

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**EQUAÇÕES VOLUMÉTRICAS PARA ÁRVORES BIFURCADAS E NÃO  
BIFURCADAS DE *Tachigali vulgaris* EM UM TESTE DE ADUBAÇÃO**

**IZADORA GONÇALVES NAVES**

**MONTE CARMELO  
2024**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**IZADORA GONÇALVES NAVES**

**EQUAÇÕES VOLUMÉTRICAS PARA ÁRVORES BIFURCADAS E NÃO  
BIFURCADAS DE *Tachigali vulgaris* EM UM TESTE DE ADUBAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Florestal, Campus  
Monte Carmelo, da Universidade Federal de  
Uberlândia, como parte dos requisitos  
necessários para obtenção do grau de Bacharel  
em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Alvaro Augusto Vieira  
Soares

Homologado pela coordenação do curso de  
Engenharia Florestal em \_\_/\_\_/\_\_\_\_

**MONTE CARMELO  
2024**


**IZADORA GONÇALVES NAVES**

**EQUAÇÕES VOLUMÉTRICAS PARA ÁRVORES BIFURCADAS E NÃO  
BIFURCADAS DE *Tachigali vulgaris* EM UM TESTE DE ADUBAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Florestal, Campus  
Monte Carmelo, da Universidade Federal de  
Uberlândia, como parte dos requisitos  
necessários para obtenção do grau de Bacharel  
em Engenharia Florestal.


Monte Carmelo, 21 de novembro de 2024.

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente  
 **ALVARO AUGUSTO VIEIRA SOARES**  
Data: 13/12/2024 14:52:33-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>


---

**Prof. Dr. Alvaro Augusto Vieira Soares**  
Orientador

Documento assinado digitalmente  
 **RODRIGO OTAVIO VEIGA DE MIRANDA**  
Data: 13/12/2024 11:04:52-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

**Prof. Dr. Rodrigo Otávio Veiga de Miranda**  
Membro da Banca

Documento assinado digitalmente  
 **CHARLENE MORO STEFANEL**  
Data: 13/12/2024 14:32:23-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Charlene Moro Stefanel**  
Membro da Banca

**MONTE CARMELO**  
**2024**

Dedico para aqueles que, em vida, não puderam presenciar a realização deste sonho, mas que sei que olham e zelam por mim em outro plano, em especial, à minha avó Diná.



## AGRADECIMENTOS

À minha mãe, que me ensinou a juntar sílabas, a contar nos dedos e a enxergar o mundo através das cores. Ao meu pai, que me mostrou como formar frases, a resolver pequenas equações e a encontrar sentido nas palavras. Ao meu irmão, que trouxe cor e alegria aos meus dias, mostrando que cada momento compartilhado é um presente. A vocês, devo não só o conhecimento, mas também o exemplo de persistência, coragem e sacrifício.

Se hoje chego ao fim deste grande capítulo da minha vida, é porque, em muitos momentos, vocês colocaram de lado seus próprios sonhos e ambições para que eu pudesse ter a chance de construir os meus. Foram noites sem descanso, preocupações silenciosas e um amor que se traduziu em cada pequeno gesto, em cada incentivo e apoio. Vocês me deram mais do que apenas conhecimento; me deram a base para acreditar em mim mesma. A vocês, minha eterna gratidão e amor.

Como falar em crença sem citar aquela que mais me ensinou a ter fé, não apenas em Deus, mas nas pessoas e no mundo? De todo o amor que eu tenho, metade foi você quem me deu. A você, minha avó, minha eterna saudade, que tanto me inspirou e me guiou. Cuidar de você em vida foi meu maior propósito, e agora, carrego sua bênção e seu amor em cada passo que dou. Sei que, onde quer que eu esteja, você estará me abençoando e me guiando. Nos encontraremos sempre na fé.

À minha namorada, minha gratidão é infinita por todas as vezes que enxugou minhas lágrimas, me deu força e esteve ao meu lado em cada desafio. Tenha certeza, que você foi um dos meus maiores pilares para chegar até aqui. Nossa jornada juntas está apenas começando e sei que sem seu apoio e amor, eu dificilmente teria encontrado o meu propósito. Obrigado por ser minha parceira, minha motivação e o meu lar em todos os momentos.

Ao Thiago, à Rayana e a Lauane, meu muito obrigada por nunca soltarem minha mão, pelas horas de estudo, pelas discussões de trabalho, noites mal dormidas e pelas incontáveis vezes que ouviram minhas lamúrias. Desejo um futuro brilhante para cada um e sei que o mundo ganhará excelentes engenheiros. Levarei vocês para sempre no meu coração.

Aos meus professores, minha eterna gratidão por toda a paciência, dedicação e cuidado. Meu esforço profissional é inspirado em vocês. Se um dia eu me tornar metade dos profissionais que são, já estarei realizada, pois vocês são meus maiores exemplos.

E, por fim, agradeço a todos que cruzaram meu caminho nesta jornada acadêmica. Cada um de vocês contribuiu de forma especial e sou grata por todas as trocas e aprendizados que me trouxeram até aqui.

“Faça épico”  
(Kim Holden)

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localização dos plantios experimentais de <i>Tachigali vulgaris</i> , Monte Dourado, distrito do município de Almeirim, Pará.....	16
<b>Figura 2.</b> Exemplo do arranjo experimental das áreas dos plantios experimentais de <i>T. vulgaris</i> no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, Pará.....	18
<b>Figura 2.</b> Relação entre diâmetro à altura do peito ( $d_{ap}$ ) e diâmetro equivalente ( $d_{eq}$ ) com a altura total.....	22
<b>Figura 3.</b> Gráfico da relação entre diâmetro à altura do peito ( $d_{ap}$ ) e o diâmetro equivalente ( $d_{eq}$ ) com o volume observado. ....	23
<b>Figura 4.</b> Gráfico da relação entre a altura total com o volume observado. ....	23
<b>Figura 5.</b> Gráfico da dispersão dos resíduos para os volumes estimados dos modelos ajustados a por de fuste. ....	26
<b>Figura 6.</b> Gráfico da dispersão dos resíduos para os volumes estimados dos modelos ajustados por árvore. ....	27
<b>Figura 7.</b> Comparação entre volume estimado por fuste e volume observado .....	28
<b>Figura 8.</b> Comparação entre volume estimado por árvore e volume observado .....	29

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Adubos e dosagem ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) nos diferentes tratamentos aplicados na área experimental.....	17
<b>Tabela 2.</b> Modelos testados para estimar o volume por fuste e por árvores de povoamentos puros de <i>Tachigali vulgaris</i> em Monte Dourado, distrito do município de Almeirim, Pará ...	19
<b>Tabela 3.</b> Estatísticas descritivas de $d_{ap}$ , $d_{eq}$ , altura total e volume nos tratamentos do povoamento experimental de <i>Tachigali vulgaris</i> no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, Pará. ....	22
<b>Tabela 4.</b> Resultados dos modelos volumétricos ajustados por fuste e por árvore, para o povoamento experimental de <i>Tachigali vulgaris</i> no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, Pará. ....	24
<b>Tabela 5.</b> Estatísticas de qualidade da acurácia dos ajustes por fuste e por árvore, para o povoamento experimental de <i>Tachigali vulgaris</i> no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, Pará. ....	31

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$d_{ap}$	diâmetro à altura do peito (cm)
$d_{eq}$	diâmetro equivalente (cm)
$\varepsilon$	erro aleatório
$h$	altura total da árvore (m)
$\ln$	logaritmo neperiano
MEA	média dos erros absolutos
$n$	número de observações
$p$	número de parâmetros
$r_{Y\hat{Y}}$	coeficiente de correlação de Pearson entre as estimativas e valores observados
$R^2$	coeficiente de determinação
$R^2_{ajus}$	coeficiente de determinação ajustado
RQEM(%)	raiz quadrada do erro quadrático médio percentual
SQRes	soma de quadrados dos resíduos
SQTotal	soma de quadrados total
$S_{yx}(\%)$	erro padrão da estimativa percentual
$v$	volume comercial de madeira com casca (m <sup>3</sup> )
$V_{est}$	valor estimado de volume de madeira comercial com casca
$V_{obs}$	valor observado de volume de madeira comercial com casca
$\overline{V_{obs}}$	média aritmética dos valores estimados para volume de madeira comercial com casca
$\overline{V_{est}}$	média aritmética dos valores observados para volume de madeira comercial com casca
$\beta_i$	coeficientes das equações

## RESUMO

Pesquisas com a espécie arbórea *Tachigali vulgaris*, popularmente conhecido como tachi-branco ou carvoeiro, têm se intensificado nos últimos anos, especialmente para fomentar seu uso para energia da biomassa. Este trabalho teve o objetivo de desenvolver equações volumétricas para árvores de tachi-branco, de fuste único e bifurcadas, e testar se a adubação inicial afeta o desenvolvimento de modelos volumétricos. Os dados são provenientes de dois testes de adubação de plantios puros de tachi-branco instalados município de Almeirim – PA. Os testes foram instalados em dois tipos de solo, arenoso e argiloso, em delineamento em blocos casualizados com quatro blocos e 12 tratamentos, combinando quatro níveis de fósforo e três de potássio. Foram ajustados e comparados modelos volumétricos comumente utilizados na literatura usando duas alternativas: usando como preditor, além da altura total da árvore, o diâmetro a 1,3 m do solo ( $d_{ap}$ ) para gerar estimativas de volume para cada fuste de árvores bifurcadas ou o diâmetro equivalente ( $d_{eq}$ ) para gerar estimativas por árvore mesmo no caso de árvores bifurcadas. Ao modelo mais acurado para ambas alternativas foram acrescentados efeitos da adubação e testada sua significância estatística. Os modelos de Stoate e Naslund, que se igualaram estruturalmente após remoção de termos não significativos, foram considerados os mais acurados. As estimativas dos modelo por fuste foram mais acuradas inclusive quando, para uma mesma árvore, comparou-se a soma das estimativas por fuste contra a estimava por árvore. Não houve efeito da adubação nos modelos.

**Palavras-chaves:** Silvicultura de espécies nativas, modelos biométricos, volumetria.

## ABSTRACT

Research on the tree species *Tachigali vulgaris*, popularly known as tachi-branco or carvoeiro, has been intensified in recent years, particularly to promote its use for biomass energy. This study aimed to develop volumetric equations for *T. vulgaris* trees, both single-stemmed and forked, and to test whether initial fertilization affects the development of volumetric equations. The data came from two fertilization tests of pure tachi-branco plantations established in the municipality of Almeirim – state of Pará, Brazil. The tests were set up on two soil types, sandy and clayey, in a randomized block design with four blocks and 12 treatments, combining four levels of phosphorus and three of potassium. Volumetric models commonly used in the literature were fit and compared using two alternatives: using, in addition to the total height of the tree, the diameter at 1.3 m above the ground (dbh) as a predictor to generate volume estimates for each stem of forked trees, or using the equivalent diameter ( $d_{eq}$ ) to generate estimates per tree, even for bifurcated trees. After selecting the most accurate volumetric model for both alternatives, effects of fertilization were added, the models were refit, and its statistical significance was tested. The Stoate and Naslund models, which were structurally equivalent after removing non-significant terms, were considered the most accurate. The stem-based model (dbh as predictor) estimates were more accurate, even when comparing the sum of stem estimates for the same tree with the estimate by tree of the tree-based model ( $d_{eq}$  as predictor). There was no effect of fertilization on the models.

**Keywords:** Amazon native species silviculture, biometric models, volumetry.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVO .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Objetivo geral .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 Objetivos específicos .....</b>	<b>15</b>
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>15</b>
<b>4.1 Caracterização da área .....</b>	<b>15</b>
<b>4.2 Medições de variáveis de interesse.....</b>	<b>19</b>
<b>4.3 Ajuste de equações .....</b>	<b>19</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>21</b>
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>31</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>32</b>



# 1 INTRODUÇÃO

A fim de suprir a demanda de madeira na década de 1960, o Governo Federal incentivou políticas de desenvolvimento florestal para a produção em larga escala, por meio dos incentivos fiscais, o que resultou na expansão de áreas de cultivos florestais, principalmente de espécies como *Eucalyptus* e *Pinus* (Reis et al., 2021). Atualmente, com cerca de mais de 10 milhões de hectares de área plantada, o setor florestal no Brasil é um dos mais relevantes para a economia do país, devido ao seu uso em diversos setores da indústria, tendo destaque os segmentos de celulose e papel, siderurgia e carvão vegetal, painéis de madeira, dentre outros (Ibá, 2024).

Dos principais produtos florestais, a lenha foi a primeira a ser utilizada como fonte de energia na história da humanidade. Tendo em vista que é uma fonte renovável, tecnologias e estudos sempre surgem para o aprimoramento e maior índice do aproveitamento da madeira (Gonzaga, 2017). Tais pesquisas levaram a busca de espécies nativas que possam ter as mesmas propriedades que o gênero *Eucalyptus* o qual é, atualmente, a espécie mais utilizada para este fim no Brasil. Neste contexto, estudos vêm demonstrando que o tachi-branco (*Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima) possui grande potencial e adequabilidade que satisfazem a produção de carvão vegetal e produção de energia no país (Orellana, 2018).

Também conhecido como “carvoeiro”, a madeira do tachi-branco foi tradicionalmente muito utilizada para lenha por comunidades tradicionais e sua madeira tem elevado potencial para utilização para produção de carvão, pois apresenta características físicas e químicas que satisfazem a produção do biorredutor devido ao seu alto teor de carbono fixo, materiais voláteis e baixo teor de cinzas, quando comparada com a madeira de *Eucalyptus* (Brienza, 2022). Silva (2018), destaca que o tachi-branco apresentou, em seu estudo, densidade básica média de  $0,633 \text{ g cm}^{-3}$  e poder calorífico superior médio de  $4.390 \text{ kcal kg}^{-1}$ , valores considerados relevantes em comparação com espécies de *Eucalyptus* citando faixas de  $0,500$  a  $0,720 \text{ g cm}^{-3}$  e  $4.500$  a  $4.700 \text{ kcal kg}^{-1}$  a depender da espécie.

O *Tachigali vulgaris* ocorre naturalmente em todo o país, com predominância na região norte do país e expandido para os países que fazem fronteira com a região amazônica, tendo preferência por se desenvolver em solos arenosos e de baixa fertilidade. A espécie é considerada rústica adaptando-se a diversas condições edafoclimáticas e apta para o plantio em áreas de recuperação (Brienza, 2022).

Na literatura há registros de que o primeiro plantio experimental de tachi-branco ocorreu no final da década de 1980 na região norte do país, o qual apresentou, sobrevivência e crescimento com potencialidade para silvicultura (Carvalho-Filho e Marques, 1979 apud Brienza, 2022).

Entretanto, plantios desta espécie ainda são recentes quando comparados a outras espécies utilizadas em plantios comerciais, o que a torna um potencial objeto de estudo.

Moraes (2022) demonstrou que das uma das características morfológicas indesejáveis da espécie para fins comerciais é a bifurcação do seu tronco, visto que pode comprometer a colheita, diminuir fatores físicos da madeira (como a densidade,) e atrapalhar a logística no processamento da madeira nos fornos de carbonização. A bifurcação do tronco se dá pela grande variabilidade ambiental e genética da espécie, sendo, atualmente um dos objetivos em estudos de melhoramento genético (Arriel et al., 2022).

Em florestas comerciais, o acompanhamento da dinâmica da população é imprescindível para que haja o melhor manejo. E para que isto ocorra, é necessário adquirir informações do desenvolvimento do plantio a partir das medições dendrométricas, que possuem como finalidade avaliar tratamentos silviculturais e estimativas de produção do povoamento (Koury, 2019).

O estoque de madeira presente e futuro é uma informação imprescindível para o planejamento da produção e comumente tem como base a estimação de do volume de árvores individuais por meio de equações volumétricas (Romaniuk, 2015). Uma equação de volume deve ser a mais acurada possível, de forma a garantir estimativas confiáveis que representam a base para várias etapas do planejamento florestal (Cardoso, 2022).

Modelos volumétricos, que relacionam variáveis como o diâmetro à altura do peito (*dap*) ou o diâmetro equivalente (*d<sub>eq</sub>*), permitem estimar com maior precisão o volume de madeira disponível, seja para fins comerciais, ecológicos ou de conservação (Teixeira et al., 2021). A escolha do modelo mais adequado para representar o volume de fustes e árvores é uma etapa determinante, pois impacta diretamente a precisão das estimativas e a eficiência do manejo florestal (Ribeiro et al., 2014).

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo geral**

Desenvolver equações volumétricas para um teste de adubação em plantio de *Tachigali vulgaris*.

## 2.2 Objetivos específicos

- Ajustar equações de simples e dupla entrada com o volume comercial de madeira por de árvore.
- Ajustar equações de simples e dupla entrada com o volume comercial de madeira por de fuste para o caso de árvores bifurcadas.
- Avaliar se a adubação de plantio tem efeito sobre a variável resposta dos modelos.
- Comparar a acurácia destas duas alternativas de ajuste.

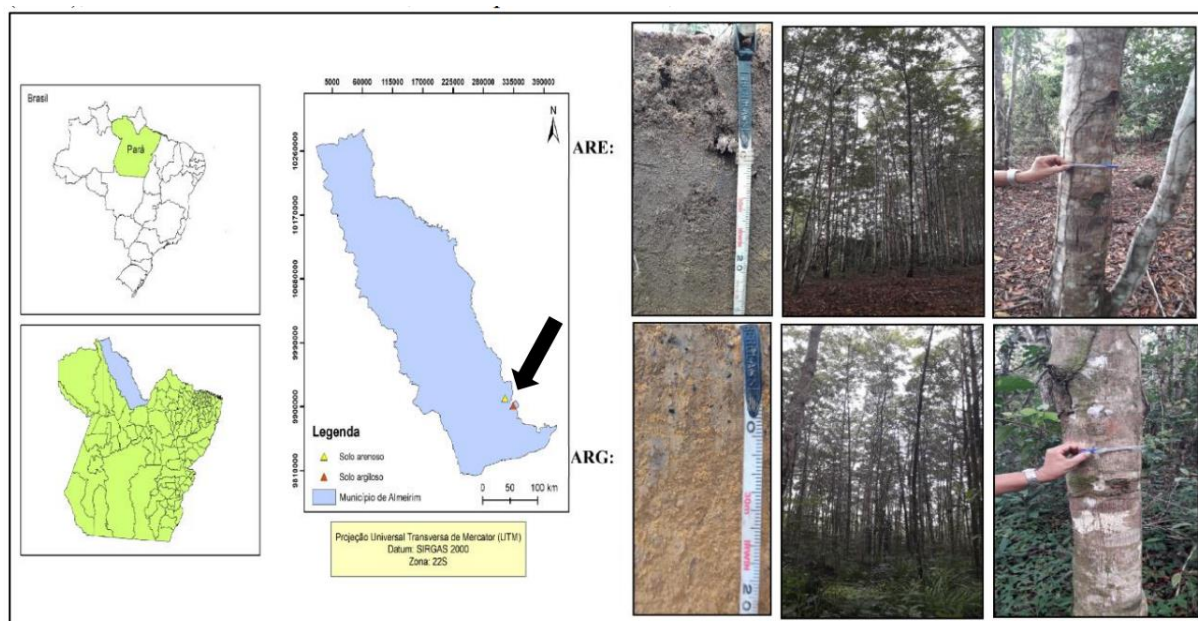
## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Caracterização da área

O estudo foi desenvolvido em duas áreas experimentais conduzidas pela empresa Jari Celulose em parceria com a Embrapa Amazônia Oriental, localizadas na região do Baixo Amazonas, em Monte Dourado, distrito do município de Almeirim, Pará.

Nestas áreas, foram plantadas mudas de *Tachigali vulgaris*, com espaçamento de 3,0 m × 2,0 m, o que totaliza 1.667 árvores/ha. As mudas foram provenientes de sementes coletadas de matrizes oriundas de floresta nativa dos municípios de Santarém, Belterra e Almeirim, estado do Pará.

Cada uma das áreas experimentais cobriu 1,60 ha. Uma delas localiza-se sobre latossolo amarelo de textura média arenosa, está a uma altitude de 135 m, com coordenadas geográficas centrais de 0°47'17,13" S e 52°37'8,32" O. A outra área possui solo classificado como latossolo amarelo de textura argilosa, está a uma altitude de 110 m, com coordenadas geográficas centrais de 0°53'29,30" S e 52°29'15,09" O. A distância em linha reta entre as duas áreas é cerca de 22 km (Figura 1).



**Figura 1.** Localização dos plantios experimentais de *Tachigali vulgaris*, Monte Dourado, distrito do município de Almeirim, Pará  
**Fonte: Teixeira (2021).**

De acordo com a classificação climática de Koppen-Geiger, a região é classificada como Am com características de Af e Aw, o regime pluviométrico é caracterizado por uma curta estação seca que ocorre nos meses de agosto a dezembro e nos meses de janeiro a julho ocorre a estação chuvosa. A precipitação média anual varia em torno de 1.970 a 2.300 mm, a temperatura média varia de 22,4 a 27,2 °C e umidade relativa média anual de 54% (Demolinari et al., 2007; Castro et al., 2018).

A área em que o experimento foi instalado era ocupada anteriormente por *Eucalyptus sp.*, tendo sido implantado no ano de 2010. O experimento foi implantado em delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial com quatro blocos, cujos tratamentos são 4 níveis de fósforo (P) e 3 níveis de potássio (K) combinados entre si, totalizando 12 tratamentos e 48 parcelas em cada área experimental (Tabela 1).

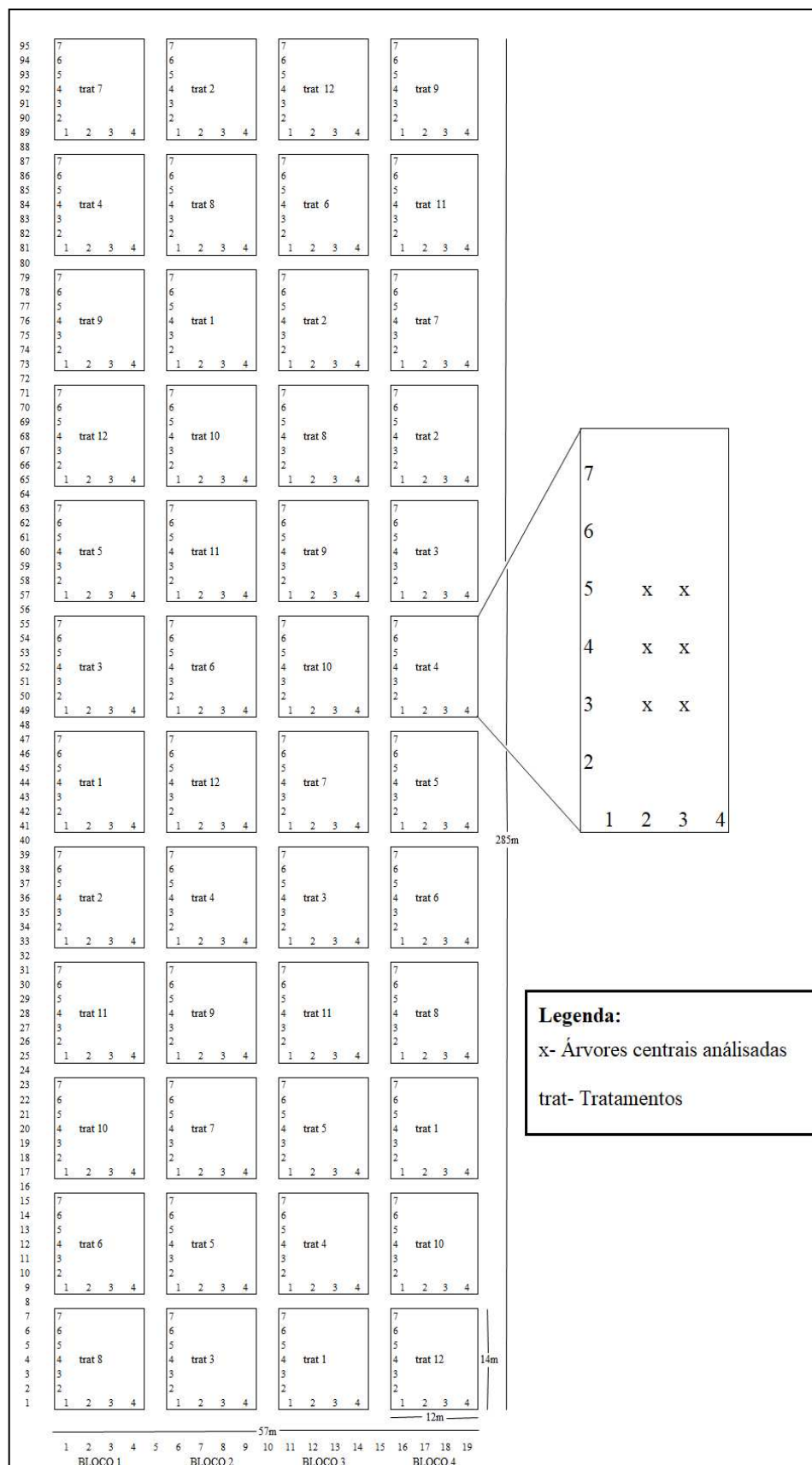
**Tabela 1.** Adubos e dosagem (kg.ha<sup>-1</sup>) nos diferentes tratamentos aplicados na área experimental

Tratamentos	Siglas	Nitrogênio		Fósforo		Potássio			
		Sulfato de Amônio (kg ha <sup>-1</sup> )	N (kg ha <sup>-1</sup> )	Superfosfato Triplo (kg ha <sup>-1</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )	Cloreto de Potássio (kg ha <sup>-1</sup> )		K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> )	
		20 Dias após o plantio		Durante o plantio, no fundo da cova		20 dias após o plantio	90 dias após o plantio	Total	Total
1	0-P + 0-K	100	21	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>	0
2	0-P + 172-K	100	21	<b>0</b>	0	69	103	172	100
3	0-P + 343-K	100	21	<b>0</b>	0	137	206	343	199
4	195-P + 0-K	100	21	<b>195</b>	80	0	0	0	0
5	195-P + 172-K	100	21	<b>195</b>	80	69	103	172	100
6	195-P + 343-K	100	21	<b>195</b>	80	137	206	343	199
7	390-P + 0-K	100	21	<b>390</b>	160	0	0	0	0
8	390-P + 172-K	100	21	<b>390</b>	160	69	103	172	100
9	390-P + 343-K	100	21	<b>390</b>	160	137	206	343	199
10	780-P + 0-K	100	21	<b>780</b>	320	0	0	0	0
11	780-P + 172-K	100	21	<b>780</b>	320	69	103	172	100
12	780-P + 343-K	100	21	<b>780</b>	320	137	206	343	199

Siglas – Referente à dose do fertilizante.

Fonte: (Teixeira, 2021).

As parcelas foram constituídas por quatro linhas com sete plantas cada, totalizando uma área de 168 m<sup>2</sup> (12 m × 14 m) com 28 plantas, das quais, apenas as seis árvores centrais foram medidas e o restante considerado bordadura (figura 2).



**Figura 2.** Exemplo do arranjo experimental das áreas dos plantios experimentais de *T. vulgaris* no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, Pará.

**Fonte:** Teixeira (2021).

## 4.2 Medições de variáveis de interesse

Foram cubadas 16 árvores das 4 parcelas experimentais do tratamento de menor intensidade de adubação (Tratamento 1), 15 árvores das 4 parcelas experimentais intensidade intermediária de adubação (Tratamento 7) e 15 árvores das 4 parcelas experimentais máxima intensidade de adubação (Tratamento 12), todas aos 11 anos de idade. Esta metodologia foi aplicada para permitir a análise do efeito da adubação na volumetria. Portanto, 46 árvores foram cubadas na totalidade.

A cubagem foi realizada com a árvore abatida. Foram mensuradas as circunferências com o auxílio de uma fita métrica ao longo do fuste às alturas de: corte, 0,7 m; 1,3 m; 2,0 m e a partir deste ponto, seguiu-se a cada 2,00 m até a altura comercial, ou seja, onde se detectou o diâmetro mínimo de 4 cm. A cada ponto da medição, também foram coletadas as espessuras da casca com o auxílio de um paquímetro. Utilizando a fórmula de Smalian, foram calculados os volumes por seção e com a soma das seções até a altura comercial obteve-se o volume comercial do fuste, com e sem casca. Para árvores bifurcadas, o volume comercial da árvore foi obtido pela soma dos volumes comerciais dos fustes.

Antes dos ajustes, foram verificados possíveis *outliers* nas variáveis a serem utilizadas. Dessa forma, os ajustes dos modelos foram realizados com base nos dados de 46 árvores do povoamento das quais 50% das árvores cubadas eram bifurcadas, enquanto os outros 50% apresentavam apenas um fuste.

## 4.3 Ajuste de equações

A partir dos dados do volume obtido da cubagem foram ajustados modelos volumétricos habitualmente utilizados na literatura. Foram testados modelos de simples entrada (Brenac e Husch) e de dupla entrada (Spurr, Schumacher e Hall logaritmizado, Stoate e Naslund). Estes modelos são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Modelos testados para estimar o volume por fuste e por árvores de povoamentos puros de *Tachigali vulgaris* em Monte Dourado, distrito do município de Almeirim, Pará

<b>Categoria</b>	<b>Autor</b>	<b>Modelo</b>
Simples Entrada	Brenac	$\text{Ln}(v) = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(dap) + \beta_2(1/dap) + \varepsilon$
	Husch	$\text{Ln}(v) = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(dap) + \varepsilon$
Dupla	Spurr	$\text{Ln}(v) = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(dap^2 h) + \varepsilon$

<b>Categoria</b>	<b>Autor</b>	<b>Modelo</b>
Entrada	Schumacher e Hall logaritmizado	$\text{Ln}(v) = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(dap) + \beta_2 \text{Ln}(h) + \varepsilon$
	Stoate	$v = \beta_0 + \beta_1 dap^2 + \beta_2 dap^2 h + \beta_3 h + \varepsilon$
	Naslund	$v = \beta_0 + \beta_1 dap + \beta_2 dap^2 + \beta_3 dap h + \beta_4 dap^2 h + \beta_5 h + \varepsilon$

Em que:  $v$  = volume ( $\text{m}^3$ );  $dap$  = diâmetro à altura do peito ( $dap$ , em cm) para ajuste por fuste ou diâmetro equivalente ( $d_{eq}$ , em cm) para ajuste por árvore;  $h$  = altura total da árvore (m);  $\text{Ln}$  = logaritmo neperiano;  $\beta_i$  = coeficientes a serem estimados;  $\varepsilon$  = erro aleatório. Fonte: Scolforo (2005) apud Ramos et al. (2021).

As formas dos modelos acima especificadas foram ajustadas para a estimação do volume tanto por árvore quanto por fuste – para o caso de árvores bifurcadas. No ajuste para estimação do volume por árvore o  $dap$  foi substituído pelo diâmetro equivalente ( $d_{eq}$ ), e  $h$  é dado pela altura da bifurcação de maior altura.

Sendo o diâmetro equivalente dado ( $d_{eq}$ ) por:

$$d_{eq} = \sqrt{\sum_{i=1}^n dap_i^2}$$

Em que:  $dap_i$ : diâmetro a 1,30 m do solo do  $i$ -ésimo fuste,  $n$ : número de fustes considerados

Para o ajuste, foi utilizado o método dos mínimos quadrados ordinários. A significância do ajuste foi avaliada pelo teste F e a significância individual dos coeficientes foi avaliada pelo teste “t” e ambos considerando uma significância de 5%. Modelos cujos parâmetros não apresentaram significância estatística ( $p > 0,05$ ) foram progressivamente ajustados, removendo as interações entre as variáveis e seguindo por variáveis menos significativas, com o objetivo de otimizar a precisão das estimativas sem comprometer a acurácia dos modelos. Estas receberam o nome do seu autor do modelo original + “modificado”.

A fim de se comparar os modelos, foram utilizadas as seguintes estatísticas de qualidade: coeficiente de determinação ajustado  $R^2_{aj}$ , erro padrão da estimativa relativo  $S_{yx}(\%)$  e média dos erros absolutos (MEA) e coeficiente de correlação de Pearson ( $r_{Y\hat{Y}}$ ). Adicionalmente, foi avaliada a dispersão dos resíduos relativos em função das estimativas.

As estatísticas foram calculadas a partir das expressões:

$$R^2_{aj} = 1 - \left( \frac{(n-1)}{(n-p)} \right) \left( \frac{SQRes}{SQTotal} \right)$$

$$S_{yx}(\%) = 100 \left( \frac{\sqrt{\frac{(V_{obs} - V_{est})^2}{n-p}}}{Vc\ cc} \right)$$

$$r_{Y\hat{Y}} = \left( \frac{n(\sum(V_{obs} * V_{est})) - (\sum V_{obs})(\sum V_{est})}{\sqrt{[(n(\sum V_{obs}^2) - (\sum V_{obs})^2)][(n(\sum V_{est}^2) - (\sum V_{est})^2)]}} \right)$$

$$MEA: \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |V_{est} - V_{obs}|$$



$$\text{resíduo (\%)}: \frac{V_{obs} - V_{est}}{V_{obs}} * 100$$

Em que: n = número de observações; p = número de parâmetros do modelo; SQRes = soma de quadrados dos resíduos; SQTotal = soma de quadrados total; V obs = valores observados de volume; V est = valores estimados de volume;  $\overline{V_{obs}}$  = média aritmética dos valores observados para volume comercial com casca;  $\overline{V_{est}}$  = média aritmética dos valores estimados para volume comercial com casca.

Selecionado o modelo com as melhores estatísticas de qualidade de ajuste, avaliou-se o efeito da adubação na modelagem do volume através da adição de variáveis dummy para os níveis de adubação a cada coeficiente dos modelos selecionados. A significância dos efeitos da adubação foi avaliada pelo teste F, a 5% de significância, comparando modelos aninhados em que o modelo com os efeitos da adubação foi o modelo completo comparado com o modelo sem o efeito da adubação como modelo reduzido. Este procedimento foi feito para ambas as alternativas de modelagem (i.e. por árvore e por fuste).

Por fim, para comparar alternativas de ajuste entre si foi realizada a comparação de estatísticas de qualidade para as estimativas do volume por árvore. Assim, para o modelo em nível de árvore, as estimativas são geradas diretamente pelo modelo, enquanto, para o modelo em nível de fuste, a estimativa por árvore é obtida pela soma das estimativas do modelo em nível de fuste para cada árvore. As alternativas de modelagem foram comparadas pelas estatísticas RQME(%),  $r_{Y\hat{Y}}$  e MEA. O Syx não foi usado nesta etapa, pois o número de coeficientes é necessário para o cálculo desta estatística de qualidade, o que não é fixo para o caso da estimativa do volume pela soma das estimativas por fuste.

$$RQME (\%) = 100 \left( \frac{\sqrt{\frac{(V_{obs} - V_{est})^2}{n}}}{\overline{V_{c\ c\ c}}} \right)$$

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

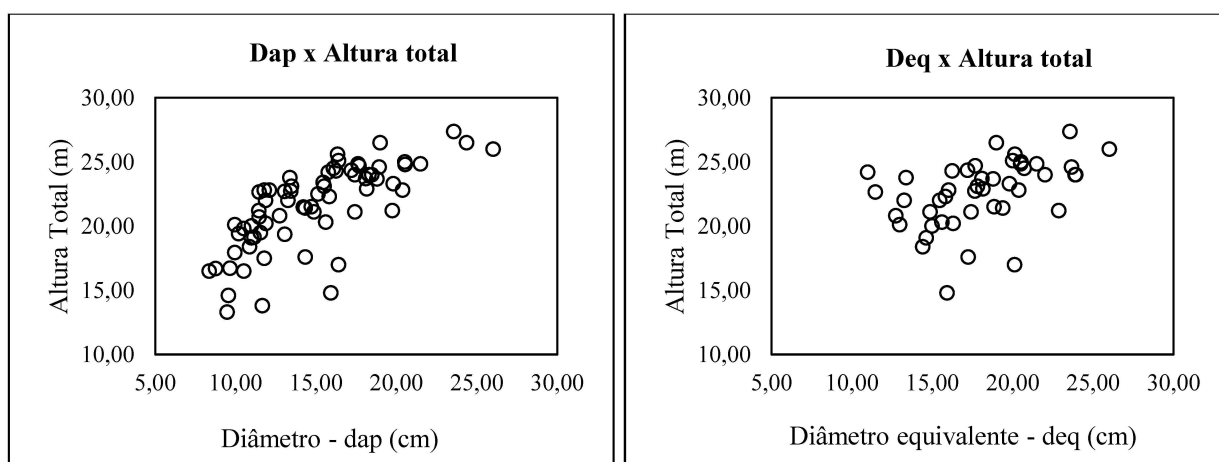
Das 46 árvores utilizadas no estudo, 23 apresentaram bifurcação com 2 fustes e na Tabela 3 estão apresentados os valores mínimos, médios e máximos para as variáveis *dap* (cm), *d<sub>eq</sub>* (cm), altura total (m) e volume observado (m<sup>3</sup>) para os tratamentos.

**Tabela 3.** Estatísticas descritivas de  $dap$ ,  $d_{eq}$ , altura total e volume nos tratamentos do povoamento experimental de *Tachigali vulgaris* no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, Pará.

		Mínimo	Médio	Máximo	CV (%)
$dap$ (cm)	Tratamento 1	9,5	15,0	23,6	25,1
	Tratamento 7	8,8	15,4	24,4	26,2
	Tratamento 12	8,3	14,2	26,0	29,8
$d_{eq}$ (cm)	Tratamento 1	13,2	19,0	23,9	19,2
	Tratamento 7	12,7	18,8	31,9	22,7
	Tratamento 12	11,5	17,5	26,0	22,9
Altura total do fuste (m)	Tratamento 1	13,3	21,6	27,4	16,3
	Tratamento 7	16,7	22,2	26,5	17,1
	Tratamento 12	13,8	20,8	26,0	11,2
Volume observado do fuste (m <sup>3</sup> )	Tratamento 1	0,0420	0,2062	0,5040	59,7
	Tratamento 7	0,0488	0,1786	0,5740	56,5
	Tratamento 12	0,0479	0,2239	0,5150	64,4

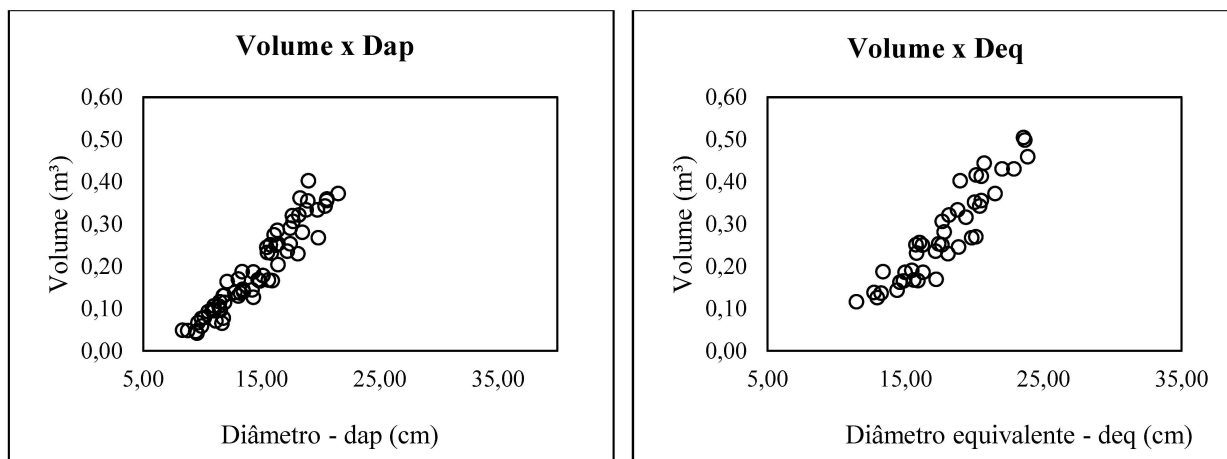
Em que:  $dap$  = diâmetro à altura do peito, em cm;  $d_{eq}$  = diâmetro equivalente, em cm.

Na Figura 2 está representado o comportamento dos dados do diâmetro ( $dap$ ) e diâmetro equivalente ( $d_{eq}$ ) em relação à altura total. Observa-se ligeira menor dispersão dos diâmetros de fustes individuais em função da altura em comparação com os diâmetros equivalentes. O mesmo padrão é observado para a dispersão dos diâmetros em relação ao volume (Figura 3). Na Figura 4 observa-se a relação altura total: volume com tendência mais pronunciadamente exponencial que a dos diâmetros, mas com maior dispersão.



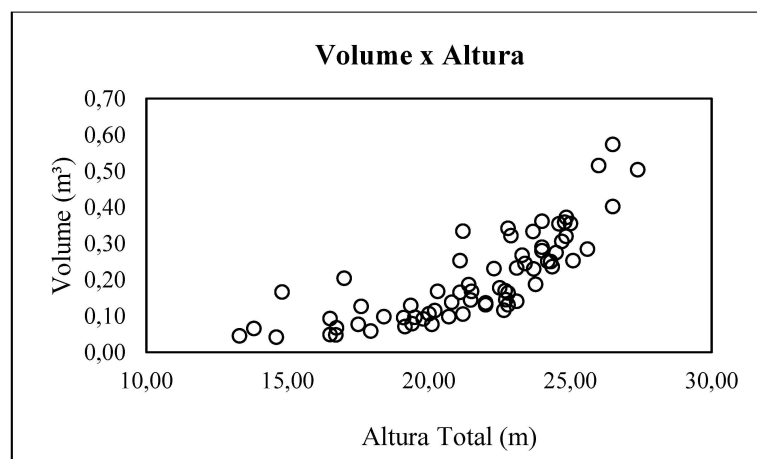
**Figura 3.** Relação entre diâmetro à altura do peito ( $dap$ ) e diâmetro equivalente ( $d_{eq}$ ) com a altura total.

Fonte: A autora, 2024.



**Figura 4.** Gráfico da relação entre diâmetro à altura do peito ( $dap$ ) e o diâmetro equivalente ( $d_{eq}$ ) com o volume observado.

Fonte: A autora, 2024.



**Figura 5.** Gráfico da relação entre a altura total com o volume observado.

Fonte: A autora, 2024.

Os padrões observados são consistentes com o crescimento natural das árvores, onde a relação entre altura total e diâmetros individuais apresenta menor dispersão devido à conexão direta entre essas variáveis (Oliveira et al., 2005). Em contrapartida, os diâmetros equivalentes, que integram múltiplos componentes, e a relação altura total:volume, mais influenciada por fatores como forma do tronco, exibem maior variabilidade (Miguel et al., 2014). Esses resultados confirmam padrões esperados, amplamente descritos na literatura, reforçando a validade das análises realizadas.

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados dos ajustes considerando os dados por fuste e por árvore juntamente com os resultados obtidos, de suas respectivas estatísticas de qualidade de ajuste.

**Tabela 4.** Resultados dos modelos volumétricos ajustados por fuste e por árvore, para o povoamento experimental de *Tachigali vulgaris* no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, Pará.

Modelo	Estimativa dos parâmetros						Estatísticas de qualidade de ajuste			
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$\hat{\beta}_4$	$\hat{\beta}_5$	S <sub>yx</sub> %	R <sup>2</sup> <sub>ajus</sub>	MEA	r <sub>ŷy</sub>
<b>Ajuste por fuste</b>										
Brenac Modificado	-7,979581 (<0,001)	2,325693 (<0,001)	ns	-	-	-	18,37	0,91	0,03	0,96
Husch	-7,979581 (<0,001)	2,325693 (<0,001)	-	-	-	-	18,37	0,91	0,03	0,96
Spurr	-9,823288 (<0,001)	0,958758 (<0,001)	-	-	-	-	14,34	0,94	0,02	0,98
Schumacher e Hall logaritmizado	-10,127213 (<0,001)	1,824957 (<0,001)	1,138831 (<0,001)	-	-	-	13,92	0,95	0,02	0,98
Stoate Modificado	-0,164425 (<0,001)	0,000756 (<0,001)	ns	0,008747 (<0,001)	-	-	12,96	0,95	0,02	0,98
Naslund Modificado	-0,164425 (<0,001)	ns	0,000756 (<0,001)	ns	ns	0,008747 (<0,001)	12,96	0,95	0,02	0,98
<b>Ajuste por árvore</b>										
Brenac Modificado	-7,441288 (<0,001)	2,123731 (<0,001)	ns	-	-	-	14,45	0,92	0,03	0,97
Husch	-7,441288 (<0,001)	2,123731 (<0,001)	-	-	-	-	14,45	0,92	0,03	0,97
Spurr	-9,573380 (<0,001)	0,929914 (<0,001)	-	-	-	-	12,01	0,94	0,03	0,97
Schumacher e Hall logaritmizado	-9,620390 (<0,001)	1,849935 (<0,001)	0,954203 (<0,001)	-	-	-	12,16	0,94	0,03	0,97
Stoate Modificado	-0,240765 (<0,001)	0,000826 (<0,001)	ns	0,011119 (<0,001)			11,90	0,94	0,03	0,9743
Naslund Modificado	-0,240765 (<0,001)	ns	0,000826 (<0,001)	ns	ns	0,011119 (<0,001)	11,90	0,94	0,03	0,9743

Em que: ns = parâmetros não significativos que foram removidos.

De acordo com o observado, por haver a exclusão das interações e variáveis menos significativas no ajuste por fuste e por árvore, os modelos de Brenac e Husch acabaram por apresentarem a mesma estrutura final, assim como o mesmo aconteceu como ocorreu o mesmo para Stoate e Naslund.

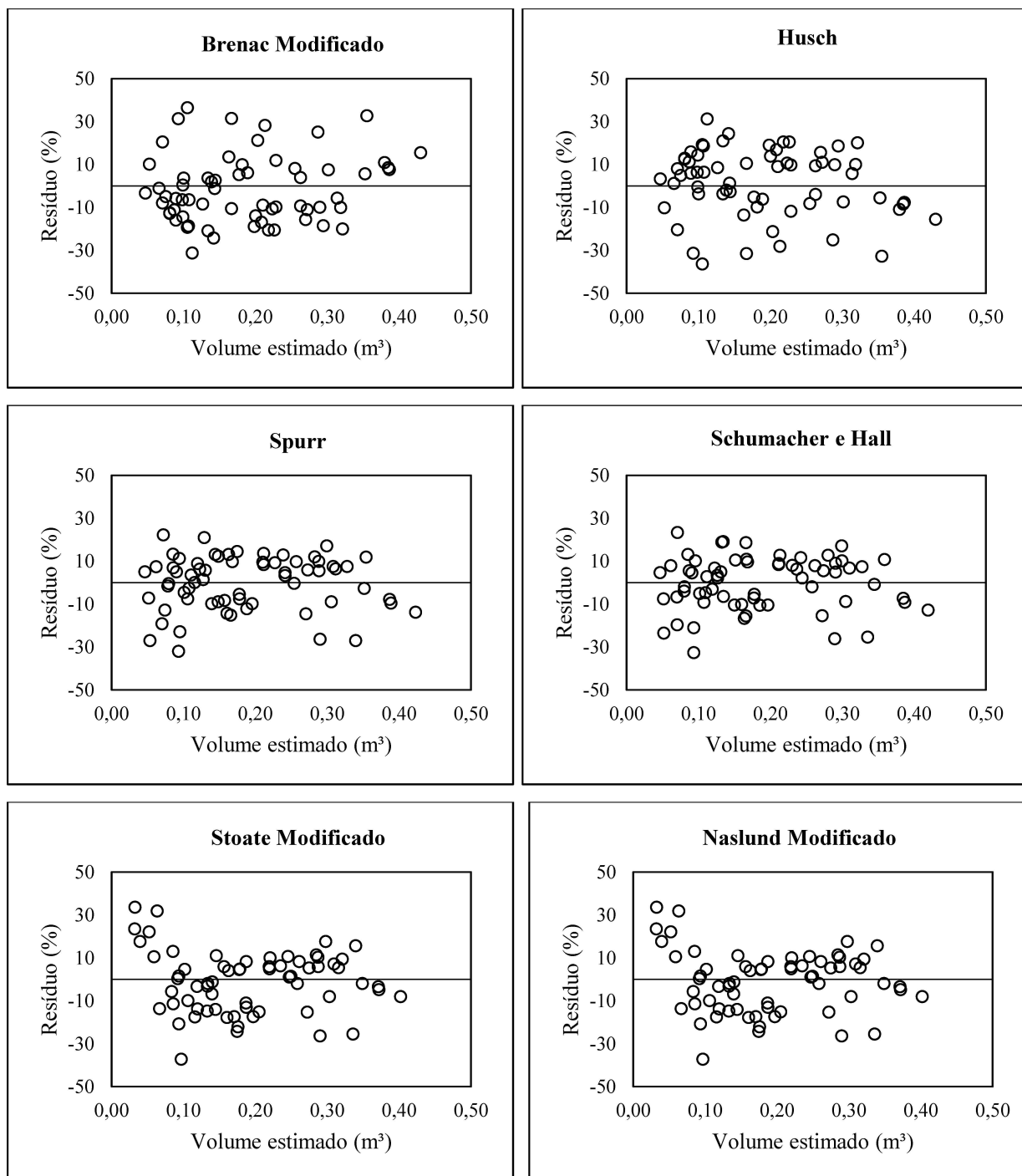
Consequente, os modelos modificados de Stoate e Naslund se destacaram, apresentando os menores valores de  $S_{yx}\%$  e MEA, além dos maiores valores de  $R^2_{ajus}$  e  $r_{\hat{y}y}$ . Estes resultados indicam que esses modelos promoveram maior precisão e melhor ajuste aos dados observados em comparação com os demais, tanto para quando ajustados por fuste, quanto por árvore.

Os modelos de Stoate e Naslund nem sempre apresentam as melhores estatísticas de ajuste em modelagens volumétricas tradicionais porque foram desenvolvidos para condições florestais específicas e utilizam uma relação relativamente simples entre o diâmetro à altura do peito (*dap*) e a altura das árvores (Clutter et al., 1983).

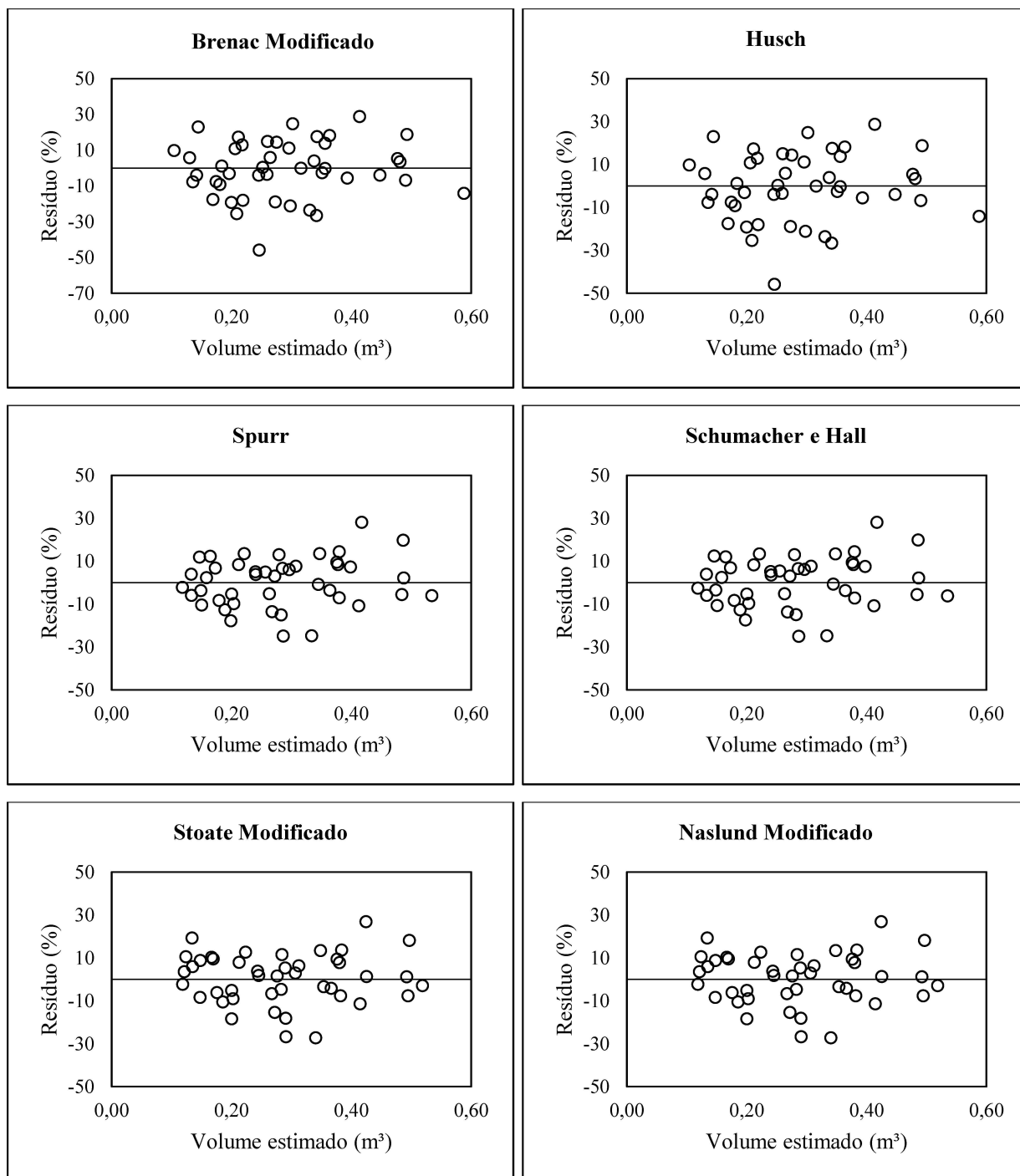
O modelo de Schumacher e Hall logaritimizado destaca-se por sua robustez e eficiência na predição de volume de árvores, incorporando o diâmetro à altura do peito (*dap*) e a altura (*h*) de forma logarítmica, o que ajuda a estabilizar a variabilidade dos dados. Essa característica o torna especialmente eficaz em estudos de larga escala com ampla variação nos tamanhos das árvores e nas características do povoamento florestal. Andrade (2017) confirmou que esse modelo frequentemente supera outros utilizados em estudos de ajuste volumétrico devido à sua capacidade de lidar com a variabilidade das variáveis envolvidas na predição.

No entanto, os modelos modificados de Stoate e Naslund, após a exclusão dos termos não significativos, ganharam mantiveram a maior acurácia entre os modelos, ou seja, tornaram-se mais simples e parcimoniosos sem perder em capacidade preditiva. A inclusão ou exclusão de preditores pode aumentar significativamente a precisão de modelos clássicos, permitindo sua adaptação para diferentes condições de estudo ou tipos de florestas (Soares et al., 2006). Essa abordagem oferece uma base sólida para justificar a personalização dos modelos, tornando-os mais adequados às especificidades de estudos locais e aumentando sua aplicabilidade prática (Burkhardt e Tomé, 2012).

Nas Figura 5 e 6 estão apresentados os gráficos de dispersão dos resíduos para os volumes estimados por modelo.



**Figura 6.** Gráfico da dispersão dos resíduos para os volumes estimados dos modelos ajustados a por de fuste.  
Fonte: A autora, 2024.



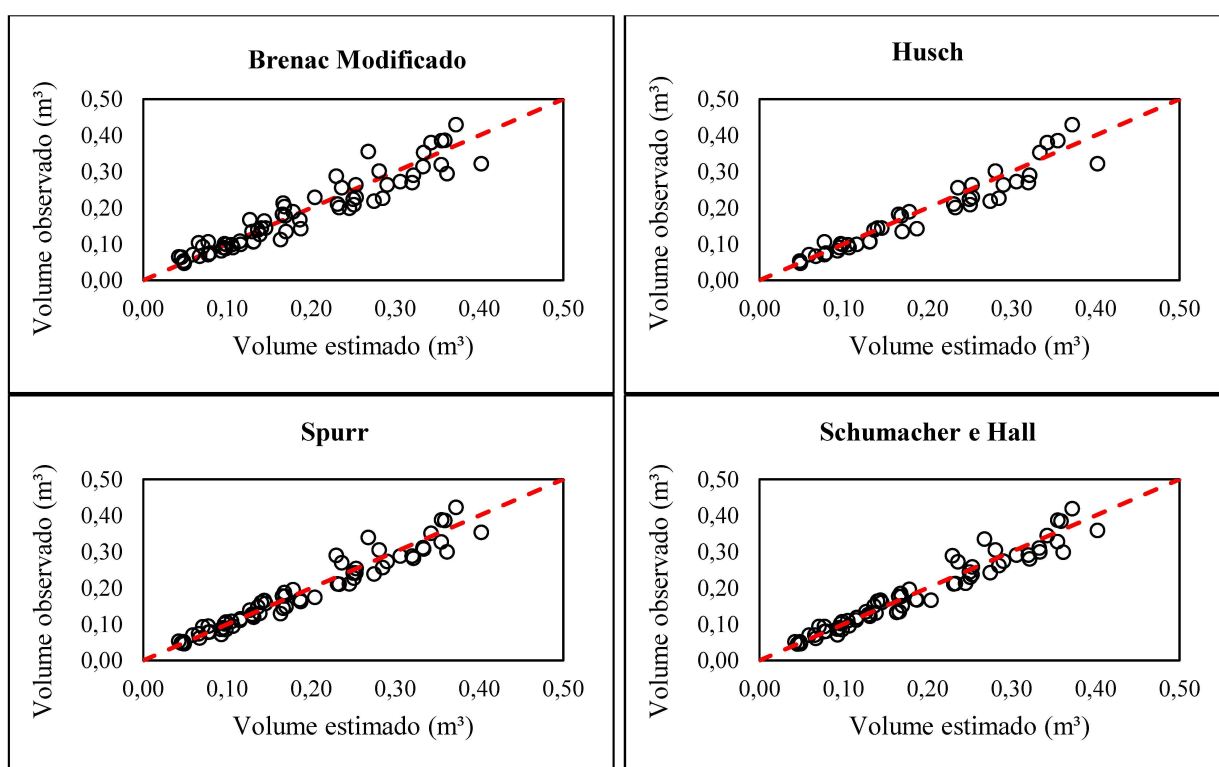
**Figura 7.** Gráfico da dispersão dos resíduos para os volumes estimados dos modelos ajustados por árvore.  
Fonte: A autora, 2024.

Na análise de gráficos de resíduos (Figuras 5 e 6), o padrão ideal é observar uma dispersão aleatória e homogênea, ou seja, na mesma faixa de resíduos positivos e negativos. Isso indica que o modelo não apresenta padrões sistemáticos de erro, ou seja, os erros de predição são distribuídos de forma independente e homogênea para diferentes valores de volume estimado (Kutner e Neter, 2004).

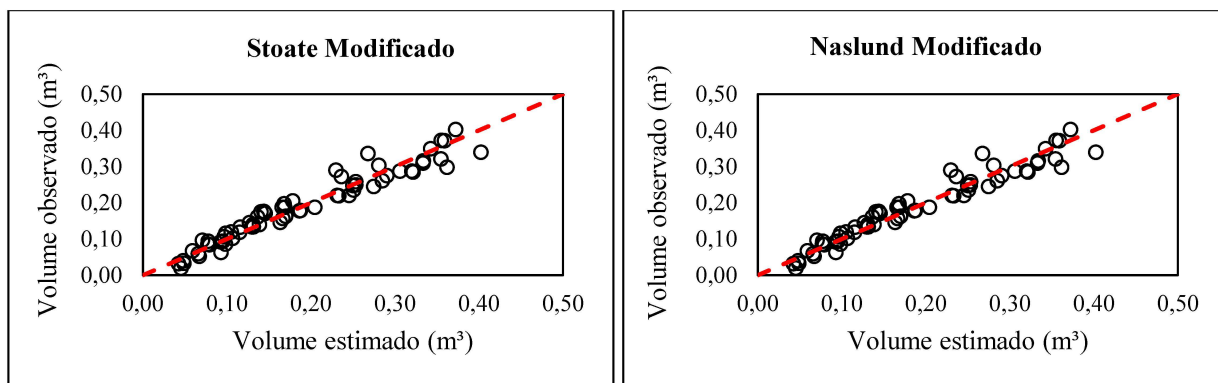
Em outras palavras, os resíduos não devem formar padrões visíveis ou tendências, como uma curva ou uma concentração em determinadas regiões. Sendo assim, para os gráficos apresentados para a dispersão dos resíduos de Stoate e Naslund, verifica-se maior amplitude de dispersão quando comparado com os demais modelos para os dois ajustes realizados.

Ademais, conforme os dados de estimativas de volume por fuste (Figura 5) e estimativas de volume por árvore (Figura 6) os modelos de Brenac Modificado/Husch, quando comparado aos outros modelos, subestimaram o volume. No entanto, ao serem comparados com o volume observado, esses modelos superestimaram o volume.

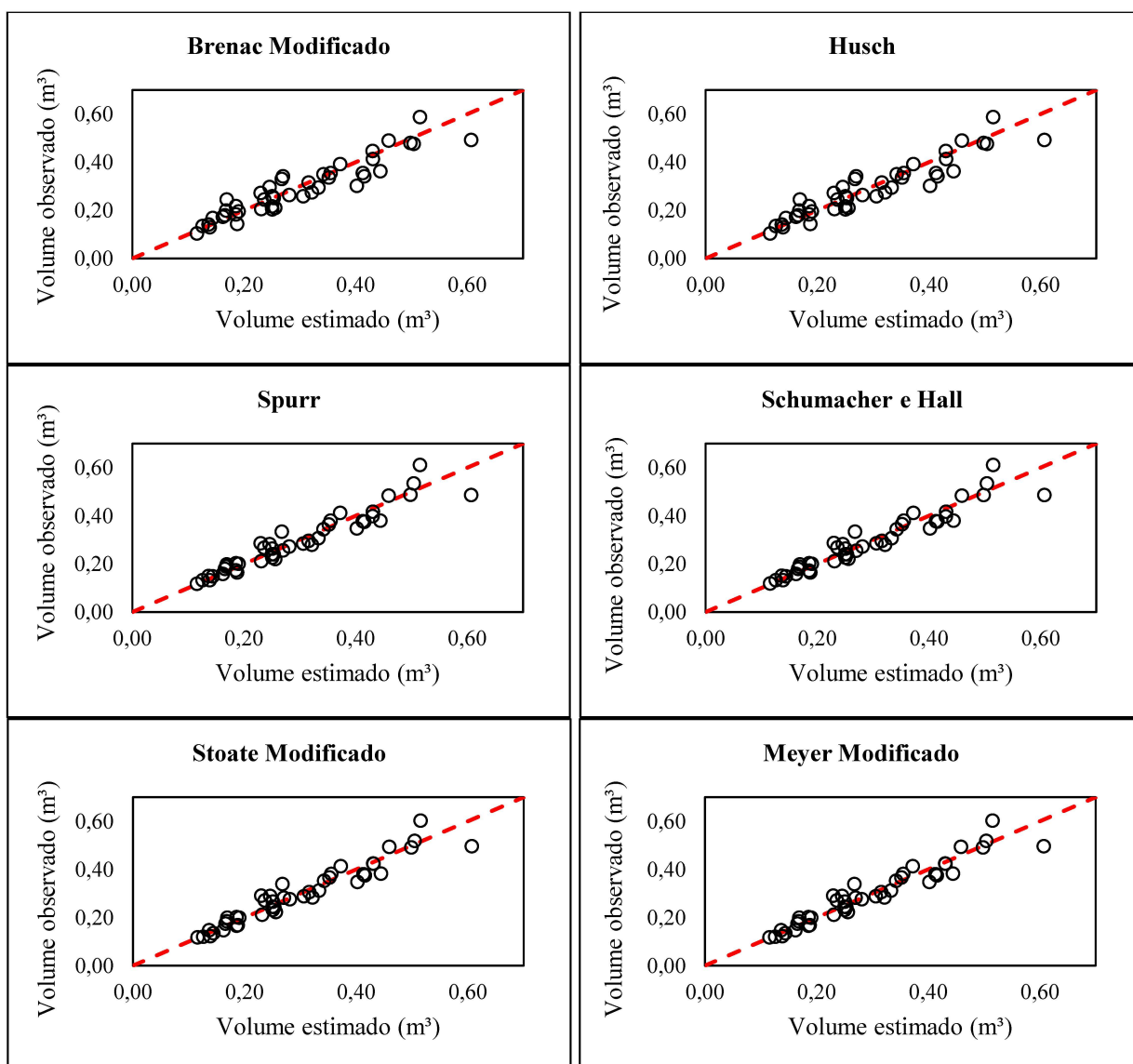
Para o modelo de Stoate/Naslund Modificado, que apresentou o melhor ajuste, superestimou os valores de volume tanto em relação aos demais modelos quanto ao volume observado. Este fato é corroborado com a análise dos gráficos apresentados para o volume estimado por fuste (Figura 7) relacionado ao volume observado e o volume estimado por árvore (Figura 8) relacionado ao volume observado.







**Figura 8.** Comparação entre volume estimado por fuste e volume observado  
 Fonte: A autora, 2024



**Figura 9.** Comparação entre volume estimado por árvore e volume observado  
 Fonte: A autora, 2024

Ramos et al (2021), estudando um teste de espaçamentos de *Tachigali vulgaris*, identificaram superioridade das estimativas dos modelos de dupla entrada em relação aos de dupla

entrada para ambas as alternativas de preditor  $d_{ap}$  ou  $d_{eq}$ . Os autores mencionam a proximidade das estatísticas dos modelos de dupla entrada e selecionam o modelo de Schumacher como o melhor, embora não o melhor em todas as estatísticas, mas com a melhor distribuição residual.

Considerando as espécies em que o *Tachigali vulgaris* foi comparado no início deste trabalho, no estudo realizado por Leite et al. (2011), os modelos de Naslund e Stoate apresentaram as melhores qualidades de ajuste para a estimativa de volume em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* localizado no município de Mineiros, Goiás. Já para um estudo considerando o ajuste de equação para um povoamento de *Pinus*, o de David et al. (2017), também apresentou Naslund e Stoate como sendo os melhores para estimação do volume em povoamentos de *Pinus sp.*

Ressalta-se que, por mais que os modelos de Stoate e Naslund estejam citados como sendo os melhores nestes estudos, aqui considera-se que eles são o mesmo pois, ao serem modificados e haver a exclusão das interações e variáveis menos significativas apresentaram os mesmos parâmetros.

Em relação ao efeito da adubação na estimação do volume, não foi detectado efeito significativo para o modelo por de fuste nem para o modelo por de árvore (p-valores de 0,2156 e 0,4826, respectivamente para o teste F comparando os modelos com e sem o efeito da adubação. No estudo de Teixeira (2011), que utilizou o mesmo povoamento para analisar a dinâmica de plantações experimentais de *Tachigali vulgaris* em resposta à adubação e à textura do solo, houve efeito da adubação no crescimento do *Tachigali vulgaris*, especialmente em relação ao diâmetro à altura do peito ( $d_{ap}$ ) aos dois anos, quando se observou um efeito significativo da aplicação de cloreto de potássio. No entanto, em idades subsequentes (4 a 10 anos), a adubação não apresentou significância estatisticamente relevante da adubação no desenvolvimento das árvores. Neste trabalho, identificamos também que não houve efeito da adubação na relação entre a altura e diâmetro, seja  $d_{ap}$  ou  $d_{eq}$ , e o volume, podendo ser interpretado com falta de efeito das adubações aplicadas na forma da árvore.

Complementarmente a este estudo, que avaliou o efeito da adubação aos 11 anos, corroborou aos resultados observados no exposto por Teixeira (2011). Este fato complementa a hipótese de que, apesar de uma resposta inicial à adubação, o crescimento subsequente da espécie parece não ser influenciado pela adubação.

Para Ataíde (2023), *Tachigali vulgaris* possui capacidade adaptativa a solos de baixa fertilidade, com alto potencial para melhorar a fertilidade conforme a disposição de serrapilheira, facilitando processos biológicos e químicos para benefício próprio, o que justifica o fato de a adubação não ser significativa no incremento da espécie em povoamentos com maior idade.

Por fim, ao se compararem as estimativas por de árvore das duas categorias de modelos (estimativas dos modelos por de árvore e a soma das estimativas do modelo por fuste para cada árvore), os resultados indicaram um modesta maior acurácia para as estimativas de volume por árvores provenientes da soma das estimativas dos volumes por fuste (Tabela 5).

**Tabela 5.** Estatísticas de qualidade da acurácia dos ajustes por fuste e por árvore, para o povoamento experimental de *Tachigali vulgaris* no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, Pará.

EQA	Ajuste em <i>dap</i>	Nível em <i>d<sub>eq</sub></i>
RQEM%	10,7304	11,5169
$r_{\hat{y}y}$	0,9769	0,9731
MEA	0,0255	0,0264

A escolha entre qual variável preditora a ser utilizada em um estudo, deve considerar o contexto, o objetivo do estudo e a disponibilidade da base de dados. Se existem informações sobre altura e diâmetro dos fustes pode ser vantajoso se utilizar a equação por fuste por renderem estimativas ligeiramente mais acuradas e por pelo volume por árvore poder ser calculado pela soma dos volumes dos fustes. Por outro lado, se por exemplo apenas a altura total da árvore foi coletada, ao invés das alturas de todos os fustes, a equação por árvore pode ser a única opção.

Para Ramos (2021), os resultados indicam que os modelos de dupla entrada, especialmente o de Schumacher e Hall, apresentaram melhores estimativas, com  $R^2_{\text{ajust}}$  de 0,95 e  $S_{yx}\%$  variando de 9,34% a 10,98%. O estudo indicou o uso dos modelos em nível de árvore ( $d_{eq}$  como preditor), mas a comparação entre as estimativas dos volumes por árvore através das duas alternativas – estimativas pelas equações por árvore e soma das estimativas das equações por fuste para cada árvore – não chegou a ser realizada, sendo a conclusão baseada na comparação direta das estatísticas de qualidade de ajuste das estimativas por árvore e das estimativas por fuste.

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados indicaram boa acuraria para ambas as alternativas de nível de predição (modelos por árvore e modelos por fuste) para os testes de adubação de plantio de *Tachigali vulgaris* avaliados na região do Baixo Amazonas, em Monte Dourado, distrito de Almeirim – Pará. O modelo mais acurado para ambas alternativas foi a forma modificada dos modelos de Näslund e Stoa sendo:  $v_{fuste} = -0,164424 + 0,0007562 \, dap^2 + 0,0087407 \, h$  e  $v_{arvore} = -0,240765 + 0,000825 \, d_{eq}^2 + 0,111189 \, h$ . O volume por árvore também pode ser estimado pela soma dos volumes dos fustes gerando, inclusive, estimativas modestamente mais acurada do que a estimativa direta pelo modelo por árvore.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, V.C.L. Modelos volumétricos de dupla entrada para aplicar em povoamentos florestais brasileiros. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.
- ARRIEL, D. A. A., et al. **Melhoramento genético de *Tachigali vulgaris* para plantações homogêneas: análise de um teste de procedências e progênies aos dez anos de idade**. In: Anais do I Workshop Online Florestas de *Tachigali vulgaris*, 5 e 6 de outubro de 2021. Colombo: Embrapa Florestas, 2022. Documentos 377, p. 129-140.
- ATAÍDE, W. L. S. et al. **Mecanismos fisiológicos, bioquímicos, antioxidantes e crescimento em mudas de *Tachigali vulgaris* LG Silva & HC Lima submetidas à deficiência hídrica**. 2023. Tese (Doutorado). UFRA-Campus Belém, Belém-PA.
- BURKHART, H. E., & TOMÉ, M. (2012). **Modeling Forest Trees and Stands**. Springer Science & Business Media, v.12 n.3, 2012.
- JUNIOR, S. B., et al. *Tachigali vulgaris* na Amazônia: retrospectiva de pesquisas com plantios experimentais. In: **Workshop Online Florestas de *Tachigali Vulgaris***, 1., 2021, Colombo. Anais. Colombo: Embrapa Florestas, 2022.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5. ed. Viçosa, MG: EdUFV, cap. 1 e 2, 2017.
- CASTRO, C. E. C.; SILVA, P. H. M.; ARAÚJO, M. J.; MIRANDA, A. C.; MORAES, M. L. T.; PAULA, R. C. Adaptabilidade, estabilidade e produtividade de progênies de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 118, p. 157-166, 2018.
- CARDOSO, R. Mo. **Acurácia volumétrica aplicada ao manejo florestal sustentável na Amazônia Brasileira**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2022.
- CLUTTER, J. L., FORSTON, J. C., PIENAAR, L. V., BRISTER, G. H., & Bailey, R. L. **Timber Management: A Quantitative Approach**. Wiley. New York, p. 333, 1983.
- COSTA, T. L. **Fixação biológica de nitrogênio em leguminosas arbóreas em diferentes formações vegetais de Pernambuco**. Tese (Doutorado em Botânica) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2017.
- DAVID, H. C. et al. Efeito da Qualidade do Sítio e do Desbaste na Produção de *Pinus*. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.
- DEMOLINARI, R. A.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L. Crescimento de plantios clonais de eucalipto não desbastados na região de Monte Dourado (PA). **Revista Árvore**, v. 31, n. 3, p. 503-512, 2007.
- GONZAGA, W. **Florestas plantadas: mudança de modelo brasileiro e análise de viabilidade econômica**. 2017. Monografia (Bacharelado em Ciências Econômicas) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Economia, Rio de Janeiro, 2017.

**IBÁ. Relatório Anual, 2024.**

JUNIOR, E. et al. Relação do poder calorífico superior e a química imediata da madeira de *Tachigali vulgaris* para fins energéticos. In: **9º Congresso Florestal Brasileiro**, 2022. p. 404-407.

KOURY SOBRINHO, R. M. **Caracterização dendrométrica e estimação da altura total de tachi-branco (*Tachigali vulgaris*) em um plantio no Pará, um estado da Amazônia brasileira.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus de Parauapebas, Parauapebas, 2019.

LEITE, D. R., et al. Análise comparativa entre dois procedimentos para estimativa da variável volume em um povoamento de *Eucalyptus urophylla*, no município de Mineiros – Goiás. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 7, n. 13, p. 1684-1700, 2011.

MIGUEL, E. P.; LEAL, F. A.; ONO, H. A.; LEAL, U. A. S. **Modelagem na predição do volume individual em plantio de *Eucalyptus urograndis*.** *Revista Brasileira de Biometria*, São Paulo, v. 32, n. 4, p. 584-598, 2014.

MORAES, L. G. **Efeitos da bifurcação, espaçamento e idade na qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris* proveniente de plantações homogêneas para geração de bioenergia na Amazônia.** 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Belém, 2022.

OLIVEIRA, M. L. R.; SOARES, C. P. B.; SOUZA, A. L.; LEITE, H. G. **Equações de volume de povoamento para fragmentos florestais naturais do município de Viçosa, Minas Gerais.** *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v. 29, n. 2, p. 213-225, 2005

ORELLANA, B. B. M. A., et al. Produtividade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* por classe diamétrica em plantios experimentais na Amazônia. **Nativa**, Sinop, v. 6, n. especial, p. 773-781, dez. 2018.

RAMOS, L. O.; MIRANDA, R. O. V.; SOARES, A. A. V.; PROTÁSIO, T. P.; GONÇALVES, D. A. **Wood volumetry of *Tachigali vulgaris* pure plantations in different planting spacings.** *Floresta*, Curitiba, v. 51, n. 4, p. 990-999, out./dez. 2021.

REIS, C. A. F.; SANTOS, A. M.; PACHECO, A. R.; MORAES, A. da C. Contribuições das pesquisas com eucaliptos para a expansão de fronteiras das florestas plantadas brasileiras. In: OLIVEIRA, E. B. de; PINTO JUNIOR, J. E. (Ed.). **O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento.** Brasília, DF: Embrapa, 2021. cap. 9, p. 395-494.

RIBEIRO, R. B. S.; GAMA, J. R. V.; MELO, L. O. **Seccionamento para cubagem e escolha de equações de volume para a Floresta Nacional do Tapajós.** *CERNE*, v. 20, n. 4, p. 605-612, 2014.

ROMANIUK, D. S. **Modelagem do crescimento e da produção em plantios de *Pinus taeda* L. na região Centro-Sul do Paraná.** 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Irati, PR, 2015.

SCHÖEPFER, W. H., NOGUEIRA, G. S. **Mensuração Florestal Aplicada**. Universidade Federal do Paraná, 2010.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F. de; SOUZA, A. L. de. **Dendrometria e inventário florestal**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2011. 272p.

SILVA, M. O. S. **Crescimento e qualidade da madeira da espécie *Tachigali vulgaris* cultivada em diferentes espaçamentos para uso bioenergético**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Belém, 2018.

TEIXEIRA, R. A. C. **Dinâmica de plantações experimentais de *Tachigali vulgaris* L. F. Gomes da Silva & H. C. Lima em resposta à adubação e textura de solo**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Belém, 2021.