para *Eucalyptus* (PROTÁSIO *et al.*, 2020; RESQUIN *et al.*, 2020; TURN *et al.*, 2014), é preciso considerar a alta variação da produção energética da espécie dentro dos tratamentos. Para utilização comercial da espécie é essencial garantir a homogeneidade da produção energética. Em ambos os solos, houve menores variações na produtividade energética na adubação 390P+0K. Dessa forma, pode-se considerar esse nível de adubação de P recomendada para plantios de *Tachigali vulgaris*.

### 3.5 Qualidade do carvão vegetal produzido a partir da madeira de *T. vulgaris*

A Figura 10 apresenta a relação entre a densidade da madeira e carvão vegetal de *Tachigali vulgaris*. A densidade relativa aparente (DRA) do carvão das árvores não bifurcadas apresentou maior correlação com a densidade básica que as árvores bifurcadas, explicando 52% da variação. De maneira geral, espera-se que maiores densidades básicas do lenho impliquem em maiores densidade da madeira (PROTÁSIO *et al.*, 2021a). A densidade aparente média do carvão de *T. vulgaris* foi de  $0,357 \text{ g/cm}^3 (\pm 0,01)$ . Entre os solos, a densidade relativa aparente do carvão vegetal (DRA) foi de  $0,358 \text{ g/cm}^3 (\pm 0,05 \text{ g/cm}^3)$  e  $0,355 \text{ g/cm}^3 (\pm 0,04 \text{ g/cm}^3)$  para a textura franco arenosa e muito argilosa, respectivamente. Assim como na densidade básica da madeira, a densidade do carvão vegetal foi maior nas árvores bifurcadas ( $0,364 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ ) que nas árvores não bifurcadas ( $0,350 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ ). Entre as adubações, a DRA foi maior para o tratamento 780P+343K ( $364 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05$ ), seguido do tratamento 0K+0P ( $0,360 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ ) e 390P+0K ( $0,346 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ ). Apesar dessa diferença entre as médias, não foram encontrados efeitos dos tratamentos na DRA.

Figura 10 – (a) Relação entre a densidade da madeira e carvão vegetal de *Tachigali vulgaris* em diferentes texturas de solo; (b) Relação entre a densidade da madeira e carvão vegetal de *Tachigali vulgaris* em diferentes tipos de fuste.



Fonte: Do autor (2024)

Os valores de DRA do carvão de *T. vulgaris* está dentro da faixa encontrada para *Eucalyptus*, entre 0,28 g/cm<sup>3</sup> e 0,40 g/cm<sup>3</sup> (PEREIRA *et al.*, 2012; PROTÁSIO *et al.*, 2021a). Vale lembrar que os plantios de *Tachigali* analisados aqui tem idade maior que os plantios de *Eucalyptus* que geralmente são avaliados (abaixo de 8 anos). A idade de plantio pode afetar a densidade básica da madeira (GITHIOMI; KARIUKI, 2010) e, portanto, a DRA do carvão vegetal.

Quanto maior a DRA, maior a resistência do carvão as compressões causadas pela camada de ferro em alto-fornos (PEREIRA *et al.*, 2012; PROTÁSIO *et al.*, 2021a). Além disso, é esperado que maiores densidades impliquem maiores teores de carbono armazenado por volume de carvão. O carbono oriundo do carvão vegetal é utilizado como redutor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para FeO (RAO *et al.*, 2013). O modelo geral da relação entre a densidade da madeira e carvão vegetal estima um aumento de 0,013 g/cm<sup>3</sup> da DRA para o acréscimo de cada 0,020 g/cm<sup>3</sup> da densidade básica da madeira.

### **3.6 Rendimentos e parâmetros químicos do carvão vegetal de *T. vulgaris***

A Tabela 11 mostra os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (RGC), líquido pirolenhoso (RGLP), gases não condensáveis (RGNC) e estimativa de consumo específico. A análise de modelo misto demonstrou efeito da interação entre textura de solo, adubação e tipo de fuste (p-valor=0,02) para RGC. As árvores não bifurcadas apresentaram estatisticamente maior RGC no tratamento 0K + 0P e textura de solo muito argilosa. Não houve efeito dos tratamentos para RGLP, RGNC e consumo específico.

Tabela 11 - Rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (RGC), líquido pirolenhoso (RLP), gases não condensáveis (RGNC) e estimativa de consumo específico.

Textura	Adubação	RGC (%)	RLP (%)	RGNC (%)	Consumo específico (m <sup>3</sup> madeira/t carvão)
Franco arenosa	0K + 0P	37,56 (2,54)	45,78 (1,74)	16,66 (2,08)	5,07 (0,46)
Franco arenosa	390P+0K	37,73 (2,64)	45,13 (2,49)	17,14 (3,98)	5,22 (0,40)
Franco arenosa	780P+343K	37,55 (2,69)	45,05 (2,66)	17,40 (4,52)	5,30 (0,52)
<b>Média</b>		<b>37,61</b> <b>(2,51)</b>	<b>45,32</b> <b>(2,25)</b>	<b>17,07</b> <b>(3,53)</b>	<b>5,20</b> <b>(0,45)</b>
Muito argilosa	0K + 0P	39,79 (2,27)	44,59 (2,75)	15,63 (3,15)	4,98 (0,42)
Muito argilosa	390P+0K	37,57 (3,26)	46,11 (2,99)	16,32 (3,11)	5,45 (0,69)
Muito argilosa	780P+343K	36,33 (1,58)	46,03 (2,46)	17,64 (2,13)	5,20 (0,47)
<b>Média</b>		<b>37,90</b> <b>(2,77)</b>	<b>45,58</b> <b>(2,72)</b>	<b>16,53</b> <b>(2,84)</b>	<b>5,21</b> <b>(0,55)</b>
Textura	Fuste	RGC(%)	RGL(%)	RGNC(%)	Consumo específico (m <sup>3</sup> madeira/t carvão)
Franco arenosa	BF	38,44 (2,74)	45,05 (2,21)	16,51 (3,53)	5,01 (0,39)
Muito argilosa	BF	38,28 (3,10)	45,48 (3,14)	16,24 (2,74)	5,12 (0,55)
<b>Média</b>		<b>38,36</b> <b>(2,87)</b>	<b>45,27</b> <b>(2,69)</b>	<b>16,37</b> <b>(3,08)</b>	<b>5,07</b> <b>(0,47)</b>
Franco arenosa	NB	36,78 (2,03)	45,59 (2,36)	17,63 (3,59)	5,39 (0,45)
Muito argilosa	NB	37,44 (2,39)	45,69 (2,25)	16,87 (3,05)	5,31 (0,56)
<b>Média</b>		<b>37,10</b> <b>(2,18)</b>	<b>45,64</b> <b>(2,26)</b>	<b>17,27</b> <b>(3,29)</b>	<b>5,35</b> <b>(0,50)</b>
<b>Média geral</b>		<b>37,75</b> <b>(1,12)</b>	<b>45,45</b> <b>(0,62)</b>	<b>16,80</b> <b>(0,75)</b>	<b>5,20</b> <b>(0,17)</b>

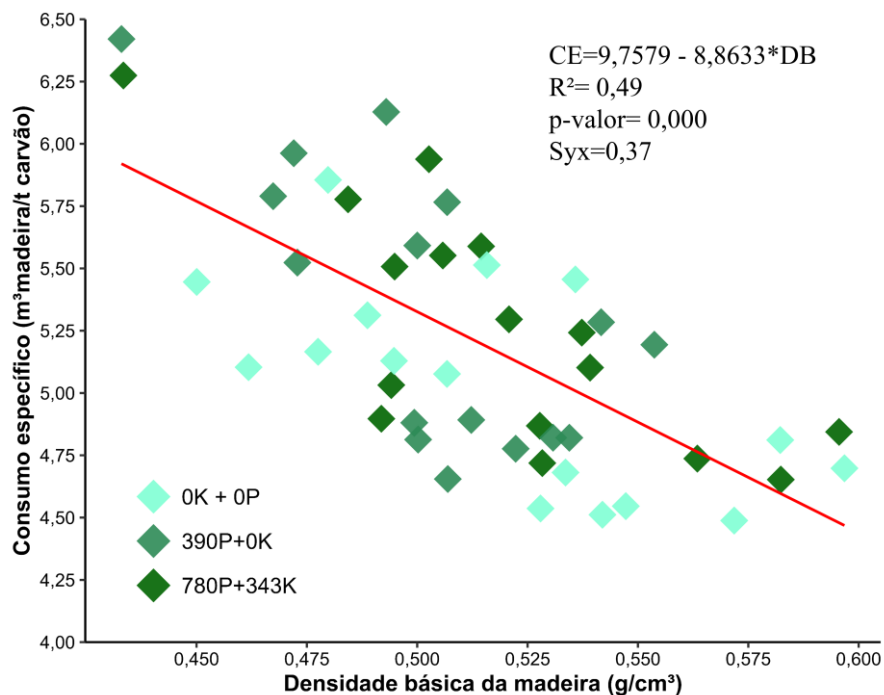
RGC é o rendimento gravimétrico em carvão vegetal; RGLP representa rendimento gravimétrico em líquido pirolenhoso e RGNC é o rendimento em gases não condensáveis. Valores entre parênteses representa o desvio padrão. Fonte: Do autor (2024)

Os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal de *Tachigali vulgaris* (37,75±1,12%) foram maiores que o encontrado para o RGC de *Eucalyptus* variando entre 34,5% e 35,8% (PROTÁSIO *et al.*, 2021a) em condições semelhantes de carbonização (temperatura final de 450 °C e taxa de aquecimento de 1,67 °C/min). Para carbonizações experimentais de resíduos do manejo florestal na Amazônia de diversas espécies são encontrados RGC entre 34,4% e 45,5%. Os valores de líquido pirolenhoso de *Tachigali vulgaris* (45,45±0,62%) foram levemente maiores que o encontrado para espécies de *Eucalyptus*, que apresenta valores

médio em torno de 44,4% ( $\pm 1,7\%$ ). O líquido pirolenhoso é um subproduto da carbonização que, devido a sua ampla composição, pode ser utilizado para obtenção de compostos químicos comerciais em biorrefinarias (MATHEW; ZAKARIA, 2015). A composição química deste subproduto varia entre espécies (MATHEW; ZAKARIA, 2015). Por isso, é interessante que próximos estudos avaliem a composição do líquido pirolenhoso da madeira de *T. vulgaris*.

O consumo específico estima o volume de madeira para produzir 1 tonelada de carvão vegetal. *Tachigali vulgaris* apresentou valores médios para este parâmetro de 5,20 ( $\pm 0,20$ ). Um valor semelhante foi encontrado para clones de *Eucalyptus* (PROTÁSIO *et al.*, 2021a). O ideal é que a madeira apresente valores baixos de consumo específico. A densidade básica da madeira tem alta correlação com consumo específico. Visto que maiores densidades da madeira implicam em maior massa por volume e que densidades maiores da madeira gerarão maior densidade do carvão, haverá uma redução da massa de madeira para gerar uma tonelada de carvão. A Figura 11 mostra a relação entre esses parâmetros. O comportamento encontrado colabora com os resultados encontrados por Protásio *et al.* (2021a) que demonstram que, para a produção de carvão vegetal, a madeira deve apresentar densidade básica maior que 0,500 g/cm<sup>3</sup>.

Figura 11 – Relação entre a densidade básica e consumo específico da madeira de *T. vulgaris*



Fonte: Do autor (2024)

A Tabela 12 mostra a composição química imediata, PCS, RGF e eficiência energética. Houve diferenças significativas entre as adubações para MV. Os maiores teores de materiais voláteis foram identificados para o tratamento sem adubação (0P+0K). Os valores para esse tratamento foram 30,38% ( $\pm 3,62\%$ ) e 32,57% ( $\pm 2,89\%$ ) nos solos arenosos e argilosos, respectivamente. Para carbono fixo, os menores valores foram obtidos para o mesmo tratamento (0P+0K). Isso era esperado, pois o carbono fixo é obtido pela diferença entre MV+Cz e massa seca da madeira total.

Tabela 12 - Composição química imediata, PCS, RGF e eficiência energética do carvão vegetal de *T. vulgaris*.

T	Adub	MV (% bs)	Cz (% bs)	CF (% bs)	PCS (MJ/kg)	RCF (% bs)	Eficiência energética (% bs)
Franco arenosa	0K + 0P	30,38 (3,62)	1,08 (0,61)	68,54 (3,70)	29,32 (1,27)	25,67 (0,61)	58,25 (3,25)
Franco arenosa	390P+0K	30,40 (4,13)	0,80 (0,20)	68,80 (4,04)	30,85 (1,08)	25,88 (0,98)	61,23 (3,58)
Franco arenosa	780P+343K	28,70 (4,29)	1,24 (0,38)	70,05 (4,15)	29,82 (1,00)	26,21 (0,59)	60,16 (3,56)
<b>Média</b>		<b>29,83 (3,93)</b>	<b>1,04 (0,45)</b>	<b>69,13 (3,85)</b>	<b>30,00 (1,26)</b>	<b>25,92 (0,75)</b>	<b>59,88 (3,54)</b>
Muito Argiloso	0K + 0P	32,57 (2,89)	1,44 (0,58)	65,99 (2,75)	28,80 (1,08)	26,20 (0,66)	60,17 (2,68)
Muito Argiloso	390P+0K	30,16 (3,32)	1,41 (0,59)	68,43 (3,56)	29,69 (0,79)	25,62 (1,17)	58,79 (5,35)
Muito Argiloso	780P+343K	28,06 (2,18)	1,88 (0,55)	70,06 (1,81)	30,17 (0,64)	25,44 (0,86)	57,48 (2,20)
<b>Média</b>		<b>30,26 (3,30)</b>	<b>1,58 (0,59)</b>	<b>68,16 (3,18)</b>	<b>29,55 (1,00)</b>	<b>25,75 (0,94)</b>	<b>58,82 (3,69)</b>
T	Fuste	MV (%)	Cz (%)	CF (%)	PCS (MJ/kg)	RCF (%)	Eficiência energética (%)
Franco arenosa	BF	30,46 (4,02)	1,06 (0,46)	68,48 (3,88)	29,80 (1,23)	26,23 (0,71)	61,06 (2,99)
Muito Argiloso	BF	30,41 (3,23)	1,69 (0,67)	67,90 (3,13)	29,40 (1,10)	25,91 (1,06)	59,23 (3,76)
<b>Média</b>		<b>30,44 (3,55)</b>	<b>1,38 (0,65)</b>	<b>68,18 (3,45)</b>	<b>29,59 (1,16)</b>	<b>26,06 (0,91)</b>	<b>60,11 (3,47)</b>
Franco arenosa	NB	29,19 (3,91)	1,02 (0,47)	69,79 (3,88)	30,20 (1,30)	25,60 (0,68)	58,70 (3,77)
Muito Argiloso	NB	30,08 (3,52)	1,45 (0,48)	68,47 (3,35)	29,73 (0,90)	25,57 (0,78)	58,33 (3,73)
<b>Média</b>		<b>29,62 (3,67)</b>	<b>1,23 (0,51)</b>	<b>69,16 (3,61)</b>	<b>29,97 (1,13)</b>	<b>25,59 (0,71)</b>	<b>58,52 (3,67)</b>
<b>Média geral</b>		<b>30,05 (1,57)</b>	<b>1,31 (0,37)</b>	<b>68,65 (1,49)</b>	<b>29,78 (0,71)</b>	<b>25,84 (0,32)</b>	<b>59,35 (3,63)</b>

MV: materiais voláteis; Cz: teor de cinzas; CF: carbono fixo; PCS: poder calorífico superior; RCF: rendimento em carbono fixo. Valores entre parênteses representam o desvio padrão.  
Fonte: Do autor (2024)

O percentual mais alto de carbono fixo sob a presença adubação pode estar relacionada as implicações do fósforo e cálcio, presente no adubo superfosfato triplo, na atividade cambial (LAUTNER *et al.*, 2007). Em *álamo*, a privação de cálcio reduziu a comprimento das fibras e causou modificações na parede celular (LAUTNER *et al.*, 2007). A parede celular tem grande influência na alocação de carbono (VERBANČIČ *et al.*, 2018).

O rendimento em carbono fixo (RCF) não apresentou diferenças entre as texturas de solos, mas apresentou diferenças entre as bifurcações. O carvão vegetal oriundo das árvores bifurcadas apresentou cerca de 0,46% de RCF superior às árvores não bifurcadas. Esse resultado pode estar relacionado ao maior teor de lignina nesse tipo de fuste (ver tópico “propriedades químicas e energéticas da madeira da espécie *T. vulgaris*”).

O carvão vegetal das árvores cultivadas no solo argiloso apresentou maior teor de cinzas (1,04±0,45%). Normas do estado de São Paulo, que estabelecem percentuais adequados da química imediata do carvão vegetal para uso doméstico exigem valores de carbono fixo acima de 75% e cinzas abaixo de 1,5%. Os valores de carbono fixo não cumpriram as exigências. O solo franco arenoso apresentou maiores valores de poder calorífico (30 ± 1,26 MJ/kg). Para espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* são reportados valores entre 30,97 MJ/kg e 31,40 MJ/kg.

Houve efeito da interação solo x adubação x fuste na eficiência energética. As árvores bifurcadas no tratamento 390P+0K e solo arenoso apresentaram significativamente maior eficiência energética (61,21±4,30%). A eficiência energética é uma estimativa da energia mantida no carvão após a carbonização. A média geral dos valores para *T. vulgaris* para este parâmetro foi de 59,35% (±3,63%). Em estudos com carvão oriundo da madeira de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia* spp. aos 6 anos de plantio, nas mesmas condições de carbonização laboratorial, a eficiência energética variou entre 51,68% e 57,57%.

### **3.7 Parâmetros de produtividade do carvão vegetal de *Tachigali vulgaris***

A Tabela 13 mostra os parâmetros de produtividade do carvão vegetal de *T. vulgaris*. Os dados mostram que aos 11 anos, o plantio da espécie produz em média 46,27 t/ha (23,72 t/ha) de carvão vegetal. O incremento médio anual em carvão foi de 4,21 (2,16) toneladas por hectare ao ano.

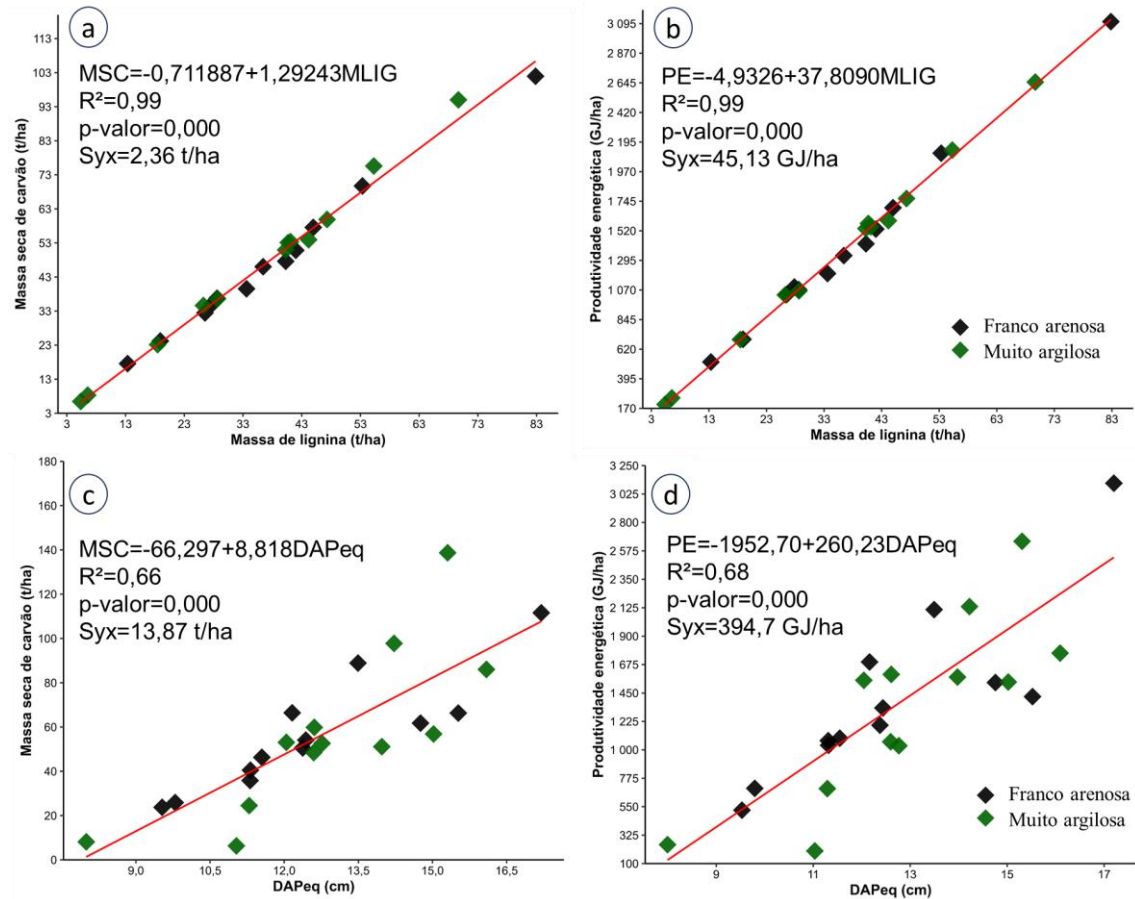
Tabela 13 – Parâmetros de produtividade encontrados para o carvão de *T. vulgaris*.

Textura	Adub	MSC (t/ha)	IMACV t/(ha,ano)	Produtividade energética (GJ/ha)	Densidade energética (GJ/m <sup>3</sup> )	Produção de carbono fixo (t/ciclo)
Franco arenosa	0K + 0P	44,66 (14,43)	4,06 (1,31)	1313,96 (438,42)	10,46 (0,97)	38,62 (1,11)
Franco arenosa	390P+0 K	44,25 (17,24)	4,02 (1,57)	1358,65 (505,31)	11,00 (0,88)	37,52 (1,17)
Franco arenosa	780P+34 3K	50,98 (36,18)	4,63 (3,29)	1531,85 (1115,56)	10,79 (1,15)	37,75 (3,02)
<b>Média</b>		<b>46,63</b> <b>(22,47)</b>	<b>4,24</b> <b>(2,04)</b>	<b>1401,49</b> <b>(686,36)</b>	<b>10,75</b> <b>(0,94)</b>	<b>37,96</b> <b>(1,86)</b>
Muito argilosa	0K + 0P	58,08 (37,27)	5,28 (3,39)	1646,37 (1033,84)	10,48 (0,80)	37,80 (1,26)
Muito argilosa	390P+0 K	46,05 (12,41)	4,19 (1,13)	1359,59 (367,86)	10,04 (0,41)	36,20 (0,42)
Muito argilosa	780P+34 3K	33,63 (22,81)	3,06 (2,07)	1006,97 (677,98)	11,07 (1,15)	38,36 (3,07)
<b>Média</b>		<b>45,92</b> <b>(25,91)</b>	<b>4,17</b> <b>(2,36)</b>	<b>1337,65</b> <b>(726,88)</b>	<b>10,53</b> <b>(0,88)</b>	<b>37,45</b> <b>(1,99)</b>
<b>Média geral</b>		<b>46,27</b> <b>(23,72)</b>	<b>4,21</b> <b>(2,16)</b>	<b>1369,57</b> <b>(692,14)</b>	<b>10,64</b> <b>(0,90)</b>	<b>37,71</b> <b>(1,90)</b>

MSC: massa de carvão; IMACV: incremento médio anual em carvão vegetal. Valores entre parênteses representam o desvio padrão. Fonte: Do autor (2024)

Entre as médias, não houve diferenças entre as texturas de solo. No entanto, houve alta variação dos valores de MSC e produtividade energética, principalmente no solo de textura muito argilosa. Os parâmetros de produtividade do carvão analisados se relacionam com as propriedades da madeira e seu crescimento. A Figura 12 mostra essas relações.

Figura 12 – (a) Relação entre a massa de lignina e massa de carvão produzida; (b) Relação entre a massa de lignina e produtividade energética; (c) Relação entre DAPeq e massa de carvão produzida; (d) Relação entre DAPeq e produtividade energética.

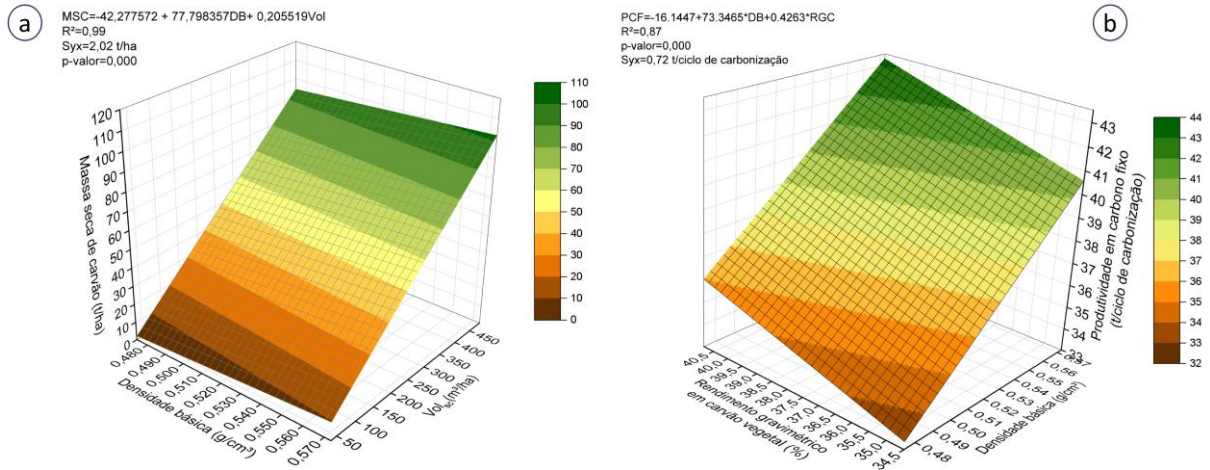


Fonte: Do autor (2024)

Essas relações são importantes para o controle da produtividade do plantio e previsões de produção energética do carvão. É possível analisar, por exemplo, que a massa de carvão produzida em um plantio da espécie que tenha DAPeq médio igual a 12 cm e DAPeq médio igual a 15 cm variam entre 40 t/ha à cerca de 66 t/ha, respectivamente. Essa variação representa um aumento de 40% na produção de carvão.

A Figura 13a mostram a relação da produção em massa seca de carvão com as características de crescimento e qualidade da madeira. A Figura 13b mostra a relação entre produtividade em carbono fixo por ciclo de carbonização e a densidade básica e RGC.

Figura 13 – (a) Efeito das variações de volume de madeira e densidade básica na produção de massa seca de carvão; (b) Efeito do rendimento gravimétrico e densidade básica da madeira na produção em carbono fixo.

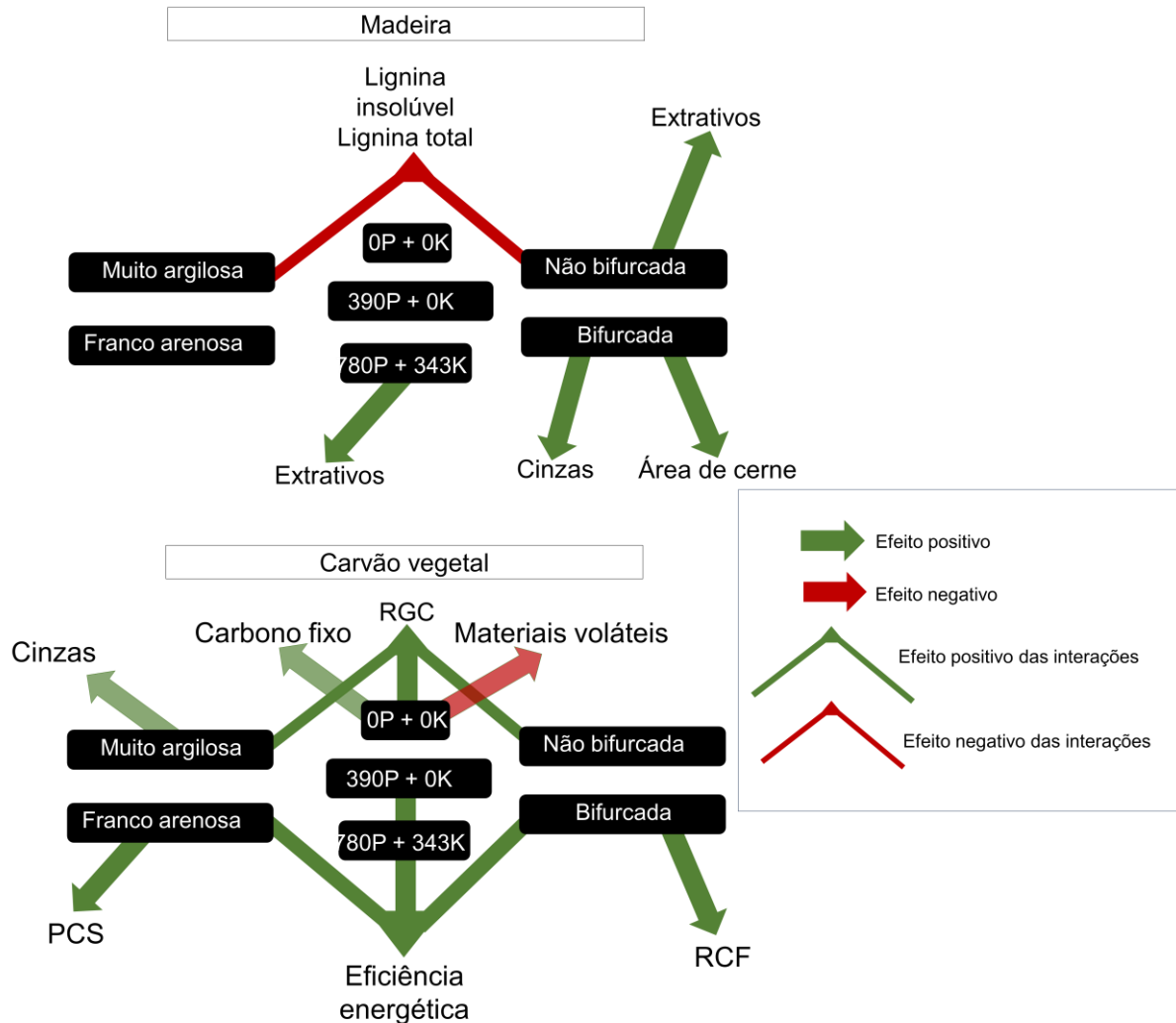


Fonte: Do autor (2024)

A análise das superfícies mostra a grande importância tanto do crescimento como da densidade da madeira para produção de carvão vegetal. Pode ser observado que as variações do volume influenciam mais na massa seca de carvão que as variações da densidade básica. Já a produção de carvão vegetal é mais influenciada pela densidade básica.

A Figura 14 apresenta um resumo do efeito dos tratamentos nas características da madeira e carvão vegetal de *T. vulgaris*.

Figura 15 – Efeito da textura de solo, adubações e tipo de fuste nas características da madeira e carvão vegetal



Fonte: Do autor

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados mostram que o fuste, solo e adubações influenciam na qualidade da madeira e carvão vegetal de *T. vulgaris* em diferentes proporções. No entanto, os tratamentos não influenciaram no crescimento individual das árvores amostradas e o crescimento por hectare. A textura do solo, adubações e fuste não afetaram a densidade da madeira da espécie. Não houve efeito estatístico do tipo de fuste na densidade básica da madeira. No entanto, o diâmetro das árvores influenciou nesta característica da madeira. As árvores bifurcadas (0,39%) apresentaram maior teor de cinzas, porém, de forma geral, a espécie apresenta baixo percentual deste parâmetro (<1%).

Interações entre o tipo de fuste, adubações e solos tiveram efeito nas características químicas da madeira. As árvores bifurcadas apresentaram maior teor de lignina no solo de textura muito argilosa.

Para o carvão vegetal, as árvores não bifurcadas, no tratamento 0K + 0P e textura de solo muito argilosa apresentaram estatisticamente maior RGC. O carbono fixo apresentou maiores valores para os tratamentos 390P+0K e 780P+343K que o tratamento 0K + 0P. A espécie apresentou teores inferiores que o indicado para o carbono fixo.

As características de crescimento têm grande influência na produtividade energética tanto da madeira como do carvão. É possível avaliar o comportamento da produção energética por meio do DAPEq médio do plantio.

De maneira geral, é possível poucos efeitos positivos dos maiores níveis de adubação nas características da madeira e carvão, exceto pelo aumento dos extrativos. Em contrapartida, o tratamento sem adubação e adubação 390 + 0K proporcionou, respectivamente, aumento do carbono fixo aumento da eficiência energética da conversão da madeira em carvão. Além disso, no tratamento 390 + 0K houve menores variações da produtividade energética e do carvão para a espécie. Dessa forma, recomenda-se a utilização do tratamento de adubação mediano de P (390P) para plantar *T. vulgaris*.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**.

Determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira - determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989**: Pasta celulósica e madeira - Determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2010.

AHMAD, T.; ZHANG, D. A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far. **Energy Reports**, v. 6, p. 1973–1991, nov. 2020.

ALBAUGH, T. J. *et al.* Long term growth responses of loblolly pine to optimal nutrient and water resource availability. **Forest Ecology and Management**, v. 192, n. 1, p. 3–19, abr. 2004.

American Society for Testing and Materials (2013) **ASTM.E711-87**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter. ASTM International, Philadelphia. n. ASTM.E711-87.

American Society for Testing Materials ASTM (2007) **D1762-84**: standard test method for chemical analysis of wood charcoal. ASTM International, Philadelphia.

AMIN, A. *et al.* Experimental and empirical study of diesel and castor biodiesel blending effect, on kinematic viscosity, density and calorific value. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 25, n. 4, p. 509–514, dez. 2016.

AOYAGI, R.; KITAYAMA, K.; TURNER, B. L. How do tropical tree species maintain high growth rates on low-phosphorus soils? **Plant and Soil**, v. 480, n. 1–2, p. 31–56, nov. 2022.

ARAÚJO, R. O. *et al.* Renewable Energy from Biomass: an Overview of the Amazon Region. **BioEnergy Research**, v. 15, n. 2, p. 834–849, jun. 2022.

ARNI, S. AL. Extraction and isolation methods for lignin separation from sugarcane bagasse: A review. **Industrial Crops and Products**, v. 115, p. 330–339, maio 2018.

BARKER-ROTHSCHILD, D. *et al.* Assessing the Impact of Drought-Induced Abiotic Stress on the Content and Composition of Douglas-Fir Lignin. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 11, n. 37, p. 13519–13526, set. 2023.

BERNARDI, A. C. DE C. *et al.* Analytical quality program of soil fertility laboratories that adopt embrapa methods in Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 33, n. 15–18, p. 2661–2672, nov. 2002.

BONOMELLI, C. *et al.* Absorption and distribution of root, fruit, and foliar-applied Ca in ‘Clemenules’ mandarin trees. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 100, n. 12, p. 4643–4650, set. 2020.

BOSCH, R.; VAN DE POL, M.; PHILP, J. Policy: Define biomass sustainability. **Nature**, v. 523, n. 7562, p. 526–527, jul. 2015.

CARVALHO, A. O. *et al.* Short-term effects of phosphorus fertilization on Amazonian tree species in a mixed plantation. **New Forests**, v. 53, n. 5, p. 851–869, set. 2022.

CELEDON, J. M.; BOHLMANN, J. An extended model of heartwood secondary metabolism informed by functional genomics. **Tree Physiology**, v. 38, n. 3, p. 311–319, mar. 2018.

CHAMBI-LEGOAS, R. *et al.* Inter-annual effects of potassium/sodium fertilization and water deficit on wood quality of Eucalyptus grandis trees over a full rotation. **Forest Ecology and Management**, v. 496, p. 119415, set. 2021.

CSANÁDY, E.; MAGOSS, E.; TOLVAJ, L. **Quality of Machined Wood Surfaces**. 1. ed. Cham: Springer International Publishing, 2015.

DEMIRBAŞ, A. Relationships between lignin contents and fixed carbon contents of biomass samples. **Energy Conversion and Management**, v. 44, n. 9, p. 1481–1486, jun. 2003.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; BENDER, F. D. Impacts and uncertainties of climate change projections on Eucalyptus plantations productivity across Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118365, out. 2020.

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

GITHIOMI, J. K.; KARIUKI, J. G. Wood basic density of *Eucalyptus grandis* from plantations in central rift valley, kenya: variation with age, height level and between sapwood and heartwood. **Source: Journal of Tropical Forest Science**, v. 22, n. 3, p. 281–286, jul. 2010.

GOMINHO, J. *et al.* An extensive study on the chemical diversity of lipophilic extractives from *Eucalyptus globulus* wood. **Phytochemistry**, v. 180, p. 112520, dez. 2020.

GONÇALVES, J. L. M. *et al.* Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 45–61, maio. 2004.

HEIN, P. R. G. *et al.* Spatial variation of wood density, stiffness and microfibril angle along *Eucalyptus* trunks grown under contrasting growth conditions. **Trees**, v. 30, n. 3, p. 871–882, jun. 2016.

IBÁ - BRAZILIAN TREE INDUSTRY. **IBÁ annual report 2022**. São Paulo. Disponível em: <<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2019-final.pdf>>. Acesso em: jul. 2023.

KÄRENLAMPI, P. P.; RIEKKINEN, M. Maturity and growth rate effects on Scots pine basic density. **Wood Science and Technology**, v. 38, n. 6, p. 465–473, set. 2004.

KUMAR, S.; KUMAR, M.; HANDA, A. Combating hot corrosion of boiler tubes – A study. **Engineering Failure Analysis**, v. 94, p. 379–395, dez. 2018.

LAUTNER, S. *et al.* Calcium nutrition has a significant influence on wood formation in poplar. **New Phytologist**, v. 173, n. 4, p. 743–752, mar. 2007.

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, n. 3, p. 491–513, maio 2023.

MACHADO, J. S. *et al.* Variation of wood density and mechanical properties of blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.). **Materials & Design (1980-2015)**, v. 56, p. 975–980, abr. 2014.

MANDRE, M.; PÄRN, H.; OTS, K. Short-term effects of wood ash on the soil and the lignin concentration and growth of *Pinus sylvestris* L. **Forest Ecology and Management**, v. 223, n. 1–3, p. 349–357, mar. 2006.

MATHEW, S.; ZAKARIA, Z. A. Pyrolygneous acid—the smoky acidic liquid from plant biomass. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 99, n. 2, p. 611–622, jan. 2015.

MIRANDA, I. *et al.* Chemical characterization and extractives composition of heartwood and sapwood from *Quercus faginea*. **PLoS ONE**, v. 12, n. 6, jun. 2017.

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, n. 5, p. 1567–1581, out. 2023.

NOVAES, E. *et al.* Quantitative genetic analysis of biomass and wood chemistry of *Populus* under different nitrogen levels. **New Phytologist**, v. 182, n. 4, p. 878–890, jun. 2009.

PENA-VERGARA, G. *et al.* Energy from planted forest and its residues characterization in Brazil. **Energy**, v. 239, p. 122243, jan. 2022.

PEREIRA, B. L. C. *et al.* Quality of Wood and Charcoal from *Eucalyptus* Clones for Ironmaster Use. **International Journal of Forestry Research**, v. 2012, p. 1–8, out. 2012.

PROTÁSIO, T. DE P. *et al.* Insights in quantitative indexes for better grouping and classification of *Eucalyptus* clones used in combustion and energy cogeneration processes in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 143, p. 105835, dez. 2020.

PROTÁSIO, T. DE 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, 1 fev. 2021a.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Influence of Extractives Content and Lignin Quality of *Eucalyptus* Wood in the Mass Balance of Pyrolysis Process. **BioEnergy Research**, v. 14, n. 1, p. 175–189, mar. 2021b.

**R Core Team. R: A language and environment for statistical computing.** ViennaR Foundation for Statistical Computing, 2023.

RAO, M. *et al.* Carbothermic Reduction of Nickeliferous Laterite Ores for Nickel Pig Iron Production in China: A Review. **JOM**, v. 65, n. 11, p. 1573–1583, nov. 2013.

RESQUIN, F. *et al.* Influence of age and planting density on the energy content of *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii* and *Eucalyptus grandis* planted in Uruguay. **New Forests**, v. 51, n. 4, p. 631–655, jul. 2020.

ROCHA, G. J. DE M. *et al.* Influence of mixed sugarcane bagasse samples evaluated by elemental and physical–chemical composition. **Industrial Crops and Products**, v. 64, p. 52–58, fev. 2015.

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, n. 1, p. 114–128, set. 2023.

SCHINDELIN, Johannes *et al.* The ImageJ ecosystem: An open platform for biomedical image analysis. **Molecular reproduction and development**, v. 82, n. 7-8, p. 518-529, jul. 2015.

SIEBRECHT, S. *et al.* Nutrient translocation in the xylem of poplar ? diurnal variations and spatial distribution along the shoot axis. **Planta**, v. 217, n. 5, p. 783–793, set. 2003.

SILVA, M. O. S. *et al.* Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachi-branco trees planted at different spacings for bioenergy purposes. **Journal of Forestry Research**, v. 32, n. 1, p. 211–224, fev. 2021.

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, maio 2022.

SLATER, D. *et al.* The anatomy and grain pattern in forks of hazel (*Corylus avellana L.*) and other tree species. **Trees - Structure and Function**, v. 28, n. 5, p. 1437–1448, out. 2014.

SPARLING, G. P. *et al.* What is Soil Organic Matter Worth? **Journal of Environmental Quality**, v. 35, n. 2, p. 548–557, mar. 2006.

TEIXEIRA, R. A. C. *et al.* Dynamics of experimental plantations of *Tachigali vulgaris* in response to fertilization and soil texture. **New Forests**, set. 2023.

TURN, S. *et al.* Energy analysis of *Eucalyptus grandis* production in Hawaii. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 6, n. 4, jul. 2014.

UZOEJINWA, B. B. *et al.* Co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a thermochemical conversion technology for high-grade biofuel production: Recent progress and future directions elsewhere worldwide. **Energy Conversion and Management**, v. 163, p. 468–492, maio 2018.

VAN DER WERFF, H. A Synopsis of the Genus *Tachigali* (Leguminosae: Caesalpinioideae) in Northern South America. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, v. 95, n. 4, p. 618–661, dez. 2008.

VASSILEV, S. V. *et al.* Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion. **Fuel**, v. 208, p. 377–409, nov. 2017.

VERBANČIČ, J. *et al.* Carbon Supply and the Regulation of Cell Wall Synthesis. **Molecular Plant**, v. 11, n. 1, p. 75–94, jan. 2018.

WEI, H. *et al.* Research on Model Predictive Control of a 130 t/h Biomass Circulating Fluidized Bed Boiler Combustion System Based on Subspace Identification. **Energies**, v. 16, n. 8, abr. 2023.

ZANUNCIO, A. J. V. *et al.* Damage by defoliating insects and its effect on the quality of wood for charcoal production. **Cellulose Chemistry and Technology**, v. 55, n. 7–8, p. 933–938, set. 2021.

## ARTIGO 2: IMPACTO DA COMPOSIÇÃO INORGÂNICA DA MADEIRA DE *T. vulgaris* PARA GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA

### RESUMO

As maiores justificativas para a utilização energética da biomassa estão relacionadas ao seu aspecto de renovabilidade e sustentabilidade. Nesse sentido, os plantios florestais têm o potencial não só de reduzir as emissões de carbono pelo sequestro deste na biomassa arbórea, mas de garantir a viabilidade econômica da utilização deste combustível para geração de calor. É importante que haja a diversificação de espécies utilizadas em plantios florestais no Brasil, visando atender à demanda de regiões com características edafoclimáticas específicas. *Tachigali vulgaris* é uma espécie amazônica cuja madeira vem sendo amplamente estudada para utilização energética. No entanto, aspectos relacionados à adubação e seu efeito na exportação de nutrientes e composição das cinzas são desconhecidos. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do tipo de fuste, textura de solo e adubação na exportação de nutrientes e implicações na composição das cinzas da espécie. O estudo foi realizado em duas plantações experimentais de *T. vulgaris* localizadas no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, mesorregião do baixo Amazonas, estado do Pará, Brasil. As plantações têm diferentes texturas de solos: Latossolo amarelo textura média franco arenosa e Latossolo amarelo textura argilosa. O experimento foi instalado em 2010 e tem espaçamento de 3x2 m entre árvores. Foram considerados quatro blocos por área e três testes de adubação: a testemunha, em que não houve adubação com fósforo e potássio; o tratamento 2, em que se adubou apenas com fósforo; e o tratamento 3, em que se adubou com fósforo e potássio. Em cada teste foram amostradas uma árvore com fuste único e uma árvore bifurcada. Dessas árvores, foram retirados discos ao longo do fuste, visando uma amostragem representativa da madeira da espécie. A partir de análises de ICP-OES foram obtidas as concentrações dos inorgânicos Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S, Cu, Zn, Si e Ti na madeira da espécie. A partir dos valores de massa seca de madeira por hectare foi possível obter a exportação de nutrientes do plantio. Os inorgânicos foram utilizados para estimar a composição das cinzas e suas implicações na geração de energia térmica a partir da espécie. De maneira geral, os elementos com maiores teores foram Fe, Al e Ca. Os outros elementos seguiram a ordem decrescente: Na > S > Mg > Si > Cu > Zn > P > Mn > Ti e B. Houve altos teores de Fe (0,06%) e Al (0,05%), provavelmente relacionados às altas quantidades desses elementos nos solos da região amazônica. No entanto, a quantidade desses elementos no lenho não parece afetar a absorção dos nutrientes. Não foram detectados percentuais de K nas amostras, sugerindo a substituição deste elemento por Na em algumas funções metabólicas de *T. vulgaris*. A exportação de P foi baixa (2,69 kg/ha) em todos os tratamentos, indicando alta reciclagem deste nutriente e menores gastos com fertilizantes. As adubações, tipo de solo e fuste não afetam de maneira significativa a qualidade da madeira de *T. vulgaris* para utilização energética em caldeiras e, dessa forma, recomenda-se o tratamento intermediário de superfosfato triplo para fertilização das florestas de *Tachigali* devido à baixa variação das propriedades da madeira neste tratamento. A ausência de K<sub>2</sub>O e os altos teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (9,32%) e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (39,73%) indicam um alto ponto de fusão das cinzas, reduzindo a tendência a potenciais problemas causados nas caldeiras.

Palavras-chave: desenvolvimento sustentável; metais alcalinos; exportação de nutrientes.

## 1 INTRODUÇÃO

As maiores justificativas para a utilização energética da biomassa estão relacionadas ao seu aspecto de renovabilidade e sustentabilidade. A sustentabilidade refere-se não só as reduções do impacto nas mudanças climáticas como, também, à viabilidade econômica e utilização eficiente dos recursos naturais. Nesse sentido, os plantios florestais têm o potencial de não só de reduzir as emissões de carbono pelo sequestro deste na biomassa arbórea, como de garantir a viabilidade econômica da utilização deste combustível para geração de calor (Crow *et al.*, 2016). No entanto, o tema “utilização eficiente dos recursos naturais” não deve ser ignorado, pois está entrelaçado aos outros aspectos de sustentabilidade. Os plantios florestais podem depender de grandes quantidades de nutrientes para sua manutenção, afetando a produtividade do plantio a longo prazo, as necessidades de gastos com fertilizantes e eutrofização de corpos de água devido ao aumento do uso de fertilizantes nitrogenados (Bijay-Singh; Craswell, 2021; Lima Neto *et al.*, 2021; silva *et al.*, 2016).

No Brasil, as florestas plantadas representam 99% da fonte de madeira para carvão vegetal. Além disso, a lenha e seus subprodutos são utilizados na geração de calor e energia elétrica. Essas florestas são principalmente do gênero *Eucalyptus*, representando 76% da área plantada no país (IBÁ, 2023). As espécies desse gênero têm alta produtividade e baixas exigência nutricionais (Lima Neto *et al.*, 2021). Entretanto, as mudanças climáticas exigem aumento da variedade de espécies arbóreas utilizadas nos plantios, pois esse fator tem influência na produtividade e qualidade da madeira.

Os plantios de *Eucalyptus* se localizam principalmente na região sudeste do país (Pirovani *et al.*, 2018). A região norte do país tem necessidade de biomassa para geração de calor em empreendimentos industriais como celulose, MDF, laticínios, cerâmica e indústria cimenteira. Além disso, sistemas isolados de fornecimento de energia elétrica na região utilizam óleo diesel que poderia ser substituído por madeira oriundo de florestas plantadas.

*Tachigali vulgaris* L.F. Gomes da Silva & H.C. Lima, conhecida vulgarmente como tachi-branco ou carvoeiro, é uma espécie presente na Amazônia e cerrado do Brasil (Van Der Werff, 2008). Estudos tem demonstrados que a espécie é adaptada aos solos ácidos da região Amazônica (Farias *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2023). Estudos sobre o crescimento e qualidade da madeira para uso energético foram estudados recentemente. A espécie pode apresentar até 100 m<sup>3</sup>/ha aos 6 anos em espaçamento 3x2 m (Teixeira *et al.*, 2024). Isso representa um

incremento médio anual de 16,6 m<sup>3</sup>/(ha.ano). Já foram reportados até 175 m<sup>3</sup>/ha aos 7 anos, no mesmo espaçamento de plantio (IMA=25 m<sup>3</sup>/ha.ano) (Silva *et al.*, 2021a). A densidade da madeira reportada varia entre 0,419 g/cm<sup>3</sup> e 0,606 g/cm<sup>3</sup> e o poder calorífico superior tem valores em torno de 19,0 MJ/kg (Silva *et al.*, 2021a).

Recentemente foram avaliadas a composição inorgânica da madeira de *T. vulgaris* sob diferentes espaçamentos de plantio (Santos *et al.*, 2023). Neste estudo, foi verificado baixa exportação de nutrientes. As proporções de K<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>O nas cinzas da espécie foram baixas e não representam problemas na combustão da madeira.

As cinzas têm grande importância na combustão de biomassas. Elas podem causar problemas nos equipamentos de queima como sinterização, incrustações e escórias, afetando a transferência de calor e até corroendo os equipamentos de queima. O termo sinterização refere-se à ligação de partículas adjacentes sob a influência de excesso de tensão superficial (Luan; You; Zhang, 2014). É um fenômeno inicial importante para a deposição das cinzas. Incrustações são deposições que ocorrem especificamente nas áreas de transferência de calor. As escórias são depósitos de material fundido em diversas seções das caldeiras (Febrero *et al.*, 2015; Magdziarz; Dalai; Koziński, 2016).

Embora a composição inorgânica da madeira de *T. vulgaris* tenha sido avaliada, o efeito da adubação nesse parâmetro não é conhecido para a espécie. O objetivo neste capítulo é avaliar o efeito de testes de adubação na exportação de nutrientes e implicações na composição das cinzas da espécie.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Áreas de estudo do experimento de adubação de *T. vulgaris*

O estudo foi realizado em dois plantios homogêneos de *Tachigali vulgaris*, com idade de 11 anos, localizados no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, mesorregião do baixo Amazonas, estado do Pará, Brasil. Os experimentos foram implantados na empresa Jari Celulose S.A. em áreas de 1,6 ha, geolocalizados pelas coordenadas 0°47'17,6"S 52°37'08,80"W e 0°53'29,41"S 52°29'15,91"W (Figura 1). O clima, segundo classificação de Köppen é *am* com características intermediárias entre *Af* e *Aw*. A temperatura média anual é de aproximadamente 26 °C e precipitação entre 1,970 mm a 2,300 mm. As áreas têm aproximadamente 1,6 hectares, com texturas de solos diferentes, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Localização do plantio experimental de *Tachigali vulgaris*, em solos arenosos e argilosos, em Monte Dourado, distrito de Almeirim – PA



Fonte: Do autor (2024)

Em cada solo foram implantados 12 tratamentos de adubação (Tabela 1). A Tabela apresenta os valores convertidos do adubo para  $P_2O_5$  e  $K_2O$ . O superfosfato triplo apresenta 41% de  $P_2O_5$  e 11% de cálcio. O cloreto de potássio apresenta cerca de 58% de  $K_2O$  e cerca de 42% de cloro. Para a amostragem das árvores neste experimento foram selecionados os tratamentos extremos de P e mediano. Os tratamentos escolhidos estão destacados em cinza na tabela. A caracterização química do solo antes do plantio está demonstrada na Tabela 2. Antes da instalação dos experimentos, as áreas eram ocupadas por plantios de *Eucalyptus*.

Tabela 1 - Adubação e dosagem (g/planta) nos diferentes tratamentos de *T. vulgaris*.

Códigos	Enxofre/nitrogênio		Fósforo/cálcio		Potássio/cloro			
	Sulfato de amônio	N	Superfosfato triplo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cloreto de potássio		K <sub>2</sub> O	
	(kg.ha <sup>-1</sup> )	(kg ha <sup>-1</sup> )	(kg.ha <sup>-1</sup> )	(kg.ha <sup>-1</sup> )	(kg.ha <sup>-1</sup> )		(kg.ha <sup>-1</sup> )	
	20 dias após o plantio		Antes do plantio, fundo cova		20 dias após o plantio	90 dias após o plantio	Total	
<b>0P+0K</b>	<b>100</b>	<b>21</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
0+172K	100	21	0	0	69	103	172	100
0P+343K	100	21	0	0	137	206	343	199
195P+0K	100	21	195	80	0	0	0	0
195P+172K	100	21	195	80	69	103	172	100
195P+343K	100	21	195	80	137	206	343	199
<b>390P+0K</b>	<b>100</b>	<b>21</b>	<b>390</b>	<b>160</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
390P+172K	100	21	390	160	69	103	172	100
390P+343K	100	21	390	160	137	206	343	199
780P+0K	100	21	780	320	0	0	0	0
780P+172K	100	21	780	320	69	103	172	100
780P+343K	100	21	780	320	137	206	343	199

Fonte: Do autor (2024)

A análise de madeira não foi feita em todos os 12 tratamentos por questões de praticidade e inviabilidade de transporte do material. Em estudos de crescimento no mesmo plantio, não foi observado diferenças no crescimento da espécie entre os tratamentos (Teixeira *et al.*, 2024), portanto, considerou-se que os tratamentos escolhidos representam as variações que possam ocorrer na qualidade da madeira em razão da adubação. A caracterização do solo foi realizada conforme metodologia da Embrapa (Bernardi *et al.*, 2002).

Tabela 2 – Caracterização química dos solos de plantio em diferentes profundidades

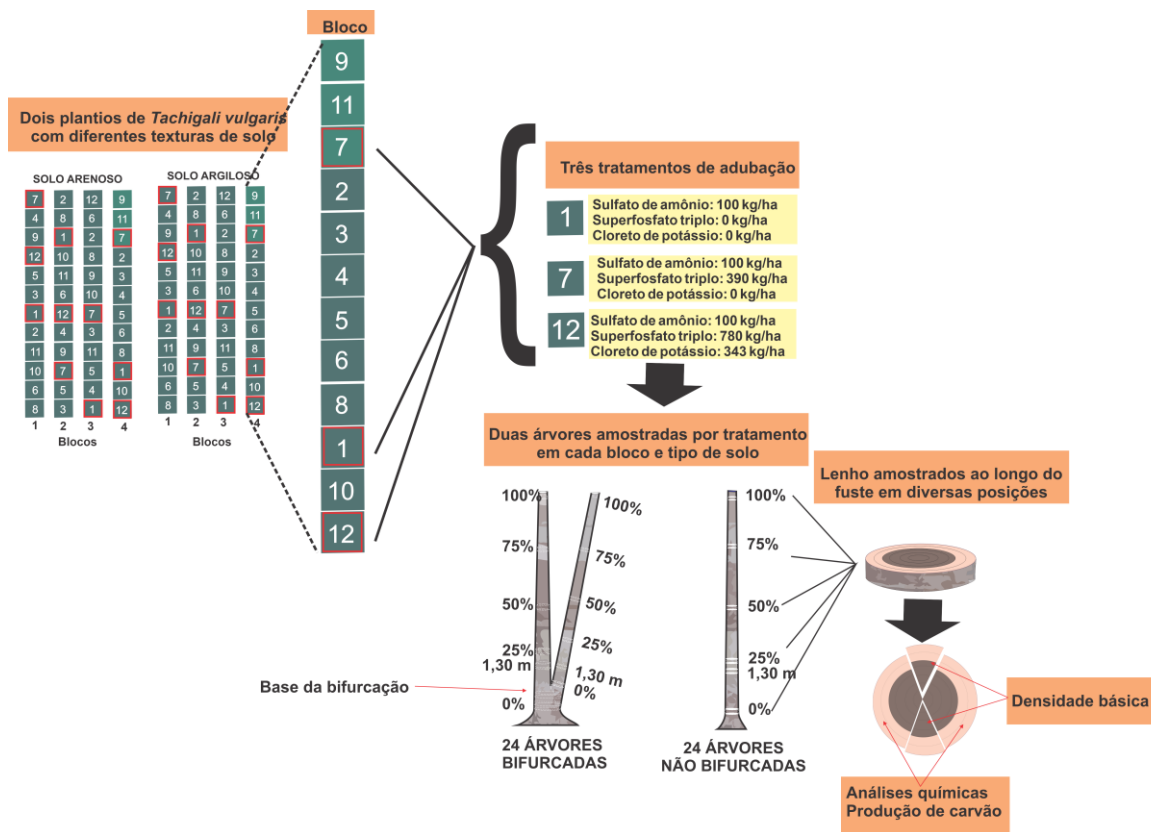
Textura	Prof. (cm)	Física (g kg <sup>-1</sup> )				pH (H <sub>2</sub> O)	Química							
		Areia	Silte	Argila	MO (g dm <sup>-3</sup> )		P (mg dm <sup>-3</sup> )	K	Ca	Mg	H+Al	Al	CTC	V%
Muito argilosa	0 – 10	195	195	674	4,2	21,5	3,1	0,5	5,3	3,0	56	11,1	64,8	13,6
	10 – 20	158	108	734	4,1	14,8	1,9	0,2	3,6	1,7	50	11,1	55,8	9,8
	20 – 40	105	156	739	4,0	11,3	0,7	0,2	3,5	1,6	45	11,6	50,3	10,5
Franco arenosa	0 – 10	804	55	105	4,0	11,1	5,6	0,3	1,5	0,6	47	12,7	49,4	4,8
	10 – 20	856	11	133	4,1	10,5	5,9	0,2	1,4	0,6	48	12,7	50,3	4,4
	20 – 40	804	26	170	4,2	9,5	3,3	0,2	1,4	0,6	43	11,7	45,2	4,9

pH: potencial hidrogênio; Mo: matéria orgânica; CTC: capacidade de troca catiônica; V%: saturação por bases. Fonte: Do autor (2024)

## 2.2 Amostragem das árvores e do lenho de *T. vulgaris*

Para as análises, foram coletadas 48 árvores da espécie *Tachigali vulgaris*, sendo 2 árvores amostradas em cada tratamento de adubação, aos 11 anos de idade, sendo 24 bifurcadas e 24 não bifurcadas, escolhidas considerando a representatividade da classe de área basal média da parcela. A Figura 2 mostra o delineamento experimental realizado e a amostragem de madeira.

Figura 2 - Delineamento experimental e a amostragem da madeira de *Tachigali vulgaris*.



Fonte: Do autor (2024)

Os blocos são utilizados aqui para separar o efeito dos tratamentos das variações naturais que acontecem no solo. Para que isso seja possível, em todos os blocos deve haver todos os tratamentos. A partir das variações dos valores da variável resposta por bloco, é possível distinguir o que é efeito de variações que ocorreram no solo e o que é efeito dos tratamentos.

### 2.3 Determinação dos elementos inorgânicos na madeira de *T. vulgaris* por espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP OES)

As análises para a obtenção da concentração de inorgânicos da madeira de *T. vulgaris* foram realizadas na Universidade Federal de Lavras, Departamento de ciências do solo, laboratório de nutrição mineral de plantas. Para a obtenção de Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S, Cu, Zn Si e Ti foi utilizado um espectrômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

As amostras de madeira foram previamente secas em estufa regulada na temperatura de  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$  até estabilização da massa. Todas as soluções e diluições foram preparadas com água ultrapura, de forma a evitar qualquer contaminação (resistividade  $18,2\text{ M}\Omega/\text{cm}$ ).

O processo de digestão ácida foi realizado em sistema de micro-ondas fechado usando uma massa de 0,25 g e combinação de 6,0 mL de  $\text{HNO}_3$   $14\text{ mol L}^{-1}$  e 2,0 mL de  $\text{H}_2\text{O}_2$  35% (v/v). Após o procedimento de digestão, os tubos com as soluções foram retirados do forno de micro-ondas e resfriados à temperatura ambiente. Após o resfriamento, os digeridos obtidos foram transferidos para frascos volumétricos e os volumes aferidos para 20 mL com água ultrapura.

Para cada tratamento foram realizadas análises em 3 réplicas que resultaram em um desvio padrão abaixo de 5%. Além disso, a exatidão do procedimento de análise por ICP OES foi avaliada pelo método da adição e recuperação de analito.

A Tabela 3 mostra o limite de detecção e quantificação dos elementos estudados.

Tabela 3 - Limite de detecção e quantificação dos elementos determinados na madeira de *T. vulgaris* (mg/kg)

Amostras	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S	Si	Ti
LD	0,0001	0,01	0,05	0,01	0,01	0,01	0,02	0,0008	0,01	0,03	0,0002
LQ	0,0004	0,05	0,06	0,04	0,03	0,02	0,09	0,003	0,05	0,10	0,0007

LD: Limite de detecção; LQ: Limite de quantificação. Fonte: Do autor (2024)

#### 2.4 Comparação com a análise de ICP-OES com dados de fluorescência de raio x

Os dados de inorgânicos por ICP-OES também foram utilizados para avaliar a eficiência do equipamento portátil de fluorescência de raios X (pXRF) na previsão dos inorgânicos presentes na madeira. Para a análise do lenho de *T. vulgaris* com pXRF, a madeira nas diferentes posições do fuste foi tritura e agrupada formando uma única amostra por árvore. Em seguida, esse material foi peneirado para homogeneização da granulometria das amostras. Foi utilizado o lenho que passou pela peneira de 60 mesh e ficou retido na peneira de 200 mesh. Os teores de (Al), cálcio (Ca), ferro (Fe), potássio (K), magnésio (Mg), manganês (Mn), fósforo (P), enxofre (S), silício (Si) e titânio (Ti). O equipamento pXRF apresenta uma área de medição de  $1\text{ cm}^2$ , dessa forma, as amostras foram colocadas em embalagens plásticas microfinas para que as amostras tenham no mínimo uma área de  $2\text{ cm}^2$  e 2 cm de altura. A amostra da madeira de cada árvore foi mensurada 3 vezes. O equipamento utilizado foi um equipamento portátil de fluorescência de raios X Bruker (Billerica, MA,

USA), modelo Tracer. O equipamento contém um tubo de raio x com 50 keV e 100  $\mu$ A. A análise foi feita no modo “plants” por 60 segundos.

## 2.5 Determinação da exportação de nutrientes pelo uso da madeira de *T. vulgaris*

A exportações de nutrientes foram realizadas por meio das análises de concentração de nutrientes por meio de ICP-OES e a massa seca de madeira (Equação 1):

$$X(kg.ha^{-1}) = \frac{x(\%).MSM(kg.ha^{-1})}{100} \quad (1)$$

Em que X é a concentração do nutriente (% , base seca) realizada por ICP-OES e MSM é a massa seca de madeira do tratamento (adubações).

Para o cálculo da massa seca de madeira foi preciso estimar o volume de madeira por hectare. O volume por hectare do plantio de *Tachigali vulgaris* aos 11 anos de idade sob diferentes níveis de adubação foi realizado utilizando a Equação 2, anteriormente utilizada para estimativa de volume para plantios da espécie *T. vulgaris* (Teixeira *et al.*, 2024). Para estimativa do volume sem casca foi realizada a subtração do volume da casca conforme a Equação 3. Para a determinação da estimativa de massa seca foi utilizada a Equação 4, onde MSM é a massa seca de madeira (kg/ha), Vsc é o volume sem casca (m<sup>3</sup>/ha),  $\rho$  é a densidade básica da madeira (t/m<sup>3</sup>).

$$V_{cc} = e^{(-9.164635 + 1.912123Ln[DAP_{eq}] + 0,751405 Ln[h]} \quad (2)$$

Onde DAPeq é o diâmetro equivalente dos fustes à 1,30 m obtidos por  $DAP_{eq} = \sqrt{(DAP_{Fuste 1}^2 + DAP_{Fuste 2}^2)}$  e h é a altura total da árvore.

$$V_{sc} = V_{cc} - \left( V_{cc} * \frac{casca(\%)}{100} \right) \quad (3)$$

$$MSM = V_{sc} \times \rho \quad (4)$$

## 2.6 Estimativa da composição das cinzas da madeira de *T. vulgaris*

As concentrações dos inorgânicos da madeira de *T. vulgaris* foram utilizados para avaliar a probabilidade de danos ao equipamento de combustão. Os compostos utilizados para essa estimativa, normalmente presentes nas cinzas são  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{SO}_3$ . Essa estimativa é realizada transformando-se os dados obtidos em valores equivalentes para óxidos comuns em cinzas. Esta transformação foi realizada usando fatores de conversão estequiométricos de elemento: a porcentagem do elemento encontrado na madeira foi multiplicada pela razão entre a massa molecular do óxido e a massa do elemento neste composto (Equação 5). Desta forma, obteve-se a massa dos óxidos. Esses valores foram então normalizados para 100%, dividindo-os pela soma dessas massas (Equação 6). Com esses valores, a massa de óxido nas cinzas foi estimada a partir do teor de cinzas (Equação 7). Finalmente, esses valores são transformados em porcentagens normalizadas para 100% (Equação 8).

$$\text{Massa do óxido (g)} = \text{Elemento (\%)} \times \frac{\text{massa molecular do óxido}}{\text{massa atômica do elemento} \times \text{n}^\circ \text{ moles do elemento no óxido}} \quad (5)$$

$$\text{Normalização da composição a 100\%} = \frac{\text{Massa do óxido (g)}}{\text{Massa total dos óxidos (g)}} \quad (6)$$

$$\text{Óxido nas cinzas (g)} = \frac{\text{Óxido normalizado à 100\%} \times \text{cinzas (\%)}}{100} \quad (7)$$

$$\text{Óxido normalizado à 100\%} = \frac{\text{Óxido nas cinzas (g)}}{\text{cinzas (\%)}} \quad (8)$$

Os índices empíricos para avaliar a tendência da biomassa em criar depósitos nas caldeiras durante o processo de combustão (Fernández Llorente; Carrasco García, 2005; Li *et al.*, 2013; Magdziarz; Dalai; Koziński, 2016; Miles *et al.*, 1995; Pronobis, 2005). As equações estão descritas abaixo.

### **Basic to acidic compound ratio (B/A)**

$$B/A = \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{P}_2\text{O}_5}{\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} \quad (9)$$

$B/A < 0,5$  – Baixa propensão à escoriação

$0,5 < B/A < 1,0$  - média propensão à escoriação

$B/A \geq 1,75$  - severa propensão à escoriação

**Fouling index (FI)**

$$FI = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O + P_2O_5}{SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3} * (Na_2O + K_2O) \quad (10)$$

FI ≤ 0,6 - baixa propensão à incrustação

FI = 0,6 a 40 - alta propensão à incrustação

FI ≥ 40 - extremamente alta propensão à incrustação.

**Sintering (SI)**

$$SI = \frac{CaO + MgO}{Na_2O + K_2O} \quad (11)$$

SI > 2,0 – as cinzas das biomassas não apresentam risco de sinterização

SI < 2,0 – as cinzas das biomassas apresentam risco de sinterização

**Bed agglomeration index (BAI)**

$$BAI = \frac{Fe_2O_3}{Na_2O + K_2O} \quad (12)$$

BAI > 0,15 => Sem propensão em formação de incrustações e escórias

BAI < 0,15 => Alta propensão em formação de incrustações e escórias

**Slag viscosity index (SR)**

$$SR = \frac{SiO_2}{SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO} * 100 \quad (13)$$

SR > 72 Baixa tendência na formação de escórias

65 < SR < 72 Média tendência a formação de escórias

SR < 65 Alta tendência a formação de escórias

**Alkali Index (AI)**

$$AI \text{ (kg de álcali/Gj)} = \frac{\left(\frac{\text{Cinzas\%}}{100}\right) * \left(\frac{Na_2O + K_2O}{100}\right)}{PCS \text{ (Gj/kg)}} \quad (14)$$

0,17 < AI < 0,34 - propensão à incrustação e escoriação

AI > 0,34 - são certas as ocorrências de incrustação e escoriação

**2.7 Análises estatísticas dos dados**

O experimento teve como fatores o tipo de solo, adubações e o tipo de fuste. Foi considerado um delineamento em blocos casualizados (DBC). Devido ao grande número de variáveis explicativas, foram utilizados modelos mistos para avaliar o efeito nas

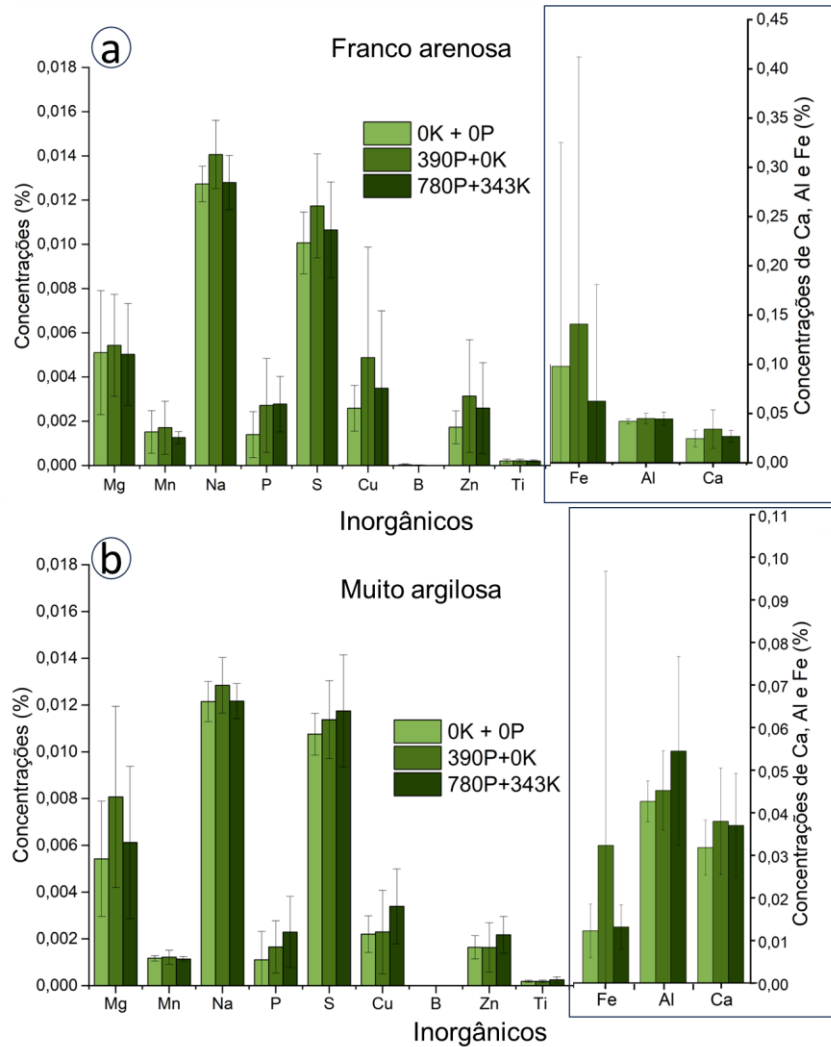
concentrações, exportações de nutrientes e composição das cinzas. Modelos estatísticos lineares mistos são utilizados para analisar dados que possuem uma estrutura de agrupamento ou hierarquia. A partir destes modelos foi possível avaliar a interação entre os fatores. Ademais, foram realizadas correlações entre as características de crescimento e os nutrientes presentes na madeira. O processamento dos dados foi realizado no software R (Core Team, 2023).

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1 Concentrações de nutrientes**

A Figura 3 apresenta as concentrações de inorgânicos na madeira de *Tachigali vulgaris* por tratamentos de adubação nos solos de textura franco arenosa (Fig. 3a) e muito argilosa (Fig. 3b). De maneira geral, os elementos com maiores teores foram Fe ( $0,06\% \pm 0,15\%$ ), Al ( $0,05\% \pm 0,01\%$ ) e Ca ( $0,03\% \pm 0,01\%$ ). Os teores dos outros elementos seguiram a ordem decrescente: Na ( $0,012\% \pm 0,001\%$ ) > S ( $0,011\% \pm 0,003\%$ ) > Mg ( $0,006\% \pm 0,003\%$ ) > Si ( $0,004\% \pm 0,005\%$ ) > Cu ( $0,003\% \pm 0,003\%$ ) > Zn ( $0,002\% \pm 0,002\%$ ) > P ( $0,002\% \pm 0,002\%$ ) > Mn ( $0,0013\% \pm 0,0007\%$ ) > Ti ( $0,0002\% \pm 0,0001\%$ ) > B ( $0,00007\% \pm 0,000023\%$ ). Boro foi encontrado apenas em 3 árvores do tratamento 0P+0K e 2 árvores do tratamento 390P+0K. Não foram encontrados K no lenho das árvores.

Figura 3 - Concentrações de inorgânicos na madeira de *Tachigali vulgaris* por tratamentos de adubação e textura de solos.



Fonte: Do autor (2024)

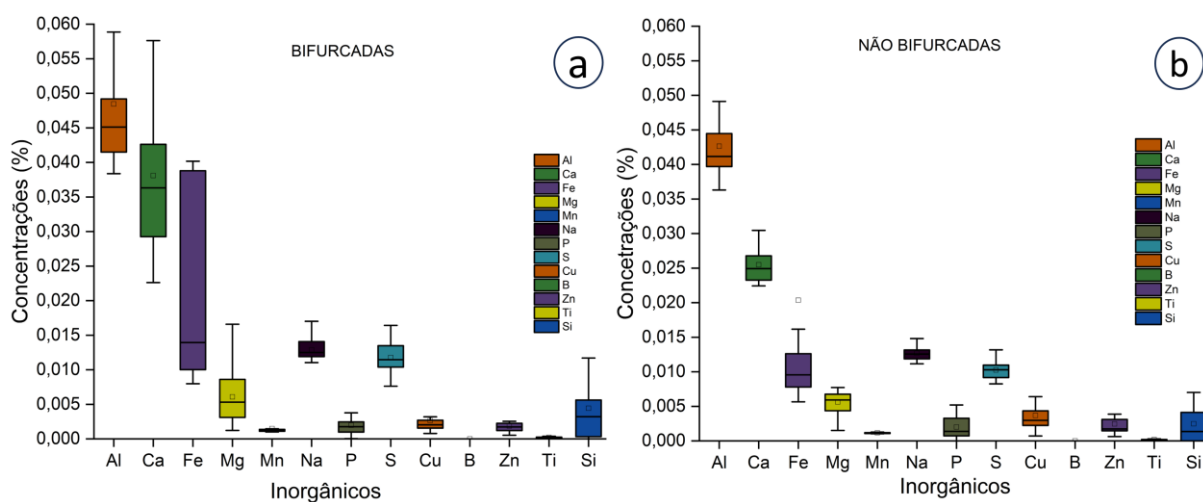
Houve altas teores médios e desvio padrão de Si, Fe e Al. Outros estudos também relatam grandes variação da matéria inorgânica na madeira (Rodríguez-Soalleiro *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2023; Vassilev *et al.*, 2017). Os altos valores encontrados para Fe e Al em *T. vulgaris* é justificado pela alta presença deste elemento nos solos no Brasil e regiões (SOUZA *et al.*, 2018). Em outras espécies na Amazônia são reportadas concentrações foliares de Fe superiores a valores encontrados para macronutrientes como P e Mg (Santos; Gonçalves; Feldpausch, 2006). Em plantas jovens de *T. vulgaris* (Simões *et al.*, 2023) foram encontradas concentrações de Fe nas folhas maiores que todos os macronutrientes (40,0 g/kg). Também

foram encontrados altos valores de Na (1,2 g/kg). O teor de P no estudo citado foi de cerca de 1,2 g/kg.

As análises de modelo linear misto identificaram efeito da interação entre fuste e solo nos teores de Al na madeira. As árvores bifurcadas no solo de textura muito argilosa apresentaram estatisticamente maiores teores de alumínio ( $0,052 \pm 0,019\%$ ). As árvores do mesmo tipo de fuste no solo arenoso apresentaram teor de alumínio de  $0,045\%$  ( $\pm 0,004\%$ ). As árvores não bifurcadas apresentaram  $0,043\%$  ( $\pm 0,006\%$ ) e  $0,042\%$  ( $\pm 0,003\%$ ) na textura franco arenosa e muita argilosa, respectivamente. Os teores de Fe não foram diferentes entre os tratamentos.

Os percentuais de P tenderam a aumentar conforme o aumento da adubação com este nutriente no solo. No entanto, houve diferenças significativas apenas para o tratamento 0P+0K. Já Ca, que também está presente no fertilizante superfosfato triplo, não apresentou diferenças entre as adubações, mas a textura de solo influenciou nos teores. A bifurcação também afetou o teor de cálcio (Figura 4). As árvores bifurcadas apresentaram maior dispersão dos dados nos teores dos nutrientes, principalmente para Al, Ca e Fe.

Figura 4 - Concentrações de inorgânicos na madeira de *Tachigali vulgaris* por bifurcações e textura de solos.



Fonte: Do autor (2024)

As concentrações de P foram menores que as encontradas para o lenho de *T. vulgaris* em estudos recentes com a espécie (Santos *et al.*, 2023). Nestes estudos foram encontrados teores de 0,02% para este elemento. Na pesquisa citada, o plantio experimental foi adubado com 150 kg/ha de NPK fórmula 6-30-6 (9 kg de N, 45 kg de  $P_2O_5$ , 9 kg de  $K_2O$ ). Esses

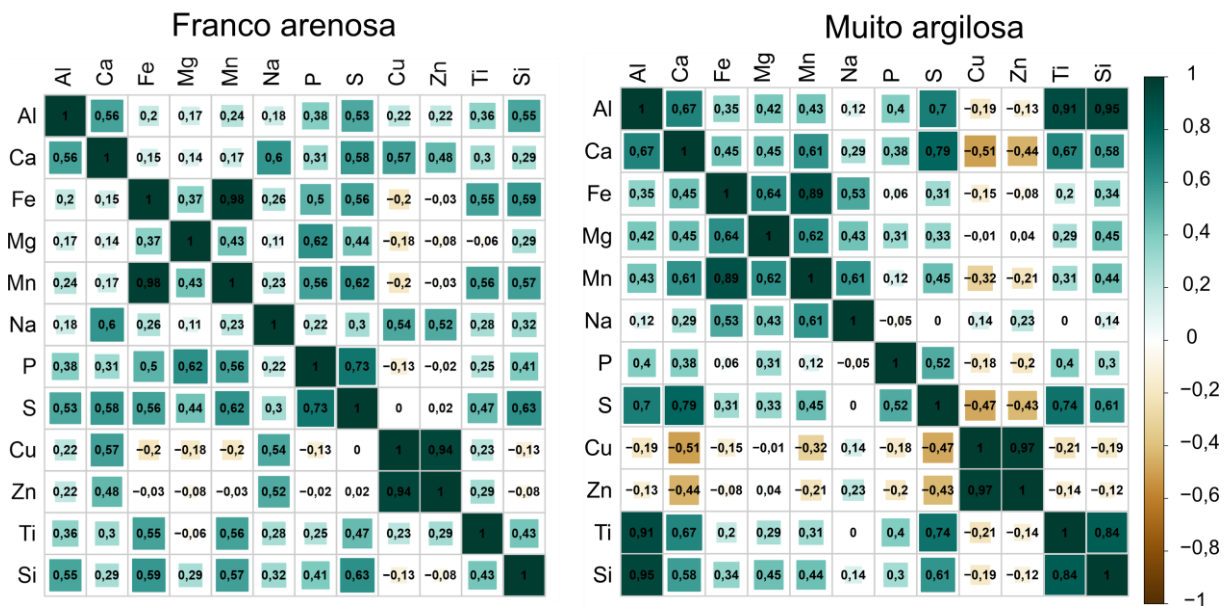
valores são menores que o aplicado nos testes de adubação do presente estudo. As menores concentrações de P na madeira da espécie comparado ao encontrado em estudos anteriores pode ser explicado pela idade do planto (11 anos), sendo mais antigo que no estudo citado (7 anos). A idade das árvores pode afetar a absorção de nutrientes na madeira (Rodríguez-Soalleiro *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2020).

A ausência de K na madeira pode estar ligada a um fator semelhante associado à baixas concentrações de K no solo. Esse nutriente apresentou média de 0,45 mmol/dm entre as diferentes texturas edáficas (Tabela 2). Na madeira de *Eucalyptus grandis* cultivada em solos pobres em K, foram observadas alta translocação deste elemento dos anéis de crescimento, indicando a remobilização do nutriente nos locais das árvores onde é mais necessário (Sette *et al.*, 2013). Além disso, houve aumento do crescimento de *Eucalyptus* com a adição de Na no solo, provavelmente, devido a substituição do Na pelo K em alguns processos fisiológicos (Cornut *et al.*, 2021; Sette *et al.*, 2013). Esse fenômeno poderia explicar a alta quantidade de Na encontrada no lenho de *Tachigali vulgaris*. Embora estas sejam hipóteses válidas para explicar a ausência de K na madeira, é importante destacar que, em geral, o potássio representa um dos inorgânicos mais comuns encontrado no lenho e suas cinzas, devido as suas funções na turgência das células e funções osmóticas. O teor médio encontrado para esse elemento na madeira é de cerca de 0,05%. A substituição de K por Na também pode explicar o motivo dos tratamentos de adubações não terem influenciado as taxas de crescimento da espécie em estudos anteriores com o mesmo plantio experimental (Teixeira *et al.*, 2024).

Do ponto de vista energético, os altos valores de Na podem ser problemáticos, pois este elemento tem baixo ponto de fusão, podendo se fundir e aglomerar nas caldeiras durante a degradação térmica da madeira (Vassilev *et al.*, 2017). Esse processo pode causar a corrosão dos equipamentos de queima (Vassilev *et al.*, 2017). Outro elemento potencialmente problemático é o S, que causa poluições ambientais na forma de SO<sub>2</sub>. A norma ISO 17225-2 para pellets, biomassas processadas mecanicamente visando ao aumento da sua densidade energética, o teor de S deve ser abaixo de 0,04%, respectivamente. Recomendações do governo Francês para controle de qualidade de pellets recomendam Na abaixo de 0,03% (García-Maraver; Popov; Zamorano, 2011; ISO, 2021). *T. vulgaris* tiverem concentrações inferiores que as exigidas por essas normas e recomendações, demonstrando o potencial da espécie como fonte de energia sustentável.

Correlações significativas foram observadas entre os nutrientes (Figura 5). A presença de Al na madeira se correlacionou positivamente com Ca, S, Ti e Si, principalmente no solo de textura muito argilosa. Esse é um indicativo de que os teores de Al na madeira não afetam a absorção de outros nutrientes. É comum que espécies tropicais tenham resistência à toxicidade do alumínio (Brunner; Sperisen, 2013). Em análises foliares de *Sclerolobium paniculatum*, antiga classificação de *T. vulgaris*, não foi encontrado alumínio nas folhas mesmo em solos com alto teores deste elemento, indicando que a espécie tem mecanismo para eliminar o Al nas folhas (Andrade *et al.*, 2011). A acumulação do Al no lenho é um mecanismo para evitar a toxicidade? Futuros estudos devem avaliar os mecanismos fisiológicos de resistência da espécie a este elemento.

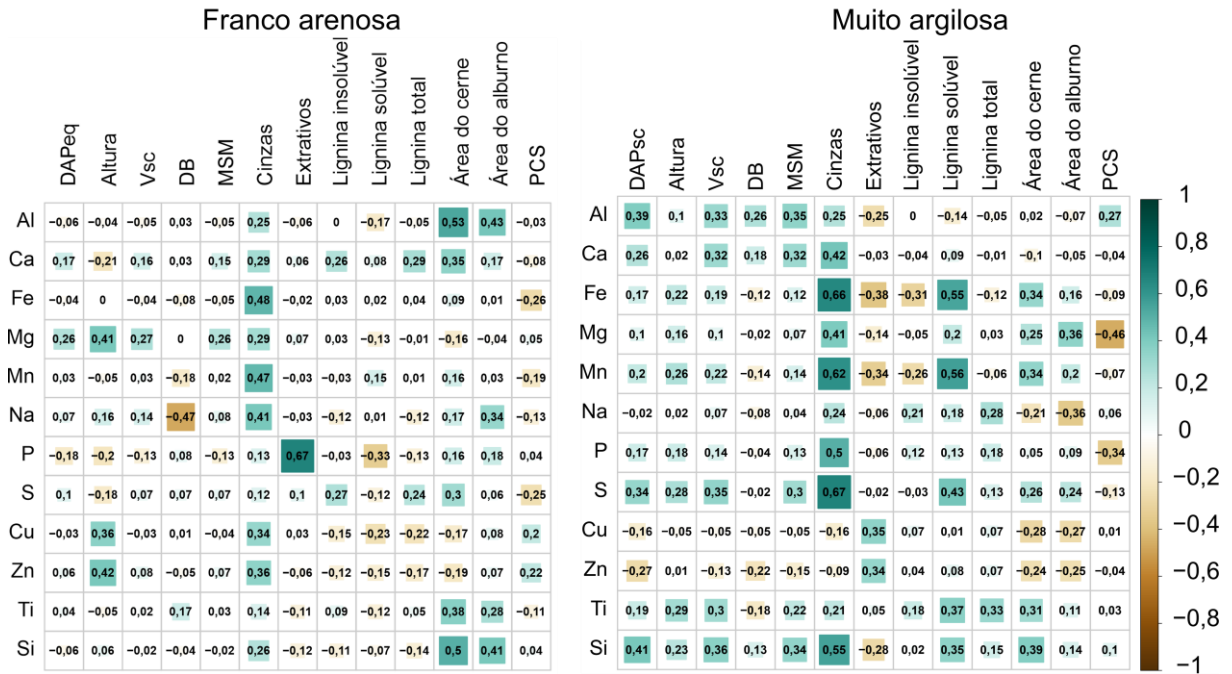
Figura 5 - Correlações entre os nutrientes avaliados na madeira de *T. vulgaris*



Fonte: Do autor (2024)

A Figura 6 mostra as correlações entre os elementos e características de crescimento do tachi. No solo arenoso houve correlação positiva entre P e o teor de extrativos ( $r=0,67$ ). O solo arenoso apresentou maior teor desse nutriente (0,002%) que o solo de textura muito argilosa (0,001%). As maiores correlações foram para Fe e cinzas no solo de textura muito argilosa, indicando que esse nutriente tem grande representação na composição das cinzas. Fe tem alta estabilidade térmica durante a combustão da madeira (Boström *et al.*, 2012). Dessa forma, ele pode evitar problemas de corrosão nas caldeiras (Boström *et al.*, 2012).

Figura 6 - correlações entre os elementos e características de crescimento de *T. vulgaris*.



Fonte: Do autor (2024)

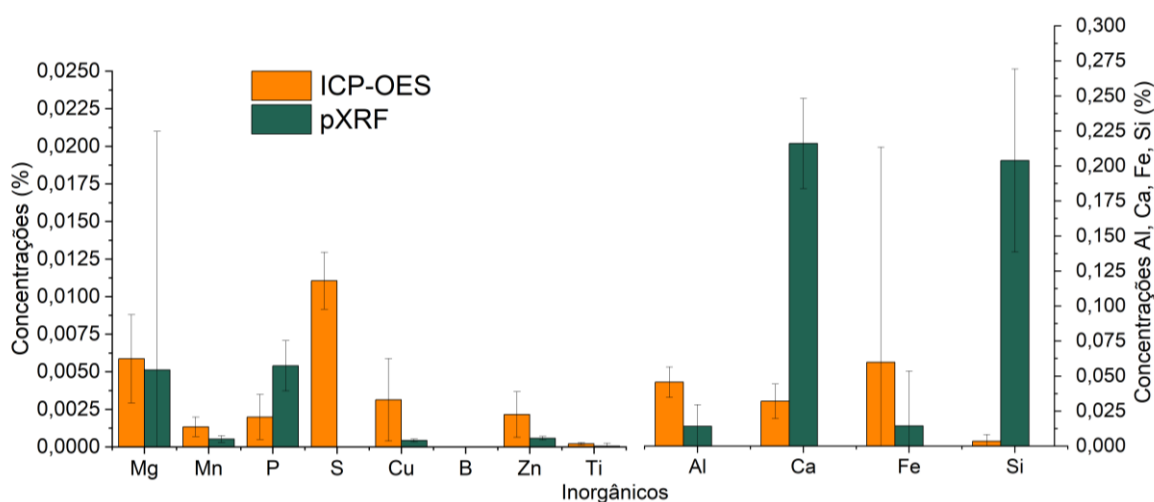
Embora houve correlações significativas entre os inorgânicos e as características de qualidade na madeira, de maneira geral, as correlações foram relativamente baixas, principalmente para as variáveis de crescimento. Algumas relações são difíceis de explicar e podem não representar causa e efeito direto entre as variáveis. Por exemplo, houve correlação positiva entre Mn e lignina insolúvel no solo de textura muito argilosa, mas na textura franco arenosa não houve esse efeito. Essas correlações baixas podem ter relação com a simbiose com bactérias fixadoras de nitrogênio na espécie. Estudos indicam que a fixação de nitrogênio facilita a absorção de outros nutrientes (Baribault; Kobe; Finley, 2012). Em espécie do gênero Fabaceae, mesmo gênero de *T. vulgaris*, foi observado baixo efeito da restrição de nutrientes no solo sob o crescimento. Esse fenômeno, além da suposta substituição de K por Na, pode explicar a ausência de efeito da adubação no crescimento do tachi aos 10 anos (Teixeira *et al.*, 2024).

### 3.1 Capacidade do equipamento de Fluorescência de Raios X Portátil em prever os nutrientes na madeira de *T. vulgaris*

A previsão da composição inorgânica na biomassa de forma prática auxilia na identificação do estado nutricional das plantas e agiliza a tomada de decisões. A Figura 7

demonstra as previsões dos valores médios de pXRF em comparação ICP-OES. Assim como no ICP-OES, K também não foi identificado para as análises de pXRF. S foi identificado em ICP-OES, mas não foram identificados em pXRF. Para identificação de S, são exigidos baixos níveis de energia de emissões de raio x, que podem ser afetadas por condições do ambiente. Além disso, embora Mg tenha obtidos médias gerais semelhantes para os 2 métodos, as análises de pXRF identificou este nutriente apenas para 5 árvores, das 48 analisadas. As proporções entre os nutrientes também foram diferentes: enquanto em ICP-OES os maiores nutrientes seguiram a ordem Fe > Al > Ca, para pXRF, os maiores nutrientes foram Ca > Si > Fe.

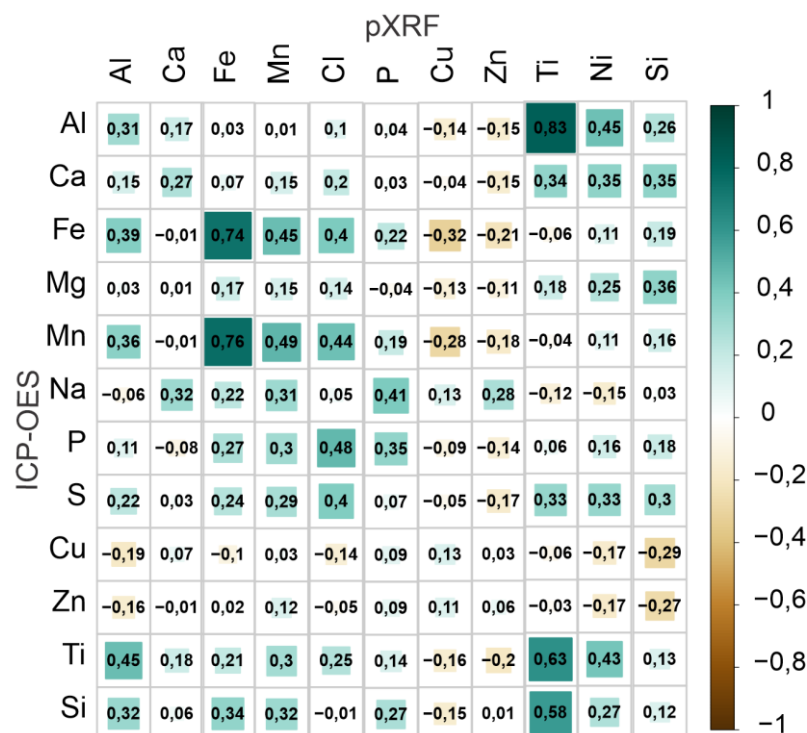
Figura 7 - Previsões dos valores médios de pXRF em comparação as análises ICP-OES da madeira de *T. vulgaris*



Fonte: Do autor (2024)

Muitos fatores podem influenciar as análises por meio de fluorescência de raio x. A baixa concentração de nutrientes na madeira pode ter influenciado as predições. Em experimentos com espécies vegetais comerciais, as baixas proporções de inorgânicos no algodoeiro influenciou nas estimativas (Costa Junior *et al.*, 2020). Embora os teores de Fe estimados por pXRF tenham sido inferiores aos valores observados para ICP-OES, a correlação foi significativa ( $r=0,76$ ,  $p\text{-valor}=0,000$ ), conforme apresentado na Figura 8

Figura 8 – Correlações entre as concentrações encontradas para pXRF e ICP-OES na madeira de *T. vulgaris*.



Fonte: Do autor (2024)

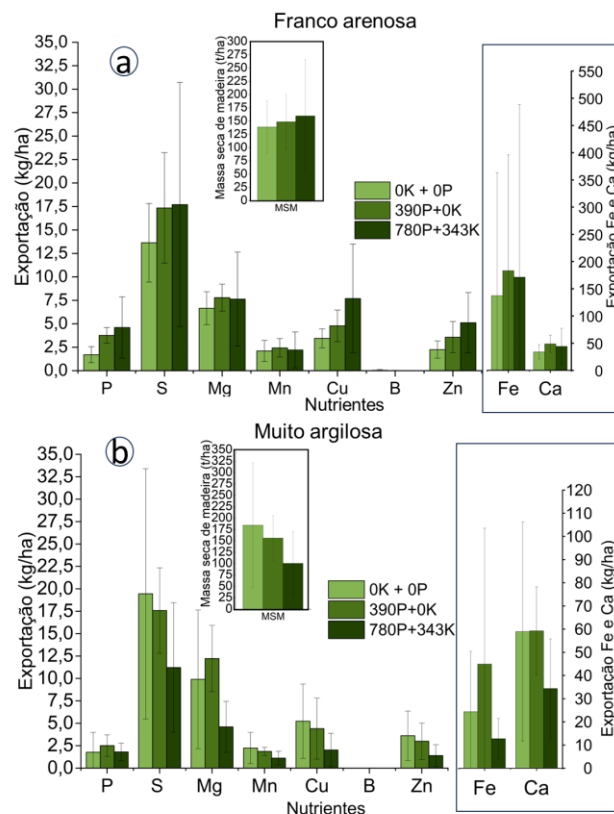
É importante destacar que embora a análise de Cl não tenha sido realizada em ICP-OES, pXRF identificou teores de cloro na madeira de *Tachigali vulgaris*. Cl é um elemento poluente (Chantara *et al.*, 2019) e deve apresentar baixos teores na composição da biomassa para uso energético. A análise de pXRF identificou um teor de 0,04% ( $\pm 0,02\%$ ). A ISO 17225-2 (ISO, 2021) para pellets limita o teor de cloro a 0,02%. No entanto, devido a imprecisões do equipamento pXRF, é preciso confirmar o teor de cloro por outros métodos.

Fe, Ti e Si também apresentaram boas correlações (0,63 e 0,58, respectivamente). As correlações para Zn e Cu não foram significativas. Além das baixas proporções de inorgânicos na madeira, a umidade da madeira analisada (8%, base seca) pode ter afetado as estimativas. A umidade pode influenciar nas predições de pXRF como observados em estudos com análises de nutrientes em folhas (Mclaren; Guppy; Tighe, 2012). É importante avaliar as predições de fluorescência de raio X portátil da madeira de *T. vulgaris* do material a 0% de umidade.

### 3.2 Exportação de nutrientes na utilização da madeira de *T. vulgaris*

A Figura 9 mostra a estimativa de exportação de nutrientes presente no tronco sem casca de *Tachigali vulgaris*. De maneira geral os teores seguiram a ordem decrescente: Fe ( $95,65 \pm 177,21$  kg/ha) > Ca ( $46,55 \pm 26,62$  kg/ha) > S ( $16,15 \pm 8,51$  kg/ha) > Mg ( $8,13 \pm 4,55$  kg/ha) > Cu ( $4,60 \pm 3,50$  kg/ha) > Zn ( $3,15 \pm 2,22$  kg/ha) > P ( $2,69 \pm 1,95$  kg/ha) > Mn ( $1,99 \pm 1,21$  kg/ha) > B ( $0,01 \pm 0,03$  kg/ha). Os altos valores de S em relação aos outros nutrientes provavelmente se deve ao uso de sulfato de amônia como fonte de nitrogênio. As exportações foram diretamente correlacionadas com o aumento da massa seca de madeira para S (textura franco arenosa e muito argilosa), Cu (textura franco arenosa e muito argilosa) e Zn (textura franco arenosa e muito argilosa). Como observado na Figura 9, esse comportamento também aconteceu para Mn e P, mas apenas para um dos tipos de textura de solos.

Figura 9 - Estimativa de exportação de nutrientes presente no tronco sem casca de *Tachigali vulgaris*.



Fonte: Do autor (2024)

É esperado que os nutrientes mais exportados sejam os macronutrientes, elementos mais exigidos pela planta. Geralmente Ca e K representam os elementos mais exportados no

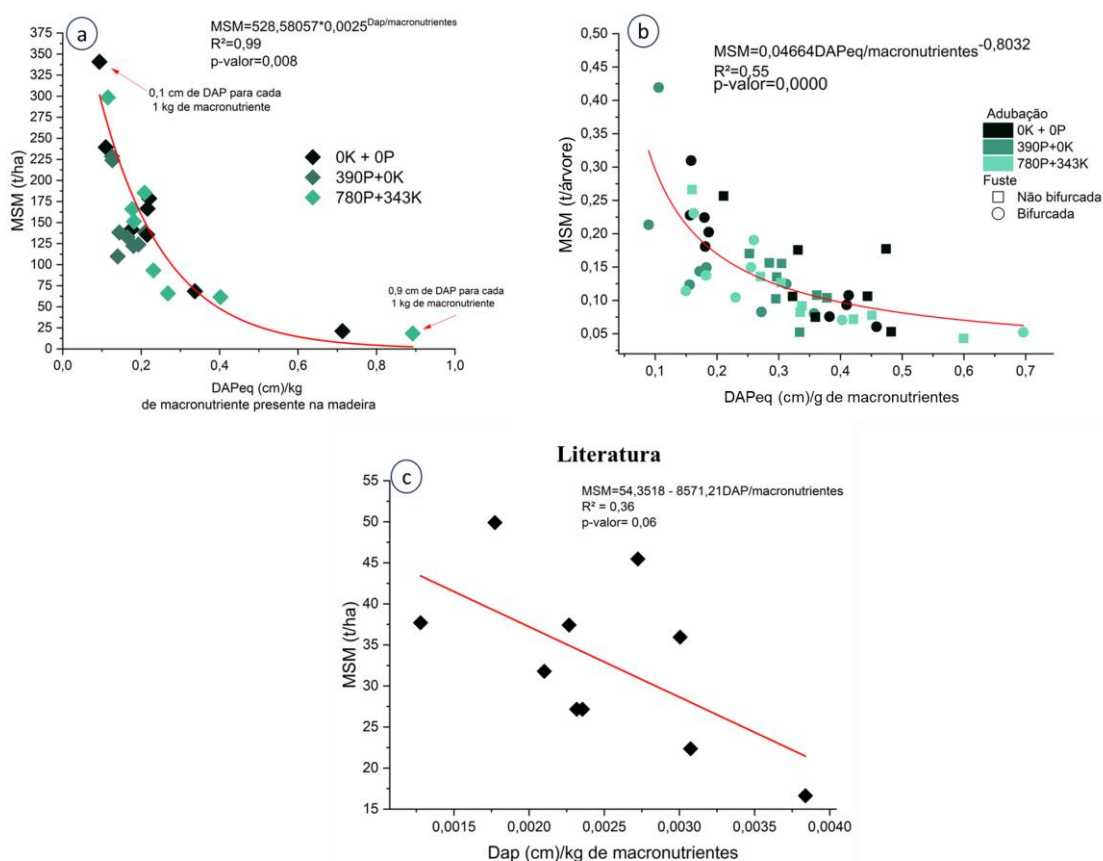
lenho de *Eucalyptus* spp. (Bentancor *et al.*, 2019; Merino *et al.*, 2005). Para Ca são relatadas exportações entre 25,4 kg/ha e 119 kg/ha. Já para K as exportações variam de 5 kg/ha a 146,4 kg/ha (Bentancor *et al.*, 2019; Lima Neto *et al.*, 2021; Merino *et al.*, 2005). Entre os micronutrientes, há relatos (MERINO *et al.*, 2005) de maiores valores para Fe ( $5,0 \pm 3$  kg/ha) e Mn ( $7,5 \pm 5,6$  kg/ha). As altas exportações de Fe observadas estão relacionadas às grandes concentrações obtidas para este elemento no lenho.

A conversão de P em  $P_2O_5$  mostra uma ideia mais clara dos nutrientes estocados na madeira nas necessidades de adubação. O solo arenoso apresentou teores médios de  $P_2O_5$  de 7,68 kg/ha ( $\pm 3,41$  kg/ha). Para esse solo, houve alta diferença entre os tratamentos 0K+0P ( $3,90 \pm 1,97$ ), 390P+0K ( $8,62 \pm 1,90$  kg/ha) e 780P+343K ( $10,53 \pm 7,46$  kg/ha). As quantidades de adubo superfosfato triplo adicionadas no solo conferem ao solo 160 kg/ha e 320 kg/ha de  $P_2O_5$ , respectivamente. Dessa forma, os tratamentos conferem quantidades adequadas de P para manutenção da plantação, supondo que as folhas e outros resíduos são mantidos na floresta. Para o solo argiloso, as exportações foram inferiores ( $4,64 \pm 0,94$  kg/ha de  $P_2O_5$ ). Entre as adubações houve menores diferenças entre os testes de adubação: 0K+0P ( $4,05 \pm 5,05$  kg/ha de  $P_2O_5$ ), 390P+0K ( $5,74 \pm 2,75$  kg/ha de  $P_2O_5$ ) e 780P+343K ( $4,15 \pm 2,24$  kg/ha de  $P_2O_5$ ).

Com os dados de nutrientes estocados na madeira e produtividade é possível realizar alguns aspectos interessantes da dinâmica produtividade/nutrientes exportados. A Figura 10<sup>a</sup> mostra dados da relação DAP (cm)/massa de nutrientes. Essa relação mostra a quantidade de DAPEq a cada kg de Macronutrientes contidos na madeira. Em análises foliares é feita uma relação análoga com a massa seca das folhas em relação a massa de nutrientes contidas. Com essa análise é possível inferir das eficiências nutricional das plantas (Lima Neto *et al.*, 2021). No entanto o objetivo aqui é verificar o comportamento de produtividade em relação a este fator para a madeira. É possível observar que, conforme a razão DAP/macronutrientes decresce, há uma maior massa seca de madeira por hectare. Para essa relação em árvores individuais (Fig. 10b) foi observado uma relação semelhante. As plantas com razão Dap/macronutrientes abaixo de 0,2 apresentaram maior massa de madeira. Curiosamente, houve maior número de árvores bifurcadas com razão menor que 0,2.

Utilizando dados de biomassa e estoque de nutrientes obtidos por Zhang *et al.* (2022a), foi possível calcular essa relação para *Eucalyptus* spp. (Fig. 10 c). A relação encontrada para *Tachigali vulgaris* é diferente da encontrada para espécies de *Eucalyptus*, que resultou em uma relação é linear.

Fig. 10a – Relação entre (DAPEq/(S+P+Ca+Mg)) e massa seca de madeira (t/há) de *T. vulgaris*; Fig. 10b – Relação entre (DAPEq/(S+P+Ca+Mg)) e massa seca de madeira (t/árvore) de *T. vulgaris*; Fig. 10c – Relação entre (DAPEq/macronutrientes) e massa seca de madeira (t/ha) de *Eucalyptus* spp..



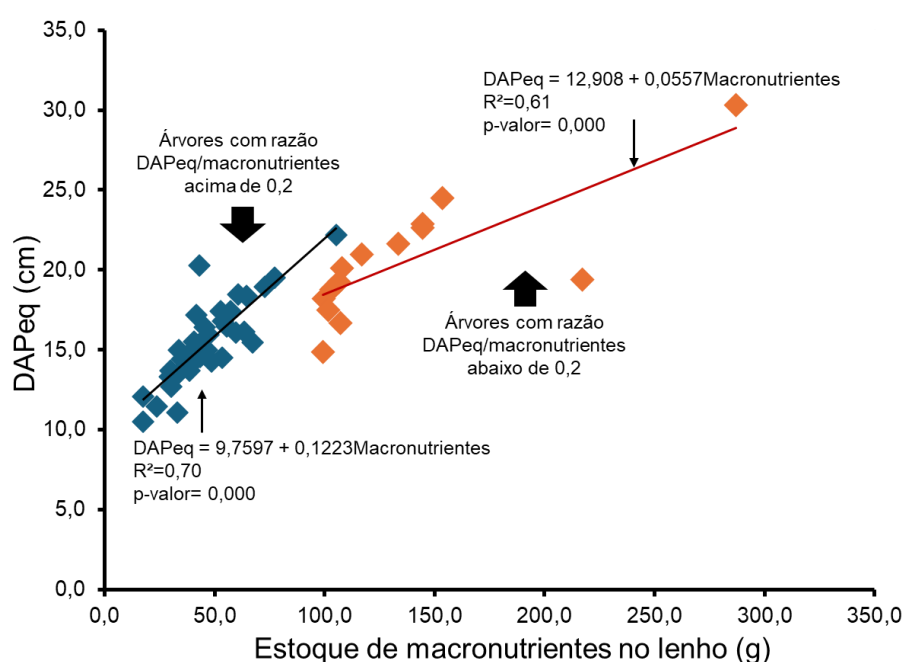
Fonte: Do autor (2024)

As árvores que tiveram relação DAPEq/macronutrientes menor que 0,2 (Fig. 10b) tiveram DAPEq maior ou igual a 15 cm e estoque de nutrientes na madeira maior ou igual a 100 gramas. As árvores com a relação maior que 0,2 apresentaram massa estocada de nutrientes abaixo de 77 gramas e DAPEq entre 10,77 cm e 20,0 cm. Esses dados podem ter a seguinte interpretação:

Houve um comportamento diferente entre as árvores com Razão DAPEq abaixo de 0,2 e acima de 0,2. As árvores acima da razão 0,2, ou seja, depois do ponto de inflexão da linha de tendência apresentaram maior proporção de redução de DAPEq em relação à redução do estoque de macronutrientes. O coeficiente angular da relação macronutrientes e DAPEq é 0,12 (Figura 11). Para as árvores com razão DAPEq/macronutrientes abaixo de 0,2, houve

proporção menor da redução DAPEq em relação ao estoque de macronutrientes (Coeficiente angular de 0,05). A menor redução dessa proporcionalidade parece resultar em uma maior massa seca de madeira produzida. Além disso, o aumento do estoque de macronutrientes parece favorecer esse fenômeno. As árvores com razão acima 0,2 respondem de uma forma mais clara a redução de macronutrientes resultando em uma menor produção de massa seca de madeira.

Figura 11 – Relação entre a quantidade de macronutrientes contidos na madeira e DAPEq nas árvores de *T. vulgaris* com razão DAPEq/macronutrientes acima de 0,2 e abaixo de 0,2.



Fonte: Do autor (2024)

Embora o estoque de compostos inorgânicos na madeira seja problemático devido a exportação de nutrientes, parece ser essencial que a madeira apresente quantidades adequadas destes nutrientes para maior produção de massa seca de madeira. Estudos relatam que o armazenamento de nutrientes na madeira é essencial para manutenção do crescimento em florestas tropicais nativas, onde há limitações de nutrientes como P (Bauters *et al.*, 2022; Lugli *et al.*, 2020). É possível que esse fenômeno possa ser extrapolado a florestas plantadas formadas por espécies nativas da Amazônia.

A partir destes dados pode-se sugerir que as plantas de *Tachigali vulgaris* com a razão DAP/macronutrientes menor que 0,2 estão nutricionalmente mais saudáveis. Em próximos estudos, é importante avaliar a nutrição das folhas para provar essa hipótese.

### 3.3 Estimativas de impacto das cinzas na utilização energética de *T. vulgaris*

A Tabela 4 mostra a estimativas da composição das cinzas avaliadas na madeira de *T. vulgaris*. Nas últimas linhas há teores de componentes das cinzas encontrados para outras biomassas comerciais. De modo geral, os teores de óxido de alumínio e óxido de ferro foram particularmente altos, representando 37,02% e 15,76% da massa das cinzas, respectivamente. Já SiO<sub>2</sub> apresentou valores baixos (2,42%) em relação aos valores encontrados para as outras biomassas.

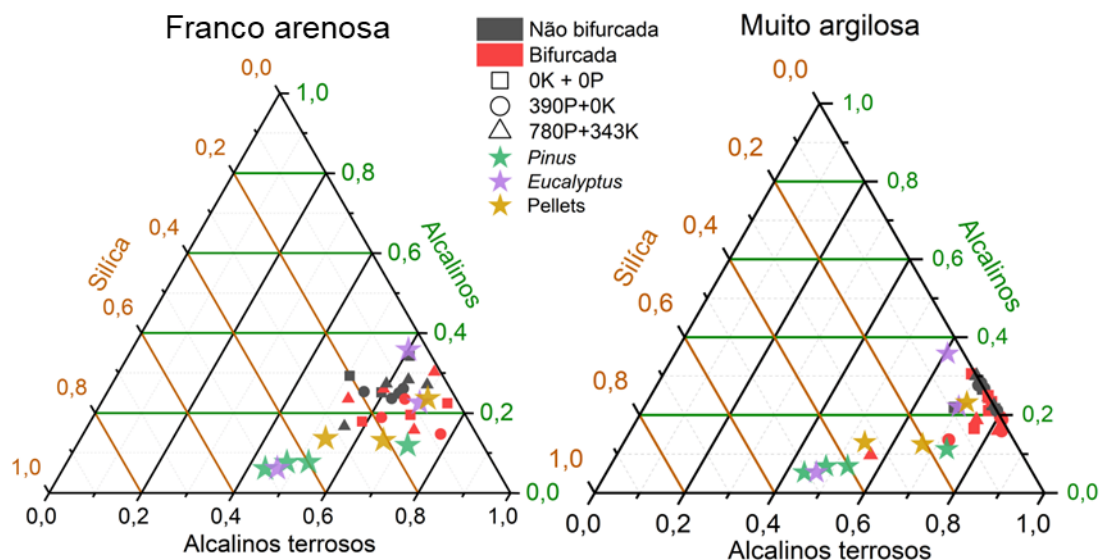
A Tabela 4 - Estimativas da composição das cinzas avaliadas na madeira de *T. vulgaris*.

T,	A,	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Mn	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>
Aren	OP+OK	36,64 (13,02)	14,64 (5,72)	20,28 (25,19)	0,00 (0,00)	3,43 (1,71)	0,74 (0,17)	7,90 (2,88)	1,24 (1,02)	3,57 (1,98)	0,16 (0,11)	11,39 (4,10)
	390P+0	30,38	16,14	27,38	0,00	3,11	0,62	6,83	1,73	3,80	0,11	9,90
Aren	K	(13,64)	(9,26)	(29,47)	(0,00)	(1,88)	(0,13)	(3,03)	(1,02)	(1,92)	(0,05)	(3,67)
	780P+3	35,94	15,78	18,93	0,00	3,52	0,67	7,43	2,72	3,66	0,14	11,22
Aren	40K	(11,42)	(4,82)	(23,09)	(0,00)	(1,98)	(0,16)	(2,68)	(1,37)	(2,22)	(0,05)	(3,59)
	<b>Média</b>	<b>34,32</b> <b>(±12,49)</b>	<b>15,52</b> <b>(6,60)</b>	<b>22,20</b> <b>(25,18)</b>	<b>0,00</b> <b>(0,00)</b>	<b>3,36</b> <b>(1,79)</b>	<b>0,68</b> <b>(0,16)</b>	<b>7,39</b> <b>(2,78)</b>	<b>1,90</b> <b>(1,26)</b>	<b>3,68</b> <b>(1,96)</b>	<b>0,14</b> <b>(0,07)</b>	<b>10,83</b> <b>(3,68)</b>
Argi	OP+OK	40,19 (3,14)	22,02 (2,85)	8,59 (3,92)	0,00 (0,00)	4,44 (1,84)	0,76 (0,08)	8,23 (1,07)	1,24 (1,34)	0,94 (1,43)	0,15 (0,02)	13,44 (1,31)
	390P+0	37,16	22,44	11,61	0,00	5,43	0,68	7,79	1,58	0,56	0,14	12,61
Argi	K	(7,52)	(5,46)	(14,24)	(0,00)	(1,13)	(0,13)	(2,10)	(1,11)	(1,23)	(0,04)	(3,00)
	780P+3	41,84	21,40	7,77	0,00	4,30	0,64	7,25	2,19	1,94	0,17	12,51
Argi	40K	(2,65)	(3,29)	(2,09)	(0,00)	(2,50)	(0,12)	(1,85)	(1,56)	(4,41)	(0,03)	(2,29)
	<b>Média</b>	<b>39,73</b> <b>(±5,12)</b>	<b>21,95</b> <b>(3,88)</b>	<b>9,32</b> <b>(8,40)</b>	<b>0,00</b> <b>(0,00)</b>	<b>4,73</b> <b>(1,90)</b>	<b>0,69</b> <b>(0,12)</b>	<b>7,76</b> <b>(1,70)</b>	<b>1,67</b> <b>(1,35)</b>	<b>1,15</b> <b>(2,71)</b>	<b>0,15</b> <b>(0,03)</b>	<b>12,85</b> <b>(2,25)</b>
*Pinus		7,64 (±4,62)	28,13 (14,68)	4,66 (1,33)	6,22 (0,90)	5,22 (3,85)	-	0,98 (0,30)	2,05 (1,23)	38,81 (20,06)	0,57 (0,44)	5,73 (8,25)
*Eucalyptus		5,45 (±6,33)	27,81 (17,79)	1,85 (1,76)	15,19 (13,01)	3,48 (0,34)	-	3,50 (2,79)	2,32 (2,22)	21,67 (29,24)	0,24 (0,27)	2,32 (1,88)
*Pellets de madeira		3,08 (±2,41)	43,17 (16,63)	2,35 (2,12)	13,11 (4,18)	6,42 (2,33)	-	1,49 (1,13)	4,65 (0,63)	19,53 (15,87)	0,12 (0,12)	4,83 (7,20)

T. é a textura do solo; A. é adubação; Aren é a textura franco arenosa; Arg. é a textura muito argilosa. Valores entre parênteses representam o desvio padrão. \*Fonte: (VASSILEV *et al.*, 2017). Fonte: Do autor (2024)

A forma como a composição das cinzas afeta a tendência a problemas nas caldeiras como incrustações, sinterização e escórias está relacionada a sua propensão em gerar compostos com baixo ou alto ponto de fusão. Enquanto óxidos de metais alcalinos (K<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>O) formam compostos com baixo ponto de fusão, SiO<sub>2</sub> e metais alcalinos terrosos (MgO e CaO) aumentam o ponto de fusão das cinzas (Boström *et al.*, 2012). Dessa forma, o ideal é que as cinzas tenham maiores teores de metais alcalinos terrosos e Si. A Figura 12 mostra a proporção entre estes compostos. Em média, o teor de alcalinos terrosos foi 3 vezes maior que o teor de alcalinos. Já para sílica, a proporção é de apenas 0,32. O teor médio deste óxido estimado nas cinzas foi maior no solo arenoso (3,68%) que no solo muito argiloso (1,15%).

Figura 12 - Proporção entre estes compostos alcalinos, alcalinos terrosos e SiO<sub>2</sub> estimados para a madeira de *T. vulgaris*.

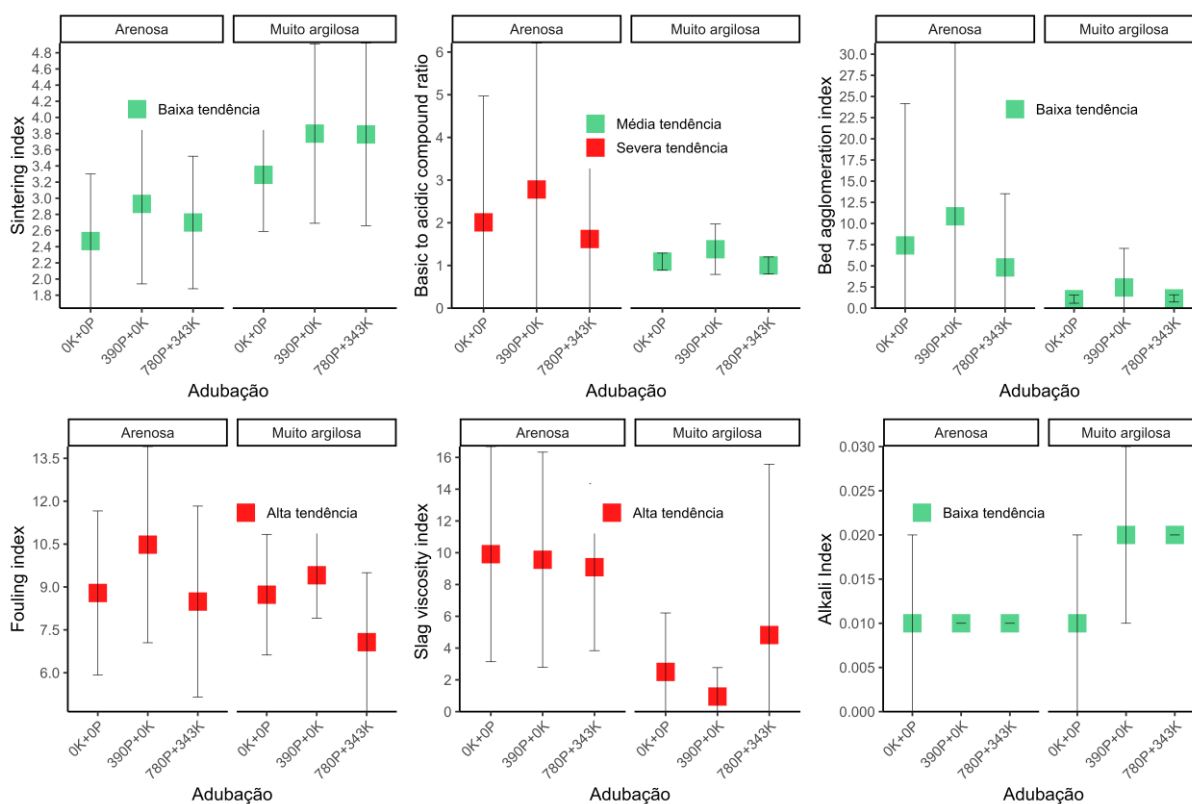


Fonte: Do autor (2024)

As proporções entre esses componentes na madeira de tachi foi diferente do encontrado para biomassas comerciais. Nessas biomassas os teores de sílica foram consideravelmente maiores, principalmente no solo argiloso. Além disso, os teores de alcalinos tiveram menores percentuais. No entanto, essas biomassas apresentaram menores valores de alcalinos terrosos. As proporções de alcalinos terrosos ainda são o dobro dos estimados para alcalinos e não devem causar problemas de sinterização (Santos *et al.*, 2023).

A Figura 13 mostra índices empíricos que estimam potenciais problemas associados a queima da madeira de *Tachigali vulgaris*. Estes índices baseiam-se na premissa de que diferentes proporções dos elementos nas cinzas afetam as reações químicas destes minerais durante a combustão da biomassa (BOSTRÖM *et al.*, 2012). É interessante destacar, no entanto, que outros fatores podem afetar o comportamento das cinzas, como o tipo de biomassa e temperatura da caldeira.

Figura 13 - Índices empíricos que estimam potenciais problemas associados a queima da madeira de *Tachigali vulgaris*.



Fonte: Do autor (2024)

Os índices mostram baixa tendência para a espécie *T. vulgaris* em formar sinterização devido à alta relação alcalinos terrosos/alcalinos avaliada pelo índice “Sintering index”. Os índices “basic to compound ratio”, “Fouling index” e “Slag viscosity index” revelam o mesmo problema nas cinzas da espécie: baixos valores de  $\text{SiO}_2$ , que implicariam em menor reatividade dos compostos presentes nas cinzas e formação de compostos de baixo ponto de fusão.

Apesar destes problemas, a ausência de K na madeira da espécie é a principal fator de minimização dos problemas causados nas caldeiras. Este elemento reage com Si e P formando baixos compostos estequiométricos com baixos pontos de fusão (Boström et al., 2012). Deste ponto de vista, entre os alcalinos, a presença de  $\text{Na}_2\text{O}$  na madeira é mais vantajosa que a presença de  $\text{K}_2\text{O}$ . Na tem menor reatividade que  $\text{K}_2\text{O}$ . “Alkali index” relaciona a soma do alcalinos, poder calorífico e teor de cinzas. A relação mostra baixa tendencia das cinzas de *Tachigali vulgaris* formarem escórias devido ao baixo teor de cinzas e metais alcalinos.

As grandes quantidades de Al devem aumentar a temperatura de fusão das cinzas evitando a formação de escórias e incrustações.(Boström et al., 2012; Santos et al., 2023)

#### 4 CONCLUSÃO

De maneira geral, os elementos com maiores teores foram Fe, Al e Ca. Os outros elementos seguiram a ordem decrescente: Na > S > Mg > Si > Cu > Zn > P > Mn > Ti e B. Houve altos teores de Fe e Al, provavelmente relacionadas às altas quantidades destes elementos nos solos da região amazônica. No entanto, a quantidade destes elementos no lenho não parece afetar a absorção dos nutrientes. Não foram detectados percentuais de K nas amostras, sugerindo a substituição deste elemento por Na em algumas funções metabólicas. A exportação de P foi baixa em todos os tratamentos menores gastos com estes fertilizantes.

A ausência de K<sub>2</sub>O e os altos teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> indicam um alto ponto de fusão das cinzas, reduzindo a tendência a potenciais problemas causados nas caldeiras. Recomenda-se o tratamento intermediário de superfosfato triplo para fertilização das florestas de tachi devido à baixa variação das propriedades da madeira neste tratamento.

#### REFERÊNCIAS

ANDRADE, L. R. M. *et al.* Al-hyperaccumulator Vochysiaceae from the Brazilian Cerrado store aluminum in their chloroplasts without apparent damage. **Environmental and Experimental Botany**, v. 70, n. 1, p. 37–42, jan. 2011.

BARIBAULT, T. W.; KOBE, R. K.; FINLEY, A. O. Tropical tree growth is correlated with soil phosphorus, potassium, and calcium, though not for legumes. **Ecological Monographs**, v. 82, n. 2, p. 189–203, maio 2012.

BAUTERS, M. *et al.* Tropical wood stores substantial amounts of nutrients, but we have limited understanding why. **Biotropica**, v. 54, n. 3, p. 596–606, maio 2022.

BENTANCOR, L. *et al.* Evaluation of the biomass production, energy yield and nutrient removal of *Eucalyptus dunnii* Maiden grown in short rotation coppice under two initial

planting densities and harvest systems. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 165–174, mar. 2019.

BERNARDI, A. C. DE C. *et al.* Analytical quality program of soil fertility laboratories that adopt embrapa methods in Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 33, n. 15–18, p. 2661–2672, nov. 2002.

BIJAY-SINGH; CRASWELL, E. Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: an increasingly pervasive global problem. **SN Applied Sciences**, v. 3, n. 4, p. 518, abr. 2021.

BOSTRÖM, D. *et al.* Ash Transformation Chemistry during Combustion of Biomass. **Energy & Fuels**, v. 26, n. 1, p. 85–93, jan. 2012.

BRUNNER, I.; SPERISEN, C. Aluminum exclusion and aluminum tolerance in woody plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, n. 1, p. 172–184, jun. 2013.

CHANTARA, S. *et al.* Emissions of pollutant gases, fine particulate matters and their significant tracers from biomass burning in an open-system combustion chamber. **Chemosphere**, v. 224, p. 407–416, jun. 2019.

CORNUT, I. *et al.* Potassium limitation of wood productivity: A review of elementary processes and ways forward to modelling illustrated by Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 494, p. 119275, ago. 2021.

COSTA JUNIOR, G. T. *et al.* Direct determination of mineral nutrients in soybean leaves under vivo conditions by portable X-ray fluorescence spectroscopy. **X-Ray Spectrometry**, v. 49, n. 2, p. 274–283, mar. 2020.

CROW, S. E. *et al.* Carbon balance implications of land use change from pasture to managed eucalyptus forest in Hawaii. **Carbon Management**, v. 7, n. 3–4, p. 171–181, jul. 2016.

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

FEBRERO, L. *et al.* A comparative study of fouling and bottom ash from woody biomass combustion in a fixed-bed small-scale boiler and evaluation of the analytical techniques used. **Sustainability (Switzerland)**, v. 7, n. 5, p. 5819–5837, maio 2015.

FERNÁNDEZ LLORENTE, M. J.; CARRASCO GARCÍA, J. E. Comparing methods for predicting the sintering of biomass ash in combustion. **Fuel**, v. 84, n. 14–15, p. 1893–1900, out. 2005.

GARCÍA-MARAVÉ, A.; POPOV, V.; ZAMORANO, M. A review of European standards for pellet quality. **Renewable Energy**, v. 36, n. 12, p. 3537–3540, dez. 2011.

IBÁ - BRAZILIAN TREE INDUSTRY. **IBÁ annual report 2022**. São Paulo Disponível em: <<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2019-final.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2023.

International Organization for Standardization. **ISO 17225-2:2021**. Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 2: Graded wood pellets. 2021.

LI, Q. H. *et al.* Study on ash fusion temperature using original and simulated biomass ashes. **Fuel Process Technol**, v. 107, p. 107–112, mar. 2013.

LIMA NETO, A. J. *et al.* Nutrient accumulation and nutritional efficiency in eucalyptus. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 16, p. 2421–2434, out. 2021.

LUAN, C.; YOU, C.; ZHANG, D. Composition and sintering characteristics of ashes from co-firing of coal and biomass in a laboratory-scale drop tube furnace. **Energy**, v. 69, p. 562–570, maio 2014.

LUGLI, L. F. *et al.* Multiple phosphorus acquisition strategies adopted by fine roots in low-fertility soils in Central Amazonia. **Plant and Soil**, v. 450, n. 1–2, p. 49–63, maio 2020.

MAGDZIARZ, A.; DALAI, A. K.; KOZIŃSKI, J. A. Chemical composition, character and reactivity of renewable fuel ashes. **Fuel**, v. 176, p. 135–145, jul. 2016.

MCLAREN, T. I.; GUPPY, C. N.; TIGHE, M. K. A Rapid and Nondestructive Plant Nutrient Analysis using Portable X-Ray Fluorescence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 4, p. 1446–1453, jul. 2012.

MERINO, A. *et al.* Nutrient exports under different harvesting regimes in fast-growing forest plantations in southern Europe. **Forest Ecology and Management**, v. 207, n. 3, p. 325–339, mar. 2005.

MILES, T. R. *et al.* **Alkali deposits found in biomass power plants: A preliminary investigation of their extent and nature. Volume 1**. Golden, CO: Disponível em: <<http://www.osti.gov/servlets/purl/251288-9ynoie/webviewable/>>.

PIROVANI, D. B. *et al.* Climate change impacts on the aptitude area of forest species. **Ecological Indicators**, v. 95, p. 405–416, dez. 2018.

PRONOBIS, M. Evaluation of the influence of biomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlations. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, n. 4, p. 375–383, abr. 2005.

**R Core Team. R: A language and environment for statistical computing**. ViennaR Foundation for Statistical Computing, 2023.

RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. *et al.* Exploring the factors affecting carbon and nutrient concentrations in tree biomass components in natural forests, forest plantations and short rotation forestry. **Forest Ecosystems**, v. 5, n. 1, p. 35, 5 dez. 2018.

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, n. 1, p. 114–128, set. 2023.

SANTOS, U. M.; GONÇALVES, J. F. C.; FELDPAUSCH, T. R. Growth, leaf nutrient concentration and photosynthetic nutrient use efficiency in tropical tree species planted in degraded areas in central Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 226, n. 1–3, p. 299–309, maio 2006.

SETTE, C. R. *et al.* Source-driven remobilizations of nutrients within stem wood in Eucalyptus grandis plantations. **Trees**, v. 27, n. 4, p. 827–839, ago. 2013.

SILVA, M. O. S. *et al.* Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachibranco trees planted at different spacings for bioenergy purposes. **Journal of Forestry Research**, v. 32, n. 1, p. 211–224, fev. 2021.

SILVA, R. M. L. *et al.* Fertilization response, light use, and growth efficiency in Eucalyptus plantations across soil and climate gradients in Brazil. **Forests**, v. 7, n. 6, maio 2016.

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**, v. 34, n. 5, p. 1289-1305, abr. 2023.

SOUZA, E. S. *et al.* Physical, chemical, and mineralogical attributes of a representative group of soils from the eastern Amazon region in Brazil. **SOIL**, v. 4, n. 3, p. 195–212, set. 2018.

TEIXEIRA, R. A. C. *et al.* Dynamics of experimental plantations of Tachigali vulgaris in response to fertilization and soil texture. **New Forests**, set. 2023.

VAN DER WERFF, H. A Synopsis of the Genus Tachigali (Leguminosae: Caesalpinioideae) in Northern South America. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, v. 95, n. 4, p. 618–661, dez. 2008.

VASSILEV, S. V. *et al.* Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion. **Fuel**, v. 208, p. 377–409, nov. 2017.

WU, H. *et al.* Soil Phosphorus Bioavailability and Recycling Increased with Stand Age in Chinese Fir Plantations. **Ecosystems**, v. 23, n. 5, p. 973–988, ago. 2020.

ZHANG, P. *et al.* Above-Ground Biomass and Nutrient Accumulation in Ten Eucalyptus Clones in Leizhou Peninsula, Southern China. **Forests**, v. 13, n. 4, p. 530, 29 mar. 2022.

## CONCLUSÕES GERAIS

*Tachigali vulgaris* é uma espécie promissora para uso energético. Os resultados apresentados em ambos os capítulos mostram que a espécie tem qualidade da madeira semelhante ao encontrado em espécies comerciais e pode ser utilizada para conversão térmica. No entanto, as altas variações do seu crescimento não devem ser negligenciadas, pois afetam

diretamente a sua produtividade energética. O nível de adubação de 390P parece ser adequado, pois apresentou menor variação do crescimento e propriedades da madeira.

### **LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS**

Neste estudo, investigamos os efeitos da adubação, textura do solo e bifurcação da espécie *Tachigali vulgaris* aos 11 anos de idade. Uma área promissora para futuras pesquisas seria examinar como esses parâmetros influenciam a qualidade da madeira em árvores mais jovens da mesma espécie. Além disso, é importante explorar o impacto das adubações nitrogenadas. A compreensão da influência da simbiose entre a espécie e bactérias do gênero *Rhizobium* na resistência à escassez de nutrientes ainda não foi totalmente esclarecida para este tipo de espécie. Portanto, é uma área que necessita de estudos para melhorar compreensão da dinâmica dos tratamentos silviculturais, crescimento e qualidade da madeira para a espécie.