



**ACURÁCIA VOLUMÉTRICA APLICADA AO MANEJO  
FLORESTAL SUSTENTÁVEL NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

**RODRIGO MONTEZANO CARDOSO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA-U<sub>n</sub>B**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**ACURÁCIA VOLUMÉTRICA APLICADA AO MANEJO FLORESTAL  
SUSTENTÁVEL NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

RODRIGO MONTEZANO CARDOSO

ORIENTADOR: Dr. EDER PEREIRA MIGUEL

COORIENTADOR: Dr. RODRIGO GERONI MENDES NASCIMENTO

BRASÍLIA – DF, NOVEMBRO DE 2022

ACURÁCIA VOLUMÉTRICA APLICADA AO MANEJO FLORESTAL  
SUSTENTÁVEL NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

RODRIGO MONTEZANO CARDOSO

Dissertação de mestrado submetida ao programa de pós-graduação em ciências florestais do Departamento de Engenharia Florestal da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre.

APROVADA POR:

---

Prof. Dr. Eder Pereira Miguel

(Departamento de Engenharia Florestal, UnB); (Orientador)

---

Prof. Dr. Álvaro Nogueira de Souza

(Departamento de Engenharia Florestal, UnB);

---

Prof. Dr. Gabriel Henrique Pires Ribeiro

(Universidade Federal de Mato Grosso)

Brasília - DF, 01 de novembro de 2022

## FICHA CATALOGRÁFICA

CC268a	<p>Cardoso, Rodrigo Montezano ACURÁCIA VOLUMÉTRICA APLICADA AO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL NA AMAZÔNIA BRASILEIRA / Rodrigo Montezano Cardoso; orientador Eder Pereira Miguel; co-orientador Rodrigo Geroni Mendes Nascimento. -- Brasília, 2022. 132 p.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) -- Universidade de Brasília, 2022.</p> <p>1. Manejo Florestal Sustentável. 2. Volume Comercial. 3. Madeira ilegal. 4. Modelos Mistos. I. Miguel, Eder Pereira, orient. II. Nascimento, Rodrigo Geroni Mendes, co-orient. III. Título.</p>
--------	--

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CARDOSO, R.M. 2022. **Acurácia volumétrica aplicada ao manejo florestal sustentável na Amazônia Brasileira**. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 132 p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: Rodrigo Montezano Cardoso

TÍTULO: Acurácia volumétrica aplicada ao manejo florestal sustentável na Amazônia Brasileira.

GRAU: Mestre ANO: 2022

É concedido à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Rodrigo Montezano Cardoso  
montezanofloresta@gmail.com

*“O mundo não será salvo pelos caridosos, mas pelos eficientes.”*  
(Roberto Campos)

À minha mãe Rita de Cássia Montezano

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Aos professores Álvaro Nogueira de Souza, Eder Pereira Miguel, Hugo Barbosa Amorim, Niro Higuchi e Rodrigo Geroni Mendes Nascimento pela grande importância na minha formação como Engenheiro Florestal e Mestre em Ciências Florestais.

Aos amigos Eduardo Rosa e Evandro Dalmaso por acreditarem no meu potencial como Engenheiro Florestal e pela oportunidade de trabalhar com o Manejo Florestal Sustentável na Amazônia. A Jéssica Dalmaso pela amizade e incentivo para encarar o desafio do mestrado.

A Empresa CEMAL e todos os seus colaboradores, onde aprendi de fato o valor do trabalho e companheirismo, são dez anos que compartilhamos experiências nas atividades florestais amazônicas.

Ao Serviço Florestal Brasileiro (SFB) e Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) pela disponibilidade das informações para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Laboratório de Mensuração e Manejo de Recursos Florestais (LabFor) da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) pelo apoio técnico e infraestrutura.

Ao colega de pós-graduação (UnB) Hallefy Junio de Souza pela imensa colaboração com este trabalho.

Aos meus amigos da UFFRJ, Augusto Moniz, Daniel Cavalcanti, Daniel Jordy, Pedrão Spolidoro e Renato Tocantins pela amizade verdadeira.

Aos meus queridos amigos do “Coq Beach” - Vila Velha - ES pela amizade e por tornar a vida mais leve e divertida.

A minha esposa Luciana e filha Clara pelo apoio e por tornar a vida mais bela.

Ao meu pai Gilberto pela dedicação na minha criação e ao meu irmão Thiago pelo incentivo.

A minha mãe Rita por ser a balizadora ética e moral da minha vida.

A Deus pai, todo-poderoso, criador do céu e da terra.

**Resumo:** Este trabalho teve como objetivo a analisar a acurácia de estimativas volumétricas em áreas de manejo florestal empresarial na Amazônia Brasileira. Os dados utilizados são oriundos do inventário florestal pré-exploratório e da cubagem em romaneio na fase exploratória de treze unidades de manejo florestal, localizadas em cinco unidades de conservação distintas, totalizando aproximadamente sessenta e seis mil árvores, distribuídas em dez gêneros botânicos comerciais. As informações tem origem no Sistema de Cadeia de Custódia (SCC) do Serviço Florestal Brasileiro (SFB). Para alcançar tal objetivo, o estudo foi dividido em dois capítulos. O primeiro tratou de analisar as discrepâncias entre os volumes de madeira comercial estimado pelo inventário florestal e o volume comercial explorado, em diferentes áreas concessionadas para manejo florestal sustentável. De acordo com as análises estatísticas, existe diferença do volume comercial estimado pelo inventário florestal em relação ao volume comercial mensurado no romaneio, independente do gênero e da área manejada. O segundo capítulo objetivou ajustar e propor modelos de razão, combinando variáveis do inventário florestal e romaneio, visando a obtenção de maior acurácia nas estimativas. As análises demonstram que as equações de razão, com a utilização da abordagem de modelos mistos, devem ser utilizadas no manejo florestal sustentável como forma de se obter estimativas mais acuradas. Os resultados gerados neste trabalho evidenciam importantes práticas a serem consideradas e utilizadas na busca da melhoria das estimativas volumétricas aplicada na atividade do manejo florestal sustentável na Amazônia Brasileira.

Palavras-chave: Manejo Florestal Sustentável; Volume Comercial; Madeira ilegal; Modelos Mistos



**Abstract:** This work aimed to analyze the accuracy of volumetric estimates in areas of corporate forest management in the Brazilian Amazon. The data used comes from the pre-exploratory forest inventory and from the cubage in a logged during the exploratory phase of thirteen forest management units, located in five different conservation units, totaling approximately sixty-six thousand trees, distributed in ten commercial botanical genera. The information comes from the Chain of Custody System (SCC) of the Brazilian Forest Service (SFB). To achieve this goal, the study was divided into two chapters. The first dealt with analyzing the discrepancies between the volumes of merchantable timber estimated by the forest inventory and the merchantable volume exploited, in different areas under concession for sustainable forest management. According to the statistical analyses, there is a difference in the merchantable volume estimated by the forest inventory in relation to the merchantable volume measured in the logged, independent of the genus and the managed area. The second chapter aimed at adjusting and proposing ratio models, combining variables from the forest inventory and logged, in order to obtain greater accuracy in the estimates. The analyses demonstrate that the ratio equations, using the mixed model approach, should be used in sustainable forest management as a way to obtain more accurate estimates. The results generated in this study show important practices to be considered and used in the search for improved volumetric estimates applied in sustainable forest management activities in the Brazilian Amazon.

**Keywords:** Sustainable Forest Management; Merchantable Volume; Illegal Timber; Mixed Models

## SUMÁRIO

<b>CONTEXTUALIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Contextualização.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Justificativa .....</b>	<b>4</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1. Geral .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2. Específicos .....</b>	<b>10</b>
<b>3. HIPÓTESE .....</b>	<b>10</b>
<b>4. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>10</b>
<b>4.1. Manejo florestal no Brasil.....</b>	<b>10</b>
<b>4.2. Concessão florestal no Brasil.....</b>	<b>12</b>
<b>4.3. Estimativas volumétricas em florestas tropicais.....</b>	<b>14</b>
<b>4.4. Modelos de razão .....</b>	<b>16</b>
<b>5. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO 1: ANÁLISE DA ACURÁCIA DO VOLUME COMERCIAL ESTIMADO EM UNIDADES DE MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL.....</b>	<b>25</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>30</b>
<b>2.1. Área de estudo.....</b>	<b>30</b>
<b>2.2. Banco de dados .....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.1. Espécies comerciais .....</b>	<b>31</b>

2.2.2.	Obtenção dos volumes pré e pós-exploratório.....	32
2.3.	Análise de dados .....	34
2.3.1.	Relação entre volume pré e pós-exploração.....	34
2.3.2.	Acurácia e validação .....	36
3.	RESULTADOS.....	37
4.	DISCUSSÃO.....	49
4.1.	Volume explorado e volume inventariado.....	49
4.2.	Altura e fator de forma .....	51
4.3.	Árvores defeituosas .....	53
4.4.	Caminhos para a acurácia no manejo florestal .....	54
5.	CONCLUSÃO .....	56
6.	REFERÊNCIAS .....	57
 <b>CAPÍTULO 2: MODELOS DE RAZÃO PARA ESTIMATIVA DO VOLUME COMERCIAL APLICADO AO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL.....</b>		<b>60</b>
1.	INTRODUÇÃO .....	62
2.	METODOLOGIA .....	63
2.1.	Área de estudo.....	63
2.2.	Banco de dados .....	65
2.2.1.	Espécies comerciais .....	65
2.2.2.	Origem dos Dados .....	65
2.3.	Análise dos dados.....	66
2.3.1.	Modelagem volumétrica .....	66

2.3.2. Ajuste e validação.....	67
2.3.3. Simulação do volume explorado .....	69
<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>71</b>
3.1. Modelos volumétricos.....	71
3.2. Modelos dendrométricos: Diâmetros da base e do topo, altura comercial e comprimento da primeira tora.....	75
3.3. Validação dos modelos volumétricos e dendrométricos.....	79
3.4. Acurácia e validação da simulação do volume comercial de madeira.....	84
<b>4. DISCUSSÃO.....</b>	<b>87</b>
4.1. Modelos volumétricos.....	87
4.2. Modelos dendrométricos.....	88
4.3. Simulação do volume comercial .....	90
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>91</b>
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>91</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>95</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização das áreas selecionadas para análise .....	31
Figura 2. Relação entre volume inventariado e volume explorado para diferentes áreas concessionadas sob manejo florestal no Brasil.....	38
Figura 3. Distribuição dos efeitos aleatórios, UMF por UC e gênero botânico, para a modelagem do volume em áreas concessionadas de manejo florestal no Brasil.....	41
Figura 4. Fator de forma para cada gênero manejado em diferentes unidades de conservação na Amazônia brasileira. Linha tracejada na vertical representa o fator de forma 0,7 adotado nas UMFs, conforme legislação brasileira. ....	43
Figura 5. Diferença percentual entre as alturas inventariadas e calculadas durante o romaneio em diferentes UMFs na Amazônia brasileira .....	44
Figura 6. RMSE% entre volume inventariado e explorado em áreas concessionadas de manejo florestal na Amazônia brasileira .....	45
Figura 7. Bias% entre volume inventariado e explorado em áreas concessionadas de manejo florestal na Amazônia brasileira. ....	46
Figura 8. Mapa de localização das áreas selecionadas para análise .....	64
Figura 9. Dispersão de resíduos ( $a_i$ ), relação entre observados x estimados ( $b_i$ ) e distribuição de classes de resíduos ( $c_i$ ) para equações volumétricas de razão para espécies comerciais em áreas de manejo florestal na Amazônia brasileira. Em que: $a_1$ , $b_1$ e $c_1$ = modelo M1; $a_2$ , $b_2$ e $c_2$ = modelo M2; $a_3$ , $b_3$ e $c_3$ = modelo M3 e $a_4$ , $b_4$ e $c_4$ = modelo M4.....	74
Figura 10. Dispersão de resíduos ( $a_i$ ), relação entre observados x estimados ( $b_i$ ) e distribuição de classes de resíduos ( $c_i$ ) para equações volumétricas para espécies comerciais em áreas de manejo florestal na Amazônia brasileira. Em que: $a_1$ , $b_1$ e $c_1$ = modelo M5 e $a_2$ , $b_2$ e $c_2$ = modelo M6.....	75
Figura 11. Dispersão de resíduos ( $a_i$ ), relação entre observados x estimados ( $b_i$ ) e distribuição de classes de resíduos ( $c_i$ ) para a estimativa do diâmetro da base e do topo de	

espécies da primeira tora, de espécies comerciais em áreas de manejo florestal na Amazônia brasileira. Em que: a1, b1 e c1 = modelo M7 e a2, b2 e c2= modelo M8. ... 78

Figura 12. Dispersão de resíduos (ai), relação entre observados x estimados (bi) e distribuição de classes de resíduos (ci) para equações de altura comercial e comprimento da primeira tora para espécies comerciais em áreas de manejo florestal na Amazônia brasileira. Em que: a1, b1 e c1 = modelo M9 e a2, b2 e c2 = modelo M10..... 79

Figura 13. Relação entre observados x estimados para equações de volume validadas de dez gêneros comerciais em áreas de manejo florestal na Amazônia brasileira. Em que: a = modelo M4 e b= modelo M6..... 83

Figura 14. RMSE% e Bias% para o volume de madeira comercial "simulado" de gêneros comerciais em áreas de manejo florestal na Amazônia brasileira. Em que: a1 e b1 = RMSE% e Bias % para o modelo M4 e a2 e b2=RMSE% e Bias% para o modelo M6..... 84

Figura 15. Relação entre observados x estimados para o volume comercial simulado de dez gêneros comerciais em áreas de manejo florestal na Amazônia brasileira. Em que: a = modelo M4 e b= modelo M6..... 86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Áreas selecionadas para avaliação, com informações sobre as unidades de conservação e unidades de manejo florestal.....	30
Tabela 2. Lista de gêneros selecionados para as análises.....	32
Tabela 3. Métodos utilizados para a estimativa do volume comercial nas diferentes áreas avaliadas .....	33
Tabela 4. Distribuição do número de árvores avaliada em cada UMF.....	34
Tabela 5. Resultados do ajuste do modelo linear misto para avaliar a relação entre volume inventariado e explorado .....	39
Tabela 6. Análises de variância para os efeitos fixos e aleatórios.....	40
Tabela 7. Coeficientes e erro padrão para os efeitos aleatórios.....	42
Tabela 8. Teste de equivalência para a relação entre volume explorado e inventariado em áreas de manejo florestal na Amazônia brasileira .....	47
Tabela 9. Áreas selecionadas para avaliação, com informações sobre as unidades de conservação e unidades de manejo florestal.....	64
Tabela 10. Lista de gêneros selecionados para as análises.....	65
Tabela 11. Modelos selecionados para a estimativa do volume comercial de dez gêneros comerciais na Amazônia, Brasil. ....	67
Tabela 12. Modelos selecionados para a estimativa das variáveis dendrométricas de dez gêneros comerciais na Amazônia, Brasil.....	70
Tabela 13. Coeficientes ajustados e estatísticas de precisão para cada equação volumétrica, em áreas de concessão florestal na Amazônia, Brasil. ....	71
Tabela 14. Estimativa dos efeitos aleatórios para os modelos volumétricos mistos em áreas de concessão florestal na Amazônia, Brasil. ....	72

Tabela 15. Coeficientes ajustados e estatísticas de precisão para cada equação volumétrica, em áreas de concessão florestal na Amazônia, Brasil. ....	76
Tabela 16. Estimativa dos efeitos aleatórios para os modelos volumétricos mistos em áreas de concessão florestal na Amazônia, Brasil. ....	76
Tabela 17. Teste de equivalência para as estimativas dos modelos volumétricos e dendrométricos (Db, Dt, h e L) em áreas de concessão florestal na Amazônia brasileira. ....	80
Tabela 18. Teste de equivalência para as estimativas do volume comercial simulado em áreas de concessão florestal na Amazônia brasileira. ....	85



## CONTEXTUALIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO

### 1. INTRODUÇÃO

#### 1.1.Contextualização

A área florestal mundial possui 4,06 bilhões de hectares, a formação tropical tem a maior proporção das florestas do mundo (45%), seguida pelas formações boreal (27%), temperada (16%) e subtropical (11%), mais da metade das florestas do mundo estão em apenas cinco países: Rússia (20%), Brasil (12%), Canadá (9%), Estados Unidos (8%) e a China (5%) (FAO, 2020). No Brasil, a área de essências florestais equivale a 57,3% do país, cobrindo uma área de 487.991.966 ha em 2019, desse total, 98% correspondem a florestas naturais enquanto apenas 2% são florestas plantadas, a tipologia florestal de maior ocorrência é a floresta ombrófila densa, muito presente no bioma Amazônia, que apresenta quase 79,5% de seu território coberto por floresta (SNIF, 2020).

As florestas tropicais estão restritas às porções de terras entre os Trópicos de Capricórnio (latitude 23° 26” Sul) e o Trópico de Câncer (23° 26” Norte). A maioria das terras do planeta estão localizadas ao norte dos trópicos, logo, as florestas tropicais estão naturalmente limitadas a uma área relativamente pequena, apesar do seu papel imprescindível na manutenção dos serviços ecológicos, tais como na garantia do estoque dos recursos hídricos, fertilidade dos solos, regulação climática e manutenção da biodiversidade (SIST et al., 2021).

Aproximadamente um terço das florestas tropicais do mundo estão localizadas na Amazônia brasileira, abrigando uma enorme quantidade de recursos florestais, com volume estimado em 60 bilhões de metros cúbicos (m<sup>3</sup>) de madeira em tora (BARROS; VERÍSSIMO, 2002). Segundo informações consultadas na plataforma *Timberflow* (IMAFLOA, 2021), no ano de 2018 foram extraídos de forma legal 4,57 milhões (m<sup>3</sup>) de madeira em tora no Brasil, considerando apenas dez das principais madeiras nativas comercializadas: *Astronium* spp. (Muiracatiara); *Bagassa* spp. (Tatajuba); *Dinizia* spp. (Angelim-Vermelho); *Dipteryx* spp. (Cumaru); *Goupia* spp. (Cupiúba); *Handroanthus* spp. (Ipê); *Hymenaea* spp. (Jatobá); *Hymenolobium* spp. (Angelim-Pedra); *Manilkara* spp. (Maçaranduba); *Mezilaurus* spp. (Itaúba).

Para a utilização da enorme abundância dos recursos florestais da Amazônia, é sugerido que o manejo florestal de regime sustentado é a forma de uso do solo mais

inteligente para a região (HIGUCHI, 1987, 1994), podendo ser aplicado em diferentes localidades do bioma. O princípio do manejo florestal é o aproveitamento dos recursos florestais, ao longo de determinado espaço de tempo, sem comprometer a estrutura da floresta. Em suma, o manejo florestal sustentável (MFS) é a utilização de sistemas silviculturais em florestas destinadas a produção madeireira e a condução da regeneração natural remanescente, visando garantir a continuidade da produção. (HIGUCHI, 1994). Na legislação brasileira (Lei Federal 11.284/2006) manejo florestal sustentável é definido como a administração da floresta para a obtenção de benefícios econômicos, sociais e ambientais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema objeto do manejo.

As técnicas de manejo de florestas tropicais, voltadas para a utilização do recurso florestal madeireiro, vem evoluindo com o passar do tempo, visando garantir a sustentabilidade desse recurso para futuras gerações, com destaque para a utilização de técnicas de exploração de impacto reduzido (EIR) (FIGUEIREDO et al., 2007, MEDJIBE et al., 2011; PUTZ et al., 2012; SCHWARTZ et al., 2012; SASAKI et al., 2016, LEÃO, et al., 2020a). O sistema silvicultural adotado para a densa floresta tropical amazônica é o policíclico, que envolve a extração seletiva de espécies florestais em ciclos de corte de 25 - 35 anos com volume máximo de exploração de  $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (MMA, 2006; AVILA et al., 2017). Tais regras são baseadas em uma taxa pós-exploratória assumida de incrementos de volume de madeira comercial de  $0,86 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$  (SIST et al., 2021).

As unidades de manejo florestal (UMF) são geralmente divididas em unidades de produção anual (UPA), de acordo com o ciclo de corte adotado (ITTO, 2011). É no plano de manejo florestal sustentável (PMFS) que são apresentadas as informações e procedimentos técnicos a serem adotados na UMF. No plano operacional anual (POA) são definidos os padrões e procedimentos das atividades a serem realizadas na área de exploração (UPA), bem como a solicitação do volume a ser explorado. O volume a ser explorado é definido após a realização do inventário florestal de enumeração completa (100%), o censo, realizado na área alvo de manejo florestal. O censo florestal é o levantamento de todas as árvores de valor comercial existente na área de exploração (AMARAL et al., 1998; HIRAMATSU, 2008).

Nas diversas atividades florestais, obter o volume das árvores é a principal finalidade dos levantamentos, quando se trata de povoamentos destinados para fins comerciais (MACHADO et al., 2014). Medir diretamente o volume de uma árvore não é uma prática viável, já que se trata de uma variável de difícil acesso e de grande

variabilidade ao longo da estrutura florestal. Portanto, a estimação do volume por meio de ajustes de modelos é de suma importância para atender aspectos legais, de planejamento no manejo florestal e custos operacionais, sendo o principal dimensionador do estoque e da produtividade da floresta, propiciando informações que irão direcionar a exploração florestal (HIRAMATSU, 2008; LIMA, 2015; CYSNEIROS et al., 2017).

Os métodos usuais de estimativa de volume comercial de árvores na atividade de MFS na Amazônia, são provenientes do uso do fator de forma ( $ff$ ) ou uso de equações volumétricas. Proposto por Heinsdijk e Bastos (1963) o  $ff$  no valor de 0,7 estabelece a relação entre o volume de madeira e o volume do cilindro, utilizando-se a área transversal da árvore, medido à altura do peito (1,30 m) e a altura do fuste comercial. O uso de equações volumétricas geralmente é realizado com uso de modelos de simples ou dupla entrada para todas as espécies. Possibilitando estimativas de volume em metros cúbicos em função do diâmetro a altura do peito ( $DAP$ ) e da altura comercial ( $hc$ ).

As estimativas volumétricas a serem feitas em áreas de manejo florestal na Amazônia é norteada pela Resolução N° 406, de 02 de fevereiro de 2009 do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, onde se estabelece que no primeiro POA pode ser usado o  $ff = 0,7$  e que se desenvolva equação de volume nos próximos POAs do PMFS. Porém, esse instrumento legal não impõe métodos específicos para o ajuste de equações de volume, como parâmetros de precisão e número de árvores mínimo para cubagem (LEÃO et al., 2020b). Após a aprovação do POA o detentor da área de manejo florestal está apto para o início da exploração florestal, começando pela construção da infraestrutura: estradas principais e secundárias, sinalização e construção de pátios intermitentes, a atividade subsequente é o abate das árvores selecionadas para exploração, seguido pelo: planejamento do arraste das árvores abatidas seccionadas em toras; arraste das toras; romaneio das toras; transporte das toras; finalizando com comercialização da madeira.

Na atividade de corte das árvores, todas as seções aproveitáveis geradas recebem a identificação com o número da árvore acrescido de letras sequenciais, a partir da primeira tora originada da base da árvore (A+, B+, C) (SFB, 2012). As árvores são arrastadas pelo trator florestal, denominado *skidder*, até chegar no pátio intermitente, também conhecido vulgarmente como “batedor”. No batedor, o comprimento, os diâmetros da base e do topo da tora são medidos com auxílio de trena para o cálculo de volume da tora com base na formulação matemática de determinação de Smalian (PRODAN et al., 1997). A soma do volume das seções de uma mesma árvore corresponde

ao seu volume comercial efetivamente explorado. O conjunto de procedimentos de mensuração descritos acima é denominado como romaneio de toras.

Os dados de romaneio principalmente em áreas de concessão florestal, essas que são provenientes de contratos de longa duração com dezenas de UPAs, geram milhares de informações de volume de árvores exploradas e comercializadas nas áreas de MFS atualmente, como o passar do tempo serão milhões. A concessão florestal ocorre em dominialidade de floresta pública, onde o concessionário tem o direito de praticar MFS, mediante processo de licitação, com a obrigação contratual de pagar os *royalties* ao Governo Federal ou Estadual pela exploração de produtos madeireiros e demais serviços em uma UMF (PEREIRA, 2020). Baseado no volume mensurado pelo romaneio de toras que é quantificado o valor a ser pago por madeira (m<sup>3</sup>) produzida para o estado ou federação periodicamente pelas empresas concessionárias. Entre 2010 até setembro de 2022 a arrecadação da concessão florestal foi de R\$ 147.233.420,55 (SFB, 2022), a acurácia das estimativas de volume impacta diretamente o valor arrecadado, pois, havendo por exemplo, superestimativa na predição do volume comercial pré-exploratório a arrecadação por parte dos órgãos governamentais será menor.

Os procedimentos de quantificação de volume das árvores exploradas são padronizados pela legislação pertinente, além de gerenciados e monitorados pelo Serviço Florestal Brasileiro (SFB) nas áreas de concessões federais, a utilização do confiável e robusto banco de dados de volume das árvores oriundos do inventário florestal (pré-exploratório) e do romaneio (pós-exploratório) dessas áreas, permitem avaliar se as estimativas volumétricas que estão sendo desenvolvidas atualmente são precisas e principalmente acuradas, na atividade do manejo florestal, além do uso dessas informações para a busca de ajustes de estimativas volumétricas mais eficientes.

## **1.2. Justificativa**

Há práticas operacionais em mensuração florestal que são possíveis fontes de imprecisões na quantificação do volume comercial na atividade pré-exploratória do MFS, são elas:

- **Uso ou não uso da altura de árvores medidas ou estimadas nas florestas nativas;**

Modelos que incluem altura como variável independente tendem a maior precisão nas estimativas de volume, biomassa ou carbono individual (MARSHALL et al., 2012 ; RUISSHAUSER et al., 2013, NASCIMENTO et al., 2020) do que aqueles que apresentam o diâmetro na altura do peito (*DAP*) apenas como variável independente. Porém, quando esses modelos são aplicados, é comum usar alturas estimadas em vez de alturas medidas nas estimativas volumétricas. Apesar de comum, essa prática é pouco discutida (RUISSHAUSER et al., 2013), e o efeito na acurácia e precisão das estimativas geralmente não é checado na prática posteriormente (NASCIMENTO et al. 2020).

Nas florestas tropicais há dificuldade na mensuração de algumas variáveis, principalmente pela dificuldade de obtenção da altura das árvores por meios indiretos (SEGURA; KANNINEN 2005; COLPINI et al., 2009; CALDEIRA et al., 2016; CYSNEIROS et al., 2017, ALMEIDA et al, 2021). Na atividade do MFS quando se utiliza *ff* ou equações de dupla entrada, a altura comercial é obtida por estimativa visual. A não utilização de aparelhos é justificada pela dificuldade de se operar dentro da floresta nativa (HIRAMATSU, 2008).

O levantamento da variável altura de forma precisa na floresta tropical demanda alto custo e tempo, de forma geral não compensando sua execução (FAO, 1974; SILVA et al., 1984, BAIMA et al., 2001). A dificuldade em se obter estimativas de altura das árvores em florestas nativas de forma acurada e precisa, interfere nos resultados das estimativas de volume comercial (THAINES et al., 2010). Por esses motivos, são necessários cuidados na medição e inserção da altura comercial nos modelos volumétricos, a fim de minimizar os erros nas estimativas (CYSNEIROS et al., 2017; SANTOS et al., 2019). Por isso passou a se utilizar dados de romaneio das árvores exploradas para o ajuste de equações volumétricas, onde, os comprimentos das toras correspondem a altura comercial das árvores (RIBEIRO et al., 2014, ALMEIDA et al., 2021).

Equações volumétricas de simples entrada, em função apenas da variável diâmetro que é coletada de forma direta, sendo de fácil obtenção, é uma das formas usuais para contornar esse problema (BAIMA et al., 2001; HIRAMATSU, 2008, LASSANOVA et al., 2018). Outra forma utilizada é o ajuste de modelos hipsométricos, para posterior aplicação da variável altura estimada nos modelos volumétricos de dupla entrada (NASCIMENTO et al., 2020).

- **Variação da forma geométrica dos fustes das árvores entre as espécies;**

A forma do tronco influencia diretamente na obtenção do volume das árvores (SPURR, 1952; SOARES et al., 2011; CAMPOS; LEITE, 2013; BATISTA et al., 2014; TREVISAN, 2018). Para as essências florestais tropicais, o fuste apresenta as seguintes formas características: cilindro, cone, parabolóide e neilóide; podendo variar de acordo com uma série de fatores, como: características genéticas, espécie, idade, sítio, tratamentos silviculturais (LOETSCH et al., 1973; HUSCH et al., 1982, CYSNEIROS et al., 2017). As formas do fuste variam acentuadamente em florestas nativas tropicais, pois, além dos fatores já relatados, há também competição intra e interespecífica entre as espécies arbóreas e outras formas de vida, como lianas e cipós (CYSNEIROS et al., 2017).

À medida que a forma do fuste se distancia de uma condição regular, a dificuldade aumenta na aplicação de modelos matemáticos para estimativas acuradas do volume (MACHADO et al., 2014). Estudos de volumetria em florestas tropicais mostram que diversos fatores podem influenciar as estimativas volumétricas, com destaque para as variações na forma e dimensão do fuste. Nessas florestas, a grande variação é ocasionada pela diversidade florística e estrutural (AKINDELE; LEMAY, 2006; TREVISAN, 2018).

Na prática empresarial do manejo florestal na Amazônia há ciência de que espécies do gênero *Hymenolobium sp.* (Angelim-Pedra), apresentam fustes cilíndricos acentuados comparado as demais espécies. Em muitos casos, o *ff* preconizado para avaliação da primeira UPA, ou uma equação volumétrica genérica, subestimam os volumes individuais para o gênero, havendo então, demanda de regulação de créditos volumétricos adicionais, por meio da solicitação de Autorização de Utilização de Matéria-Prima Florestal (AUMPF) aos órgãos reguladores (IBAMA, 2019). Como consequência, ocorrem atrasos e custos adicionais para o gerenciamento florestal empresarial, além da legislação ser confusa quanto essa prática.

- **Descarte de partes das árvores na exploração por defeitos naturais nas árvores e imperícias operacionais e metodologia empregada na cubagem rigorosa**

Outro problema, se deve ao fato de haver descarte de parte das árvores exploradas, em função de não apresentarem condições de serem aproveitadas nas serrarias. Oco, rachadura e tortuosidade são os principais motivos de defeitos, as perdas volumétricas podem ser atribuídas às características da floresta tropical, ao estado fitossanitário, ao

tamanho das árvores e as características físico-mecânicas da madeira de cada espécie (LEÃO et al., 2020a). A principal perda de rendimento da madeira no manejo florestal é ocasionada pela existência de oco nas árvores (ALMEIDA et al., 2022).

A cubagem rigorosa é método que quantifica todo o volume real do fuste que vai da base até a primeira bifurcação da árvore (NICOLETTI et al., 2015), não considerando possíveis seções refugadas das árvores durante a exploração (LEÃO, 2020b). Esse fator impede que os descartes de partes das árvores sejam considerados na cubagem rigorosa, ocasionando possíveis imprecisões nas estimativas do volume comercial que será aproveitável de fato no MFS. Foram analisados diferentes comprimentos de seção para cubagem para a estimativa volumétrica da produção madeireira em uma área de manejo florestal na Floresta Nacional do Tapajós a partir do romaneio de toras, foram ajustados 10 modelos matemáticos, para a floresta e para as espécies *Manilkara huberi* (Ducke) *Chevalier* (Maçaranduba), *Lecythis lurida* (Miers) S.A.Mori (Jarana) e *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá), revelando ser adequado o uso do comprimento de toras para o cálculo de volume aproveitável, podendo-se utilizar dados de romaneio para ajuste de modelos volumétricos (RIBEIRO et al., 2014).

Segundo Barreto et al. (2014), quanto maior o número de árvores-amostra, menor é a variabilidade dos dados e consequentemente melhor será a qualidade do ajuste. Pouca atenção tem sido dada ao mínimo de árvores-amostra cubadas para a geração de equações volumétricas (LEÃO et al., 2020b). No método da cubagem rigorosa obter elevado número de árvores-amostra demanda tempo e consequentemente elevado custo (LEAL et al., 2015). Uma alternativa de menor custo seria utilizar o romaneio de toras para o ajuste das equações volumétricas, sendo amplamente realizada por demandar apenas duas pessoas, tomando entre cinco e dez minutos por árvore (RIBEIRO et al., 2014; GOMES et al. 2018). Diversos trabalhos científicos de ajuste de modelos de volume vêm sendo desenvolvidos baseado na cubagem pelo romaneio de toras (HIRAMATSU, 2008; RIBEIRO et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2017; CYSNEIROS, 2017 et al., SANTOS, 2019; LEÃO et al., 2020a, ALMEIDA et al., 2021).

A cubagem e ajustes de modelos de volume realizados a partir dos dados de romaneio de toras, surge como opção para minimizar esses problemas, gerando grande número de árvores mensuradas por espécie ao longo da exploração das UPAs, se aplicado numa mesma UMF, principalmente nas áreas de concessão florestal, onde os contratos são de longa duração. O romaneio de toras considera também de forma indireta as partes descartadas das árvores na cubagem do volume comercial após a exploração.

Naturalmente, modelos volumétricos baseados nesses dados devem apresentar maior realidade prática nas estimativas de volume comercial realmente utilizável por espécie.

- **Utilização de equação de volume genérica ou *ff* único para todas as espécies;**

Ao se considerar o porte das árvores, bem como a diversidade das espécies que compõe os biomas brasileiros, equações de volume deveriam ser ajustadas para espécies individualmente ou espécies agrupadas com características semelhantes para aumentar a acurácia das estimativas volumétricas (SOARES et al., 2011). Conjunto de dados específicos como: área, classe diamétrica e espécie apresentam menor variação possível quando são ajustadas equações de volume, configurando o procedimento mais eficiente para a quantificação da produção volumétrica da floresta (BARROS et al., 2009; SANTOS et al., 2019).

Para a região amazônica, cujo número de espécies é bastante alto e onde associações florestais diferentes ocorrem em áreas muito próximas, não é recomendável utilizar uma equação geral de volume (FERNANDES et al., 1983), cerca de 280 espécies podem ser encontradas em um único hectare (OLIVEIRA; MORI, 1999). A heterogeneidade na composição de espécies e na estrutura constitui um importante desafio no desenvolvimento de funções de volume para florestas tropicais, em que o ajuste de equações por espécie individual é uma das principais formas de contornar essa dificuldade (AKINDELE; LEMAY, 2006). Santos et al. (2019) em um estudo avaliou que não é adequado a atualização de equação geral para estimativas de volume comercial de *Manilkara spp.*, indicando o ajuste de equação de forma específica para o gênero. Outros trabalhos de estimativas volumétricas mais específicos vêm sendo desenvolvidos, como Oliveira et al. (2017) que ajustou equações para a espécie *Couratari stellata* A. C Smith e Almeida et al. (2021) para *Couratari guianensis* Aubl, ambos com a utilização de dados oriundos de romaneio de toras de árvores exploradas da FLONA do Tapajós (PA).

O uso de equações por espécie se justifica também pelo próprio procedimento de créditos de volume da UPA, nos sistemas oficiais de controle após aprovação via licenciamento do órgão regulador, tais como o Sistema Nacional de Controle da Origem dos Produtos Florestais (SINAFLOR). Esse sistema monitora e controla a origem da madeira, sob coordenação, fiscalização e regulamentação do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis (IBAMA). O SINAFLOR foi instituído pela



Instrução Normativa nº 21, de 24 de dezembro de 2014, em observância dos artigos 35 e 36 da Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012.

A Autorização de Exploração Florestal (AUTEX) é o documento emitido pelo órgão ambiental regulamentador (IBAMA) para cada UPA licenciada, contendo uma listagem das espécies autorizadas a explorar, associadas ao respectivo número de árvores e ao somatório do volume comercial estimado, por *ff* ou equações de volume. A AUTEX é emitida após o cadastramento do somatório de volume e número de indivíduos de cada espécie no sistema oficial de controle, gerando assim crédito virtual no SINAFLORE (PEREIRA, 2020). O volume comercial concedido é para o conjunto de indivíduos de cada espécie da UPA, logo o *ff* único ou equação de volume generalista tendem a não serem confiáveis quando aplicados para todas as espécies, havendo grande possibilidade de superestimar e/ou subestimar o volume comercial de acordo com a espécie numa mesma AUTEX, pelos diversos fatores já mencionados neste tópico.

Há grande número de trabalhos acadêmicos disponíveis buscando a melhoria contínua da acurácia das estimativas volumétricas por espécie ou grupo de espécies (FERNANDES et al., 1983; SILVA et al., 1984; HIGUCHI et al., 1985; VANCLAY, 1991; MOURA, 1994; AKINDELE et al. 2006; HIRAMATSU, 2008; OLIVEIRA et al., 2017; CYSNEIRO et al., 2017; SANTOS et al., 2019; ALMEIDA et al., 2021), porém, o que se observa na prática empresarial do MFS, é o uso frequente do  $ff = 0,7$  e de equação volumétrica genérica para a população florestal sob manejo também a partir do segundo POA. Diante disso, o presente trabalho vem responder as seguintes questões:

**Capítulo 1:** As formas de obtenção do volume comercial pré-atividade de exploração, praticadas na atualidade por empresas florestais, são acuradas o suficiente para promover um manejo florestal eficaz?

**Capítulo 2:** É possível obter, com maior acurácia, o volume comercial a partir da combinação de dados do inventário florestal pré-exploratório e romaneio?

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Geral**

- a. Análise da acurácia de estimativas volumétricas em áreas de manejo florestal sustentável empresarial em áreas sob contrato de concessão florestal federal.

## **2.2. Específicos**

- a. Investigar a acurácia das estimativas volumétricas comparando o volume comercial estimado pré-exploratório com o volume comercial explorado para espécies comerciais em unidades de manejo florestal.
- b. Ajustar e propor modelos de razão por gênero, combinando variáveis do inventário florestal e romaneio visando a obtenção de maior acurácia nas estimativas.

## **3. HIPÓTESE**

- a. O volume comercial estimado pré-exploração é igual ao volume comercial explorado nas unidades de manejo florestal.
- b. O volume comercial estimado pré-exploração, por equações hierárquicas de razão, tem desempenho igual ao volume romaneado.

## **4. REVISÃO DE LITERATURA**

### **4.1. Manejo florestal no Brasil**

A Food and Agriculture Organization (FAO) desempenhou papel importante no fomento do manejo florestal nos trópicos. Na década de 50 o conceito de manejo florestal sustentável foi inicialmente introduzido no Brasil com a realização dos primeiros levantamentos florestais, executados por peritos da FAO (HIGUCHI, 1994). O Boletim do Serviço Florestal, N° 6, de 1963 - Inventários Florestais na Amazônia, elaborado por Dammis Heinsdik e Artur de Miranda Bastos, tem um papel marcante na obtenção de dados básicos sobre o volume e a composição florestal na faixa central do Rio Amazonas e seus principais tributários navegáveis. Nesse levantamento foi determinado o  $ff = 0,7$  para todas as árvores e espécies da região amazônica, sendo considerada a altura total ou apenas até os primeiros galhos, conforme o objetivo (HEINSDJIK; BASTOS, 1963).

Esse  $ff$  é utilizado até os dias de hoje na atividade do MFS, inclusive ratificado pela legislação atual (Resolução CONAMA N° 406 de 2009). É importante salientar que o objetivo desse levantamento florestal onde o  $ff$  foi utilizado, era a prospecção de informações de volume e composição florestal para a região amazônica, ainda pouco conhecida na década de 60, onde a precisão e acurácia das estimativas volumétricas por

espécie não possuíam grande importância pelo caráter do levantamento, se comparado com a atividade de MFS, que visa a exploração comercial de madeira. Estimativas volumétricas acuradas e precisas são essenciais para o planejamento financeiro e operacional no MFS (HIRAMATSU, 2008; LIMA, 2015; CYSNEIROS et al., 2017).

Baseado nesses levantamentos e algumas experiências na década de 70 e 80 com destaque para a FLONA do Tapajós (PA) e INPA (AM), dois sistemas de manejo foram desenvolvidos para a região amazônica, o sistema Seleção de Espécies Listadas (SEL), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) (HIGUCHI et al., 1991) e o Sistema Silvicultural Brasileiro para Florestas de Terra Firme da Amazônia (SSB), sugerido por Yared *et al.* (2000), os dois são do tipo policíclico e de uso múltiplo, sendo análogos aos princípios dos sistemas precursores – Malaio e de Shelterwood Tropical –, que utilizam a regeneração natural para garantir os próximos ciclos de corte (AZEVEDO et al., 2008). O sistema silvicultural seletivo na região amazônica opera com ciclos de corte e volumes menores, levando em consideração a baixa incidência de espécies comerciais (FURTADO, 2009).

O conjunto regulatório para o MFS no Brasil é bastante denso, seu principal marco começa em 1965 quando criado o Código Florestal Brasileiro (Lei nº 4.771) que definiu diretrizes gerais para o uso e conservação dos recursos florestais. Em 1986 as operações de corte de madeira foram regulamentadas (Lei nº 7.511). O Instituto Brasileiro para o Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) foi criado em 1989, que por sua vez emitiu a Ordem de Serviço (OS) nº 002/89-DIREN de 07 de agosto de 1989, sendo a primeira medida diretamente relacionada às florestas, diretriz que determinou linhas para a análise de planos de manejo florestais.

A Instrução Normativa (IN) IBAMA nº 080 de 1991 estabeleceu linhas técnicas para elaboração de planos de manejo. No decreto nº 1.282 de 1994 foi derivada a primeira lei do Código Florestal de 1965, que regulamenta o Artigo 15 e refina a IN nº 80 de 1991 sobre planos de manejo. Considerando os avanços alcançados com a pesquisa florestal na Amazônia Brasileira, em 2006 a Instrução Normativa MMA nº 5 estabeleceu diretrizes para procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de PMFS na Amazônia Legal. A Resolução CONAMA nº 406 de 2009 derivada da IN MMA nº 5/2006, também discorre sobre regras para PMFS, que passam a ser iguais em todo o território nacional. A Lei nº 11.284, também de 2006 (Lei de Gestão de Florestas Públicas – LGPF) considerada um marco importante para as concessões florestais no

Brasil, criou o Serviço Florestal Brasileiro (SFB) e Fundo Nacional para o Desenvolvimento Florestal (FNDF).

Apesar dos avanços técnicos e regulatórios no Brasil ao longo do tempo, ainda existem grandes desafios para o MFS. As operações de processamento da madeira e licenciamento para atividade do MFS são altamente burocráticas. A gestão de florestas está associada a vários riscos, como invasão, exploração ilegal, mineração ilegal, incêndios florestais e desmatamento (ITTO, 2021). As empresas devem investir tempo e dinheiro na manutenção da documentação para demonstrar legalidade. Há baixa probabilidade de detectar atividades predatórias ilegais e os infratores muitas vezes recebem apenas pequenas multas. Isso favorece a continuidade de operações criminosas, que exercem pressão para baixar o preço da madeira, penalizando assim as atividades legais (ITTO, 2021).

#### **4.2. Concessão florestal no Brasil**

A Lei de Gestão de Florestas Públicas, ou LGFP (Lei Federal 11.284, de 02/03/2006), quando regulamentada pelo Decreto Federal 6.063/07, gerou grande expectativa para o avanço do setor florestal brasileiro, para a difusão do MFS e aumento da área florestal manejada na Amazônia ao criar modalidades de gestão das florestas públicas para fins de produção madeireira. Dentre as modalidades, o modelo de concessão florestal nasceu para utilização racional das florestas públicas diante de um austero controle e monitoramento do manejo florestal por parte do governo (IFT, 2014).

O Serviço Florestal Brasileiro (SFB) também foi criado por esta lei, com a principal função de administração de florestas públicas. Compete ao SFB criar e gerenciar as Concessões Florestais e gerenciamento do Fundo Nacional de Desenvolvimento Florestal (FNDF), que por sua vez tem a missão de fomentar o desenvolvimento de atividades florestais sustentáveis no Brasil e promover inovação tecnológica no setor. Outra competência importante do SFB é de gerenciar o Sistema de Cadastro Ambiental Rural (SICAR) e coordenar o Cadastro Ambiental Rural (CAR) no âmbito federal e apoiar a sua implementação nas unidades federativas.

A concessão florestal é uma das modalidades de gestão de florestas públicas, que permite que a união, estados e municípios, mediante licitação, concedam a uma pessoa jurídica o direito de uso sustentável, mediante pagamento, das florestas de domínio público para obtenção de produtos e serviços. A floresta concedida permanece em pé, pois os contratos firmados somente permitem a obtenção do recurso florestal por meio

das técnicas de MFS (SFB, 2021). A concessão florestal pode ser entendida como um instrumento econômico que visa o uso sustentável das florestas (RODRIGUES, 2020).

Com base no Plano Anual de Outorga Florestal (PAOF) da União para o ano referência que é possível selecionar e descrever as florestas públicas habilitadas para concessão no período de janeiro a dezembro do ano referência, considerando a convergência e o alinhamento com outras políticas públicas da União, dos estados, dos municípios e do Distrito Federal. O PAOF é um documento previsto na Lei de Gestão de Florestas Públicas que contém a descrição de todas as florestas públicas potencial para realização de concessão florestal no ano de sua vigência.

As concessões federais com contratos assinados no período de 2008 até 2021, são: as Florestas Nacionais (FLONAs) do Jamari (RO), de Jacundá (RO), de Altamira (PA), do Crepori (PA), de Saracá-Taquera (PA), Caxiuanã (PA) e do Amapá (AP). No Brasil as concessões florestais buscam minimizar alguns problemas já conhecidos do manejo florestal nos trópicos, como extração ilegal e falta de estabilidade, a partir de monitoramento rigoroso no intuito de combater a ilegalidade e fomentando licitação de grandes áreas. Contratos de longo prazo e licitações transparentes são alguns dos principais conceitos, garantindo estabilidade ao concessionário florestal ao mesmo tempo que a floresta pública licitada fica ocupada, minimizando assim, ações de invasores. (AZEVEDO-RAMOS, 2015; LIMA, 2020).

Somando áreas com contratos ativos e áreas em processo licitatório, chegamos a 1,8 milhões de hectares aproximadamente, o que representa 14% das áreas prevista até o ano de 2019 pelo governo federal. A produção de madeira em concessões florestais federais é pequena frente à produção da região Amazônica. A produção madeireira nessas áreas no ano de 2018 foi de apenas 221,7 mil m<sup>3</sup>, que corresponde a 2% da produção da Amazônia (RODRIGUES, 2020).

Segundo ITTO (2021) o governo brasileiro não tem sido eficiente no processo de estruturação de concessões florestais. Os contratos das concessões impõem restrições e geram altos custos de operação. É legalmente difícil controlar a invasão, desmatamento e degradação florestal envolvendo extração ilegal de madeira, inclusive nessas áreas. A maioria das empresas concessionárias florestais são de pequeno e médio porte com limitada capacidade de investimento. Além disso, instituições financeiras não aceitam contratos de concessão como garantia, limitando acesso a créditos e financiamento (ITTO, 2021). Apesar das dificuldades e desafios encontrados, com os contratos são de longa duração, um número expressivo de informações relativas ao MFS e Amazônia são

geradas com o avanço das concessões. Por se tratar de áreas florestais públicas, os contratos são gerenciados e monitorados de forma diferenciada, com maior rigor, sendo assim, fonte de dados mais confiáveis para pesquisas, inclusive para o ajuste e análise de estimativas volumétricas.

### **4.3. Estimativas volumétricas em florestas tropicais**

O trabalho percussor sobre cálculos volumétricos na Amazônia foi realizado por Heinsdijk e Bastos (1963), que determinou um  $ff$  de 0,7 para todas as árvores e espécies da região. Embora da década de 60, esse valor de  $ff$  tem sido amplamente utilizado nos dias de hoje, principalmente para determinar o volume em áreas que ainda não possuem equações de volume (HIRAMATSU, 2008).

Na década de 80, Fernandes et al. (1983) desenvolveu tabela regional para estimar os volumes comerciais de fustes de árvores em pé, para um grupo de espécies madeireiras que ocorrem na Estação Experimental de Silvicultura Tropical do INPA e áreas adjacentes, testando três modelos, onde o de Schumacher-Hall apresentou melhores resultados. A partir da demanda de informações acerca de relações quantitativas para a Floresta Nacional do Tapajós, Estado do Pará, Silva et al. (1984) ajustou equações de volume para Andiroba (*Carapa guianensis*), Abiurana (diversos gêneros), Jutaí-açu (*Hymenaea courbaril*), jarana (*Holopyxidium jarana*), Ucuuba-da-terra-firme (*Virola sp.*), Taxi-vermelho (*Sclerolobium chrysophyllum*), Maçaranduba (*Manilkara huberi*), além de equações gerais para as demais espécies.

Pode ser percebido que, desde os estudos desenvolvidos nesta década, havia o entendimento que as estimativas deveriam ser a nível de espécie, gênero ou grupo de espécies na Amazônia, Higuchi et al. (1985), também, na mesma linha pesquisa desenvolveu equações de volume comercial para cada árvore, individualmente. Todos os modelos usaram  $DAP$  e  $hc$  para estimar o volume. Vários modelos foram testados e os 4 melhores foram selecionados. Os modelos volumétricos também foram apresentados para as 3 famílias botânicas abundantes da floresta amazônica de forma separada.

Considerando a realidade das florestas tropicais, foi sugerido a abordagem por grupos de espécies como sendo a mais adequada numa floresta tropical localizada Austrália, pois, além de reduzir o número de equações, minimiza-se problemas de insuficiência de dados de indivíduos por espécie (VANCLAY, 1991). No Brasil, Moura (1994) ajustou modelos matemáticos para estimativas volumétricas e expressão da forma do fuste de várias espécies florestais da Amazônia brasileira, neste estudo foi concluído

que não houve uma única equação de volume ajustada no trabalho que atenda de modo satisfatório a todas as espécies.

No começo dos anos 2000 com a maior facilidade de acesso à tecnologia, Baima et al. (2001) afirma em suas conclusões que equações de volume são fáceis de desenvolver com os recursos modernos da computação e, portanto, deveriam ser práticas recorrentes. Ficando evidente a crítica aos técnicos da área florestal no Brasil pela falta de ajustes de equação de volume para o MFS na prática empresarial. Seus resultados mostram que as equações de simples entrada são mais indicadas para estimativas de árvores em pé da floresta amazônica, pela facilidade e maior precisão na mensuração da variável diâmetro. Akindele e Lemay (2006) agruparam espécies comerciais para o desenvolvimento de equações de volume em florestas tropicais na Nigéria, na busca de estimativas volumétricas mais acuradas e contornar o problema de insuficiência de dados.

Já com a facilidade tecnológica, Hiramatsu (2008) utilizou um grande número de dados oriundo do romaneio de toras de uma área de MFS explorada na Amazônia. Neste trabalho, foi comparado o ajuste de equações de volume de simples e dupla entrada, sendo incluso no ajuste das equações de dupla entrada o erro obtido pelo uso da altura comercial obtida visualmente em 7 agrupamentos. O primeiro agrupamento foi formado pelos dados de todas as 25 espécies nativas e os demais 6 agrupamentos por espécies, todas da região amazônica (*Hymenolobium petraeum*; *Dinizia excelsa*; *Dipteryx odorata*; *Hymeneae courbaril*; *Roupala montana*; *Manilkara huberi*). Os resultados observados foram que as equações de simples entrada, apresentaram melhores estatísticas de ajuste que as de dupla entrada para os agrupamentos de todas as espécies, e para 5 das 6 espécies analisadas de forma individualizada.

Cysneiros et al. (2017) testou abordagem multivariada em dois estágios, com análises de agrupamento e discriminante, para a formação de grupos de espécies da região amazônica e ajuste de modelos volumétricos, utilizando dados de romaneio da concessão florestal federal na Floresta Nacional do Jamari. Deixando claro em suas avaliações que a abordagem multivariada proposta é adequada para composição de grupos de espécies comerciais da Amazônia na busca de estimativas mais confiáveis.

Santos et al. (2019) avaliou a eficiência de equações específicas para *Manilkara spp.* em diferentes Unidades de Produção Anual (UPA) e em diferentes classes diamétricas, comparando-as com uma equação geral. Recomendando em suas conclusões a utilização de equações específicas, pois, geram estimativas mais precisas dos volumes comerciais para o gênero. Almeida et al. (2021), ajustou equações para a espécie

*Couratari guianensis* Aubl., os modelos de Schumacher-Hall e Spurr apresentaram os melhores resultados. Ambos os trabalhos foram desenvolvidos utilizando dados de romaneio de toras oriundos da exploração florestal sob regime de MFS na FLONA Tapajós.

Como pode ser observado, desde a década de 80 continua se buscando nos trabalhos científicos o ajuste de equações por espécie ou grupo de espécies, pela grande diversidade das florestas tropicais entre outros fatores. A partir dos anos 2000 é questionado a forma que a variável altura é utilizada no MFS, além do uso dos dados de romaneio de toras oriundos da exploração como dados de árvores cubadas para o ajuste de equações volumétricas. Porém, existe uma evidente distância do conhecimento científico que é produzido sobre estimativas de volume para o que é aplicado na prática empresarial no MFS no Brasil, uma vez que, é observado frequentemente o uso do  $ff = 0,7$  e de equação volumétrica genérica para todas as espécies, geralmente de dupla entrada, desconsiderando as imprecisões do uso da variável altura. O uso de dados de romaneio é outro componente importante que ainda não é utilizado como deveria na prática empresarial para análise e predições volumétricas.

#### **4.4. Modelos de razão**

O volume total do caule da árvore, quando expresso em uma unidade de área, é um bom indicador da quantidade de madeira existente em uma região. Quando relacionado à idade, fornece alguma ideia da capacidade e produtividade da terra. Os estudos de crescimento e rendimento geralmente são baseados no volume total da árvore, porém, esta medida não fornece informações da quantidade de madeira para um determinado padrão de utilização do tronco (ALEMDAG, 1988). Os silvicultores usam equações de volume padrão para estimar o volume de árvores em pé através da medida do diâmetro na altura do peito (*DAP*) e altura total ou comercial. Essas equações de volume geralmente fornecem estimativas dos troncos das árvores da altura do toco até um diâmetro superior fixo. No entanto, determinados padrões de comercialização exigem estimativas de volume em diferentes segmentos dos troncos, em diferentes diâmetros ao longo do comprimento da árvore. A abordagem para resolver o problema tem sido prever o volume para vários diâmetros com os modelos de razão (BURKHART, 1977). O principal objetivo desses modelos foi desenvolver um sistema para preparar equações para a previsão do volume comercial nas diferentes seções da árvore. Em segundo plano,



equações de afilamentos são derivadas (ALEMDAG, 1988), nesse contexto os modelos de razão foram utilizados principalmente entre as décadas de 60 e 90.

Numerosos estudos de equações de razão e afilamentos são derivados dos estudos do volume comercial, várias formas foram desenvolvidas especialmente nos últimos 50 anos, a partir de modelos de cone simples (KOZAK et al. 1969, ORMEROD 1973, HILT 1980), modelos polinomiais segmentados (BRUCE et al. 1968, MAX; BURKHART 1976, CAO et al. 1980), e geometria (PARRESOL; THOMAS 1996, FANG; BAILEY 1999, ZHANG et al. 2002). Newnham (1988) afirma que há duas razões para o estudo contínuo nesse sentido: 1) porque nenhuma teoria desenvolvida explica a variação na forma do caule para todos os tipos de árvores, e 2) como método de estimativa de volume, uma única equação de afilamento pode estimar tanto a árvore total quanto o volume comercial do tronco. Se a forma da árvore puder ser descrita com precisão, então volume para qualquer limite de comercial pode ser previsto com precisão. Clutter (1980) mostrou que, para determinada equação de razão do volume comercial, há intrinsecamente definida uma função de afunilamento e ainda afirmou “A exatidão e precisão de tais funções de conicidade dependem da exatidão e precisão das equações das quais são derivados os volumes do produto comercializável”.

Para determinar o volume comercial, por exemplo o volume do toco a um limite superior fixo de altura ou diâmetro do fuste, são usadas equações de razão de volume (relação entre volume total e volume até o limite do fuste comercial especificado). Várias formas, com o limite comercial especificado pelo diâmetro ou pela altura, foram desenvolvidas (BURKHART, 1977; CAO; BURKHART; MAX, 1980; BI, 1999). Uma equação de razão de volume ajustada para prever apenas o volume comercial definido é mais precisa do que uma equação de afilamento (CAO; BURKHART; MAX, 1980). As equações de razão de volume são melhores porque as equações de afilamentos são ajustadas para obter os resultados mais precisos de diâmetro (que são usados para calcular o volume de várias seções da árvore), enquanto as equações de razão de volume são ajustadas com o único propósito de otimizar a previsão do volume comercial para determinado limite do fuste (MATNEY; SULLIVAN, 1982).

Ajustes de modelos de razão e afilamentos são aplicados geralmente em florestas plantadas ou florestas temperadas, onde há pouca variação da idade entre as árvores. No Brasil os estudos nesse sentido em sua maioria são para plantios dos gêneros *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. (FIGUEREDO-FILHO et al., 1996; MENON, 2006). No bioma amazônico não é comum a utilização, por se tratarem de florestas inequiâneas, com

abundância de espécies de diferentes formas e tamanhos. Dos Reis (1998) desenvolveu modelos de razão na busca de maior acurácia nas estimativas de biomassa para árvores na Amazônia, no entanto, o desenvolvimento de modelos de razão para estimativas de volume é escasso para o bioma.

## 5. REFERÊNCIAS

AKINDELE, S. O.; LEMAY, V. M. Development of tree volume equations for common timber species in the tropical rain forest area of Nigeria. **Forest Ecology and Management**, n. 226, p. 41 – 48. 2006.

ALEMDAG I.S. A ratio method for calculating stem volume to variable merchantable limits, and associates taper equations. **The Forestry Chronicle**, v. 64, n.4, p18-26, 1988.

ALMEIDA, B. R. S., CRUZ, G. S., NICOLETTI, M. F., GAMA, J. R. V., LIMA, B. A., & PECH, T. M. (2021). Eficiência de equações volumétricas para *Couratari guianensis* aubl. em diferentes cenários na floresta nacional do tapajós. **Scientia Forestalis**, 49(130), E3503.

ALMEIDA, V. B.; SILVA, J. N. M.; STEINBRENNER, M. K. A. Impacto da ocorrência de árvores ocas no rendimento da colheita de madeira na Floresta Nacional de Saracá-Taquera, Pará. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 42, 2022.

AMARAL P., VERÍSSIMO A., BARRETO P., VIDAL E. Floresta para sempre: um anual para produção de madeira na Amazônia. Belém: **IMAZON, WWF E USAID**. 1998. 137 p.

AVILA, A., SCHWARTZ, G., RUSCHEL, A.R., CARMO LOPES, J., SILVA, J.N.M., PEREIRA DE CARVALHO, J.O., DORMANN, C.F., MAZZEI, L., HOFMANN MOTA SOARES, M., BAUHUS, J., 2017. Recruitment, growth and recovery of commercial tree species over 30 years following logging and thinning in a tropical rain forest. **Forest Ecology and Management**, 385, 225–235.

AZEVEDO, C. P.; SANQUETTA, C. R.; SILVA, J. M. N.; MACHADO, S. A. Efeito de diferentes níveis de exploração e de tratamentos silviculturais sobre dinâmica da floresta remanescente. **Floresta**, v. 38, n. 2, p. 277-293, 2008.

AZEVEDO-RAMOS, C., SILVA, J. N. M., MERRY, F. The evolution of Brazilian forest concessions. *Revista Elementa: Science of the Anthropocene.*, 3(48), 1-8. 2015.

BAIMA, A. V.; SILVA, S. M. S.; SILVA, J. N. M. EQUAÇÕES DE VOLUME PARA FLORESTA TROPICAL DE TERRA FIRME EM MOJU, PA. IN: SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P.; YARED, J. A. G. (EDS). *A silvicultura na amazônia oriental: contribuições do projeto silvicultura tropical. (EMBRAPA/DFID). VOL. 2. EMBRAPA Amazônia Oriental, Belém. p. 367-392. 2001.*

BARRETO, W. F.; LEÃO, F. M.; MENEZES, M. C.; SOUZA, D. V. Equação de volume para apoio ao manejo comunitário de empreendimento florestal em Anapu, Pará. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 80, p. 321 – 329, 2014.

- BARROS, P. L. C.; SILVA JÚNIOR, A. T. Equação de volume para árvores de uma floresta tropical densa no Município de Anapu, Oeste do Estado do Pará, Amazônia Oriental. **Revista De Ciências Agrárias**, Belém, v. 51, n. 1, p.115-126, 2009.
- BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z.; SILVA FILHO, D. F. Quantificação de recursos florestais: árvores, arvoredos e florestas. 1º ed. São Paulo: **Oficina De Textos**, 2014. 384 p.
- BI, H. Predicting stem volume to any height limit for native tree species in Southern New South Wales and Victoria. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 29, p. 318-331. 1999.
- BRUCE, D., R.O. CURTIS, AND C. VANCOEVERING. Development of system and taper volume tables for red alder. **Forest Science**, v.14, n. p. 339 –350. 1968.
- BURKHART, H. E. Cubic-foot volume of loblolly pine to any merchantable top limit. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 1, n. 2, p. 7-9, 1977.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. Mensuração florestal: perguntas e respostas. 4. ed., atualizada e ampliada. VIÇOSA-MG, **Editora UFV**, 2013, 605 p.
- CALDEIRA, G.V., MAMORÉ, F. M. D., SILVA, R., GAVA, F. H., FAVALESSA, C. M. C., MORA, R., & DRESCHER, R. (2016), Volume equations for *Qualea paraenses* and *Erismia uncinatum* in The North of Mato Grosso State, Brazil, **Nativa (Sinop)**, 4(4), 249-255.
- CAO, Q.V., AND H.E. BURKHART. Cubic-foot volume of loblolly pine to any height limit. **Southern Journal of Applied Forestry**. 4:166 –168. 1980.
- CAO, Q.V., H.E. BURKHART, AND T.A. MAX. Evaluation of two methods for cubic-volume prediction of loblolly pine to any merchantable limit. **Forest Science**, 26 p. 71– 80. 1980.
- CLUTTER, J.L. Development of taper functions from variable- top merchantable volume equations. **Forest Science**, 26:117–120. 1980.
- COLPINI, C., TRAVAGIN, D. P., SOARES, T. S., & MORAES E SILVA, V. S., (2009), Determinação do volume, do fator de forma e da porcentagem de casca de árvores individuais em uma floresta ombrófila aberta na região noroeste de mato grosso, **Acta Amazonica**, 39(1), 97-104, <http://dx.doi.org/10.1590/s0044-59672009000100010>,
- CYSNEIROS, V. C.; PELISSARI, A. L.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; SOUZA, L. Modelos genéricos e específicos para estimativa do volume comercial em uma floresta sob concessão na Amazônia. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 114, p. 295-304, 2017.
- DOS REIS, A. E. Modelos de razão para estimar a biomassa de árvores individuais da florestatropical úmida de terra-firme da Amazônia brasileira. **Revista Árvore**, v. 22, n. 2, p. 163-177, 1998.

FANG, Z., AND R.L. BAILEY. Compatible volume and taper models with coefficients for tropical species on Hainan Island in southern China. **Forest Science**. 45:85-100. 1999.

FAO - Food and Agriculture Organization. **Manual de inventário florestal con especial referencia a los bosques mixtos tropicales**. Roma, 1974. 195 p.

FAO - Food and Agriculture Organization. **Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report**. Roma, 2020. Disponível em: <<https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca9825en>. (acesso em: 29 out. 2020).

FERNANDES, N. P., JARDIM, F. C. S.; HIGUCHI, N. Tabelas de volume para a floresta de terra-firme da estação experimental de silvicultura tropical. **Acta Amazonica**, v. 13, n. 3/4, p. 537-545, 1983.

FIGUEIREDO, E. O; BRAZ, E. M.; OLIVEIRA, M. V. N. D>. (ED.). Manejo de precisão em florestas tropicais: modelo digital de exploração florestal. Rio Branco, **AC: EMBRAPA Acre**, 2007. 183 p.

FIGUEIREDO-FILHO, A. et al. Taper equations for Pinus tueda plantations in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 83, n.1, p. 39-46, 1996.

FURTADO, S. C. Dinâmica de uma floresta sob regime de manejo sustentável em escala empresarial na Amazônia ocidental. Tese (Doutorado em Ciências de Florestas Tropicais) – **Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia**, Manaus, p. 88, 2009.

HEINSDIJK, D.; BASTOS, A. M. Inventários florestais na Amazônia. **Boletim do serviço florestal**. 6: p. 1-100, 1963.

HIGUCHI, N.; RAMM, W. Developing bole wood volume equations for a group of tree species of central Amazon (Brazil). **Commonw. For. Rev.**, v. 64, n. 1, p. 33-41. 1985.

HIGUCHI, N. Short-term growth of an undisturbed tropical moist forest in the Brazilian Amazon. 1987. 129 p. Phd thesis. **Michigan State University**.

HIGUCHI, N.; VIEIRA, G.; MINETTE, L. J.; FREITAS, J. V.; JARDIM, F. C. S. Sistema sel (seleção de espécies listadas) para manejar a floresta tropical úmida de terra-firme da amazônia in: Val, A.L.; Friglioulo, R.: Friglioulo e E. Feldberg, (eds). Bases científicas para estratégias de preservação e desenvolvimento da Amazônia: fatos e perspectivas. Manaus: **INPA**, 1991. V. 1, p. 197-206.

HIGUCHI, N. Utilização dos recursos madeireiros das florestas tropicais úmidas. **Acta Amazônica**, v. 24, n. 3-4, p. 275-288, 1994.

HILT, D. E. Taper-based system for estimating stem volumes of upland oaks. Res. Pap. NE-458. Broomall, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, **Northeastern Forest Experiment Station**. p.12, 1980.

HIRAMATSU, N. A. Equações de volume comercial para espécies nativas na região do Vale do Jari, Amazônia Oriental. 2008. 107 p. Dissertação de Mestrado, **Universidade Federal do Paraná**, Curitiba.

HUSCH, B; MILLER, C. L.; BEERS, T. E. **Forest Mensuration**. 3. ed. New York: J. Willey e Sons, 1982. 397 p.

IFT - Instituto Floresta Tropical. Manejo florestal e exploração de impacto reduzido em florestas naturais de produção da Amazônia. **Informativo técnico do IFT 1**. Belém: IFT, 2012. Disponível em: <<http://www.ift.org.br/>>. (acessado em 29/10/2021.)

IMAFLOTA. **Timberflow: a plataforma da madeira**. 2021. Disponível em: <<http://timberflow.org.br/#!>>. (acesso em: 29 out. 2021).

ITTO - International Tropical Timber Organization. (2011). Status of tropical forest management 2011. **Technical series, n. 38**. Available from: <<https://www.itto.int/sfm/>>. (acessado em 29/10/2021).

ITTO - International Tropical Timber Organization. (2021). Fiscal And Non-Fiscal Incentives For Sustainable Forest Management. **Technical series, n. 48**. Available from: <[https://www.itto.int/technical\\_report/](https://www.itto.int/technical_report/)>. (acessado em 29/10/2021).

KOZAK, A., D.O. MUNRO, AND J.H.G. SMITH. Taper functions and their application in forest inventory. **The Forestry Chronicle**, v. 45, n. 4, p. 278 –283. 1969.

LANSSANOVA, L. R.; SILVA, F. A.; SCHONS, C. T.; PERERIRA, A. C. D. S. Comparação entre diferentes métodos para estimativa volumétrica de espécies comerciais da Amazônia. **Biofix Scientific Journal**, Paraná, v. 1, n. 1, p. 109-115, 2018.

LEAL, F. A.; CABACINHA, C. D.; CASTRO, R. V. O.; & MATRICARDI, E. A. T. Amostragem de árvores de Eucalyptus na cubagem rigorosa para estimativa de modelos volumétricos. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 33, p. 91-103, 2015.

LEÃO, F.M., MIRANDA, I.S., SANTOS, G.C.A., EMMERT, F., NASCIMENTO, R.G.M., 2020 a. Comparison of different methods of measuring tree volumes in the Municipality of Anapu, Pará, Brazil. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 50, n. 3, p. 1457 – 1466.

LEÃO, F.M., NASCIMENTO, R.G.M., EMMERT, F., SANTOS, G.C.A., CALDEIRA, N.A.M., MIRANDA, I.S., 2020 b. How many trees are necessary to fit an accurate volume model for the amazon forest? A site-dependent analysis. **Forest Ecology and Management**.

LIMA, F. B. Determinantes da viabilidade financeira no investimento em concessões florestais. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – **Universidade de Brasília**, Brasília, p. 67, 2020.

LIMA, R. C. Equações para estimativas de biomassa de uma floresta tropical úmida do amapá. 2015. 50 p. Dissertação de Mestrado, **Universidade Federal Rural de Pernambuco**, Recife.

LOETSCH, F.; ZÖHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest Inventory**. Munich: Blv, 1973. 469p.

MACHADO, S. A. E FIGUEIREDO-FILHO, A. Dendrometria. 3a Edição. Universidade Estadual do Centro-Oeste, **Guarapuava**, 2014. 316 p.

MATNEY, T.G., AND SULLIVAN, A.D. Variable top volume and height predictors for Slash pine trees. **Forest Science**, v. 28, n. 2, p. 274-282. 1982.

MARSHALL, A.R., WILLCOCK, S., PLATTS, P.J., LOVETT, J.C., BALMFORD, A., BURGESS, N.D., LATHAM, J.E., MUNISHI, P.K.T., SALTER, R., SHIRINA, D.D., LEWIS, S.L., 2012. Measuring and modelling above-ground carbon and tree allometry along a tropical elevation gradient. **Biol. Conserv. Amsterdam** 154, 20–33.

MAX, T.A., AND H.E. BURKHART. Segmented polynomial regression applied to taper equations. **Forest Science** 22:283–289. 1976.

MEDJIBE, V. P., PUTZ, F. E., STARKEY, M. P., NDOUNA, A. A., & MEMIAGHE, H. R. (2011). Impacts of selective logging on above-ground forest biomass in the monts de cristal in Gabon. **Forest Ecology and Management**, 262(9), 1799-1806.

MENON, M. U. Ajuste dos modelos de Kozak e do sistema Burkhart e Cao para plantações de Pinus oocarpa. **Ambiência**, v. 2, n. 2, p. 197-205, 2006.

MMA. **Ministério do Meio Ambiente**. Instrução normativa nº. 5, de 11 de dezembro de 2006. “dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de planos de manejo florestal sustentável - pmfs nas florestas primitivas e suas formas de sucessão na Amazônia legal, e dá outras providências”. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/pnf/\\_arquivos/in%20mma%2005-06.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/pnf/_arquivos/in%20mma%2005-06.pdf)>. Acesso em: 02 nov. 2021.

MOURA, J. B. Estudo de forma do fuste e comparação de métodos de estimativa volumétrica de espécies florestais da Amazônia Brasileira. 1994. 114 p. Dissertação de mestrado, **Universidade Federal do Paraná**, Curitiba.

NASCIMENTO, R. G. M. et al. The tree height estimated by non-power models on volumetric models provides reliable predictions of wood volume: The Amazon species height modelling issue. **Trees, Forests and People**, v. 2, n. June, p. 100028, 2020.

NEWNHAM, R.M. A variable-form taper function. **Petawawa National Forestry Institute**. Information Rep. PI-X-83, 33 p. 1988.

NICOLETTI, M. F.; BATISTA, J. L. F.; CARVALHO, S. D. P. C.; CASTRO, T. N.; HESS, A. F. Exatidão de dendrômetros ópticos para determinação do volume de árvores em pé. **Ciência florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 2, p. 395-404, 2015.

OLIVEIRA, A.A.D., MORI, S.A., 1999. A central Amazonian terra firme forest. I. High species richness on poor soils. **Biodivers. Conserv.** 8, 1219–1244

OLIVEIRA, R, C, RODE, R, GAMA, J, R, V, & ALMEIDA, E, C. (2017). Equações volumétricas para *Couratari stellata* A.C. Smith (Tauarí) na Floresta Nacional do Tapajós, **Nativa (Sinop)**, 5(2), 139-144.

ORMEROD, D.W. A simple bole model. **The Forestry Chronicle**. 49:136 –138. 1973.

PEREIRA, D. C. P. Produção e rendimento da exploração em florestas públicas e privadas na Amazônia Oriental. 2020. 49 p. Dissertação de mestrado, **Universidade Federal Rural da Amazônia**, Belém.

- PARRESOL, B.R., AND C.C. THOMAS. A simultaneous density- integral system for estimating stem profile and biomass: Slash pine and Willow Oak. **Canadian Journal Forest Research**. 26:773–781. 1996.
- PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. Mensura Forestal. San José, Costa Rica. GTZ, IICA. 1997, 586 p.
- PUTZ, F.E., ZUIDEMA, P., SYNNOTT, T., PEÑA-CLAROS, M., PINARD, M.A., SHEIL, D., VANCLAY, J. K., SIST, P., GOURLET-FLEURY, S., GRISCOM, B., PALMER, J., ZAGT, R., 2012. Sustaining conservation values in selectively logged tropical forests: the attained and the attainable. **Conservation Letters**, 5, 296–303.
- 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**, Lavras, v. 20, n. 4, p. 605-612, 2014.
- RODRIGUES, M. I. O manejo florestal na Amazônia e a viabilidade financeira dos ciclos de corte. Tese (doutorado em Ciências Florestais) – **Universidade de Brasília**, Brasília, p. 125, 2020.
- RUTISHAUSER, E., NOOR'AN, F., LAUMONIER, Y., HALPERIN, J., RUFIE HERGOUALC'H, K., VER- CHOT, L., 2013. Generic allometric models including height best estimate forest biomass and carbon stocks in indonesia. **Forest Ecology and Management**. Amsterdam 307.
- SANTOS, M.F.; FILHO, A.F, GAMA, J.R.V, RETSLAFF, F.A.S, COSTA, D.L., GOMES, K.M.A.; CRUZ, G. S.; ALMEIDA, B.R.S., 2019. Eficiência de equações volumétricas para *Manilkara* spp. Em floresta manejada na Amazônia Oriental. **Nativa**, Sinop, v. 7, n. 5, p. 621-628.
- SASAKI, N., ASNER, G. P., PAN, Y., KNORR, W., DURST, P. B., MA, H. O., ... & PUTZ, F. E. (2016). Sustainable management of tropical forests can reduce carbon emissions and stabilize timber production. **Frontiers in Environmental Science**, 4, 50.
- SCHWARTZ, G., PENA-CLAROS, M., LOPES, J. C. A., MOHREN, G. M. L., KANASHIRO, M. Mid-term effects of reduced-impact logging on the regeneration of seven tree commercial species in the Eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 274, p. 116-125,2012.
- SEGURA, M. & KANNINEN, M, (2005). Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. **Biotropica**, 37(1), 2-8.
- SFB - Serviço Florestal Brasileiro. (2012). **Guia para medição de produtos e subprodutos florestais madeireiros das concessões florestais**. Brasília - DF.
- SFB - Serviço Florestal Brasileiro. (2021). **Sistema nacional de informações florestais**. Brasília - DF. Disponível em: < <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/concessao-florestal>>. (acessado em 29/10/2021).
- SFB - Serviço Florestal Brasileiro. (2022). **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Brasília – DF. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt->

br/assuntos/servico-florestal-brasileiro/concessao-florestal/valores-arrecadados>. (acessado 10/11/2022).

SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P.; LOPES, J. C. A.; CARVALHO, M. S. P. DE; Equações de volume para a Floresta Nacional do Tapajós. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 8/9, p. 50-63, 1984.

SIST, P. et al. Sustainability of Brazilian forest concessions. **Forest Ecology and Management**, v. 496, n. March, p. 119440, 2021.

SNIF - **Sistema Florestal de Informação Florestal**. 2020. Disponível em: <[https://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/boletim\\_snif\\_ed1\\_2020\\_vfinal.pdf](https://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/boletim_snif_ed1_2020_vfinal.pdf)>. (acesso em: 29 out. 2021).

SOARES, C. P. B. et al. Equações hipsométricas, volumétricas e de taper para onze espécies nativas. **Revista Árvore**, v. 35, n. 5, p. 1039-1051, 2011.

SPURR, S. H. Forestry inventory. **Ronald Press**, New York. 1952, 476 p.

THAINES, F.; BRAZ, E. M.; MATTOS, P. P.; THAINES, A. A. R. Equações para estimativa de volume de madeira para região da bacia do Rio Ituxi, Lábrea, AM. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 64, p. 283-289, 2010.

TREVISAN, É. F. Equações de volume para Região Sul do Estado do Amazonas. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) - **Universidade Federal Do Amazonas**, p. 54, 2018.

VANCLAY, J.K., 1991. Aggregating tree species to develop diameter increment equations for tropical rainforests. **Forest Ecology and Management**, n. 42, p. 143–168. 1991.

VERÍSSIMO, A., BARROS, A. C., SOUZA JR., C., UHL, C., VIDAL, E., VIEIRA, I. C. G., MATTOS, M. M., ET AL. 1996. A expansão madeireira na Amazônia: impactos e perspectivas para o desenvolvimento sustentável no Pará. (A. C. BARROS & A. VERÍSSIMO, EDS.) (2ª ed., p. 166). Belém: **IMAZON**.

YARED, J. A. G.; CARVALHO, J. O. P.; SILVA, J. N. M.; KANASHIRO, M.; MARQUES, L. C. T. Contribuições do projeto silvicultura tropical: cooperação internacional Brasil/Reino Unido. Belém. **EMBRAPA Amazônia oriental/defid**. 2000. 28 P. (Documentos, N. 52).

ZHANG, Y., B.E. BORDERS, AND R.L. BAILEY. Derivation, fitting and implication of a compatible stem taper-volumeweight system for intensively managed, fast growing loblolly pine. **Forest Science**, 48:595– 607. 2002.



## **CAPÍTULO 1: ANÁLISE DA ACURÁCIA DO VOLUME COMERCIAL ESTIMADO EM UNIDADES DE MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL**

### **Resumo:**

A Amazônia possui uma gama de espécies com alto potencial para exploração sustentável de madeira, mas para que sejam utilizadas pela sociedade internacional é necessário quantificar com acurácia o volume de madeira comercial. Porém, desde a década de 50, métodos inadequados para estimar os volumes de madeira comercial ainda são empregados na Amazônia, e alguns deles ainda são exigidos pelos órgãos governamentais brasileiros. No entanto, a variabilidade natural da Floresta Amazônica proporciona uma abundância de espécies de diferentes tamanhos e formas, conferindo diversas peculiaridades, o que torna necessário o uso de métodos atuais e acurados de quantificação de madeira no manejo da Floresta Amazônica. Devido ao uso de abordagens inadequadas para estimativa de volume, este trabalho teve como objetivo analisar as discrepâncias entre os volumes de madeira comercial estimado pelo inventário florestal e o volume comercial explorado, em diferentes áreas concessionadas para manejo florestal sustentável. Foi utilizada a abordagem de modelos mistos para avaliar as tendências entre volume inventariado e explorado para diferentes gêneros comerciais e áreas florestais. Para avaliar a similaridade entre os volumes obtidos durante as fases de pré e pós-exploração realizamos teste de equivalência. Foi calculado para o volume comercial o erro quadrático médio e bias percentual como métricas de acurácia. As diferenças entre as alturas foram avaliadas a partir do erro médio percentual. Os resultados demonstraram uma forte tendência do inventário florestal 100% em superestimar o volume comercial de madeira comercial, independente do gênero e da área manejada. Há uma discrepância significativa entre os volumes inventariados e explorados em diferentes áreas destinadas ao manejo florestal sustentável, nas quais, apenas 22% dos grupos avaliados foram equivalentes. As formas de obtenção do volume comercial pré-atividade de exploração, praticadas na atualidade por empresas florestais, não são acuradas o suficiente para promover o manejo florestal sustentável na Amazônia, e podem servir como facilitadores da madeira ilegal e do crime organizado na região.

Palavras-chave: Validação de Modelo; Manejo Florestal Sustentável; Modelagem de Efeitos Mistos; Madeira ilegal

**Abstract:** The Amazon has a range of species with high potential for sustainable timber harvesting, but for them to be used by international society, it is necessary to quantify the merchantable wood volume accurately. However, since the fifties, inadequate methods for estimating merchantable timber volumes are still employed in the Amazon, and some of them are still required by Brazilian Government agencies. However, the natural variability of the Amazon Forest provides an abundance of species of different sizes and shapes, conferring several peculiarities, which makes it necessary to use actual and precise methods for timber quantification in the Amazon Forest management. Due to the use of inadequate approaches for estimating volume, this work aimed to analyse the discrepancies between harvested and estimated merchantable wood volume by the forest inventory during the harvesting operation phase in five different public forest areas under concession for sustainable forest management. Mixed effect models approach was used to evaluate trends between inventory and harvested volume merchantable for genera and forest regions. To assess the similarity between the volumes obtained during the pre- and post-exploitation phases, an equivalence test was performed. The root mean square error and percentage bias were calculated for merchantable volume as accuracy metrics. Differences between heights were evaluated using the mean percentage error. There was a strong tendency for the 100% forest inventory to overestimate merchantable wood volume, regardless of genus and managed area. There was a significant discrepancy between the volumes inventoried and harvested in different regions intended for sustainable forest management, in which only 22% of the groups evaluated were equivalent. The methods currently practised by forest companies for determining pre-harvest merchantable volume are not accurate enough to promote sustainable forest management in the Amazon. They may serve as facilitators of the region's illegal timber and organised crime.

**Keywords:** Model Validation; Sustainable Forest Management; Mixed Effect Modelling; Illegal Timber

## 1. INTRODUÇÃO

As áreas florestais da Bacia Amazônica ocupam aproximadamente 5 milhões de km<sup>2</sup>, abrigando uma enorme quantidade de recursos florestais e uma vasta biodiversidade (BREDIN; PERES; HAUGAASEN, 2020). A produção de madeira tropical na floresta amazônica é uma das principais atividades econômicas desenvolvidas na região e o manejo dos recursos florestais é um desafio complexo (BRANCALION et al., 2018; FERREIRA DA SILVA et al., 2020). Uma das principais ferramentas para o uso sustentável das florestas é o manejo florestal sustentável (MFS) (FERREIRA DA SILVA et al., 2020). O MFS tem como objetivo reduzir o impacto das técnicas de exploração madeireira para assegurar o uso sustentável dos recursos florestais durante o corte seletivo de árvores comerciais (CYSNEIROS ET AL., 2017; BRANCALION ET AL., 2018; DOS SANTOS et al., 2020; LEÃO et al., 2021). Dentro desta perspectiva, o MFS deve fornecer medidas precisas e acuradas do volume de madeira a ser explorado (LEÃO et al., 2021). No entanto, a variabilidade natural da floresta amazônica proporciona uma abundância de espécies de diversos tamanhos e formas, conferindo diversas peculiaridades (BREDIN; PERES; HAUGAASEN, 2020), o que dificulta a utilização de fatores de forma e equações de volume, tornando a quantificação de recursos madeireiros um grande desafio para as empresas que realizam MFS na Amazônia (CYSNEIROS et al., 2017).

Na região dos trópicos, aproximadamente 40% da madeira serrada comercializada vem das florestas naturais (BRANCALION et al., 2018; DE LIMA et al., 2021a). O Brasil se destaca como uma dos maiores produtores de madeira tropical roliça, com 81 milhões de m<sup>3</sup> (48% da produção total) de toras exploradas anualmente (DE LIMA et al., 2019; FERREIRA DA SILVA et al., 2020). As estimativas volumétricas em áreas de manejo florestal na Amazônia brasileira são norteadas pela Resolução N° 406, de 02 de fevereiro de 2009 do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, onde se estabelece que no primeiro plano operacional anual (POA) pode ser usado o fator de forma de 0,7 e, que se desenvolva equação de volume nos próximos POAs do plano de manejo florestal sustentável (PMFS). Porém, esse instrumento legal não impõe métodos específicos para o ajuste de equações de volume (LEÃO et al., 2021), cuja maioria dos PMFS têm optado por equações de volume genéricas. Conseqüentemente, a falta de regulamentação no desenvolvimento de equações, tem propiciado o fornecimento de estimativas imprecisas do volume de madeira (SANTOS et al., 2019; ALMEIDA et al., 2021).

A regulamentação do manejo florestal tem auxiliado na detecção de algumas formas de exploração ilegal de madeira, no entanto, ainda existe uma vulnerabilidade a métodos capazes de mascarar a origem da madeira ilegal (RICHARDSON; PERES, 2016; BRANCALION et al., 2018;). Uma forma de se fraudar a origem da madeira ilegal é a partir de informações falsas declaradas nos sistemas oficiais de controle florestal. Sendo observada tendências em superestimar a produção de madeira legal (BRANCALION et al., 2018). Tais questões reforçam a importância de equações acuradas para a estimativa do volume, pois, as estimativas de baixa acurácia podem gerar um "excedente" de madeira licenciada que pode ser utilizado para legalizar a madeira proveniente de extração ilegal (BRANCALION et al., 2018).

Além de facilitar a ilegalidade no comércio de madeira da Amazônia, tais estimativas também podem gerar perdas econômicas para as empresas que praticam o MFS (RODRIGUES et al., 2022). As estimativas de baixa acurácia podem comprometer todo o planejamento e viabilidade econômica de planos de manejo de concessões florestais, onde os contratos se baseiam em volume determinado em campo pelo censo florestal (ALMEIDA; SILVA; STEINBRENNER, 2022). No entanto, ainda existe uma carência de estudos sobre concessões florestais e seus aspectos econômicos no Brasil (RODRIGUES et al., 2022). Apesar disso, sabe-se que a insustentabilidade na exploração dos recursos florestais na Amazônia brasileira se deve, principalmente, pelas ilegalidades da região que promovem a redução nos preços da madeira legal e prejudicando os investimentos em áreas legalizadas de manejo de impacto reduzido (BRANCALION et al., 2018).

O desenvolvimento de equações de volume está aliado a práticas operacionais em mensuração florestal, que podem ser fontes de imprecisões na quantificação do volume comercial no MFS, como o uso da altura como variável preditora e na variação presente na forma do fuste das árvores (inter e intraespecífica) (CYSNEIROS et al., 2017; NETTO; BEHLING, 2019; SOCHA; NETZEL; CYWICKA, 2020; LEÃO et al., 2021). Além disso, o descarte de partes das árvores durante o romaneio, por não apresentarem condições de serem aproveitadas nas serrarias, pode proporcionar uma fonte de erro entre as estimativas durante as fases pré e pós-exploratória do MFS (ALMEIDA et al., 2022).

O manejo florestal requer um planejamento criterioso e a estimativa da produção volumétrica comercial é crucial para este processo (DOS SANTOS et al., 2020; DE ABREU et al., 2022). Na Amazônia brasileira, a necessidade de estimativas confiáveis vem ganhando importância, pois o estoque volumétrico estimado é uma das principais

informações exigidas pelos órgãos públicos responsáveis pelo manejo florestal para emitir anualmente o certificado de Autorização de Exploração Florestal (AUTEX) para manejo florestal de empresas que operam em florestas nativas (BRASIL, 2009). Logo, quantificar a produção volumétrica é parte fundamental do processo de planejamento do MFS, uma vez que fornece informações quantitativas da floresta que propiciam a tomada de decisões, bem como auxiliam na minimização dos impactos ambientais (RODRIGUES et al., 2022). Portanto, além de garantir o manejo sustentável dos recursos florestais, estimar precisamente o volume comercial, tanto em nível de árvore quanto em nível de povoamento é fundamental para a implementação das leis que regulam o manejo florestal na Amazônia brasileira (WEISKITTEL et al., 2011; BURKHART; TOMÉ, 2012; DE LIMA et al., 2019).

É importante ponderar que de acordo com a AUTEX, o volume permitido para corte é específico para espécies (BRASIL, 2009). A variação desses volumes depende, entre outros fatores, da estimativa de produção apresentada pela empresa de manejo florestal ao órgão regulador ambiental (DOS SANTOS et al, 2020; ALMEIDA; SILVA; STEINBRENNER, 2022). Desta forma, estimativas precisas devem ser realizadas para cada espécie comercial de forma individual. Quanto mais precisas as estimativas para cada espécie, menor será a discrepância entre o volume autorizado e o da exploração (ALMEIDA; SILVA; STEINBRENNER, 2022; BRANCALION et al., 2018; DOS SANTOS et al., 2020). Embora existam inúmeros trabalhos que tenham procurado melhorar a acurácia das estimativas volumétricas para espécies comerciais na Amazônia (CYSNEIROS et al., 2017; DE LIMA et al., 2021a; DE ABREU et al., 2022), ainda é prática comum das empresas de MFS o uso frequente de fatores de forma e de equações de volume genéricas, inclusive para o segundo POA (DOS SANTOS et al., 2020).

Apesar da necessidade de se controlar com precisão o volume de madeira produzida na Amazônia brasileira, análises abrangentes que buscam avaliar em grande escala a acurácia das equações volumétricas aplicadas no manejo florestal ainda são escassas (CYSNEIROS et al., 2017; ALMEIDA; SILVA; STEINBRENNER, 2022). Neste estudo, foi avaliada a acurácia das estimativas volumétricas em diversas áreas de manejo florestal empresarial sob contrato de concessão federal. Foi utilizado dados de volume de aproximadamente 66.000 árvores de dez gêneros comerciais, inventariadas e exploradas em diferentes unidades de manejo. Neste sentido, levantou-se a seguinte questão: As formas de obtenção do volume comercial pré-atividade de exploração, praticadas na atualidade por empresas florestais, são acuradas o suficiente para promover

o manejo florestal sustentável? Devido ao uso de abordagens inadequadas para estimativa do volume (equações e fator de forma genéricos) em consórcio com a variabilidade florística e estrutural observada no bioma Amazônia, pressupõe-se que os volumes comerciais durante as fases de pré e pós-exploração são estatisticamente diferentes, com tendência de o volume inventariado superestimar o real volume da floresta.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

Para o desenvolvimento do presente estudo, foram selecionadas áreas sob concessão florestal localizadas em cinco unidades de conservação federal (3 no estado do Pará e 2 no estado de Rondônia) abrigando 13 unidades de manejo florestal, gerenciadas por 8 diferentes empresas. Conforme classificação de Köppen, o clima das áreas estudadas é classificado como ‘Am’, sendo caracterizado como tropical quente e úmido, com sazonalidade bem definida e um curto período de seca (Tabela 1) (ALVARES et al., 2013). A precipitação média anual varia entre 2000 e 2600 mm, enquanto a temperatura média varia entre 25 e 28,3 °C. Para os solos das áreas, há o predomínio de Argissolos e Neossolos (SANTOS et al., 2013).

Tabela 1. Áreas selecionadas para avaliação, com informações sobre as unidades de conservação e unidades de manejo florestal

Floresta nacional	Área total (ha)	Unidade de manejo florestal (UMF)	Área sob concessão (ha)	Solo	PPT (mm)	Temp. (°C)	Tipologia Florestal Predominante
Altamira (PA)	689.012,00	UMF I	39.073,00	Argi	2300	28,25	Ombrófila Densa e Ombrófila Aberta
		UMF II	112.994,00	Argi			
		UMF III	98.414,00	Argi			
		UMF IV	111.436,00	Argi			
Caxiuanã (PA)	322.400,00	UMF III	52.168,08	Lato	2100	25,9	Ombrófila Densa
Saracá-Taquera (PA)	441.152,00	UMF IA	26.898,00	Argi; Neo	2000	25,5	Ombrófila Densa
		UMF IB	59.408,00	Argi; Neo			
		UMF II	29.769,82	Neo			
Jacundá (RO)	220.644,00	UMF I	55.014,27	Lato	2600	25	Ombrófila Aberta
		UMF II	32.757,96	Lato			
Jamari (RO)	222.156,58	UMF I	17.176,36	Lato	2400	25	Ombrófila Densa e Ombrófila Aberta
		UMF III	46.184,20	Podz.			

As concessões federais selecionadas possuem contratos assinados para o manejo florestal, sendo as Florestas Nacionais (FLONAs): do Jamari (RO); de Jacundá (RO); de Altamira (PA); de Saracá-Taquera (PA) e; Caxiuanã (PA), conforme Figura 1.

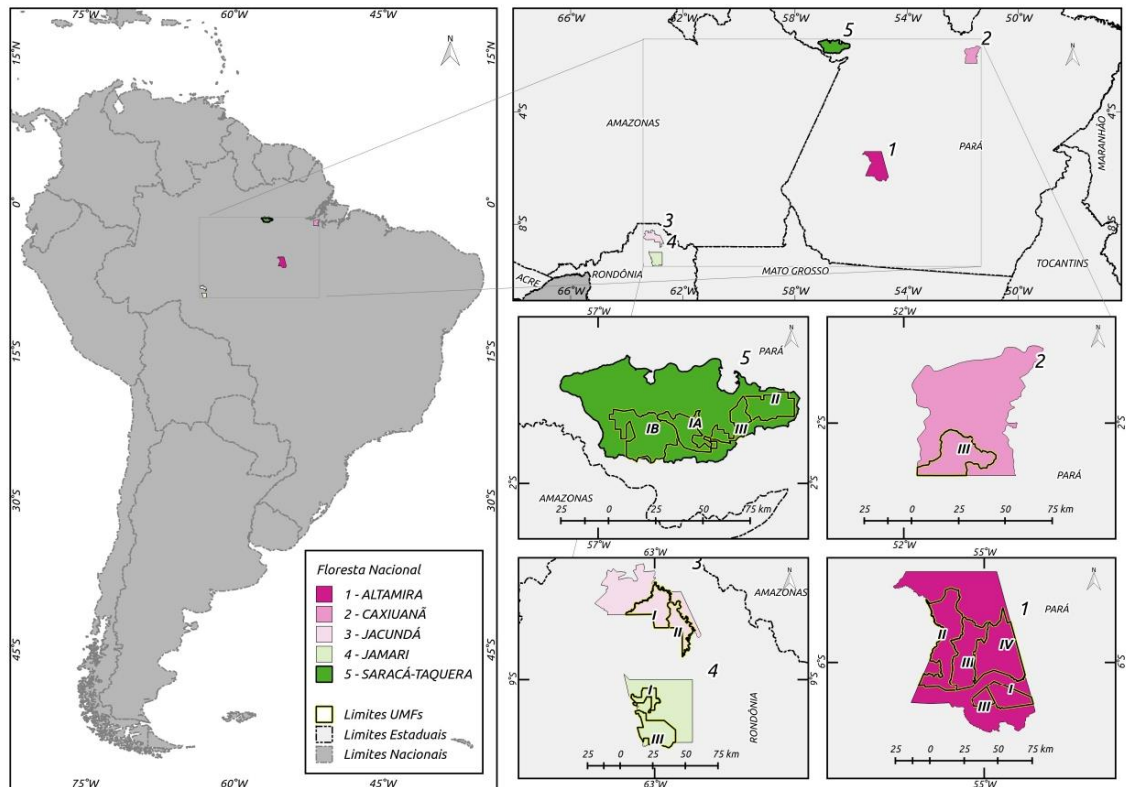


Figura 1. Mapa de localização das áreas selecionadas para análise

## 2.2. Banco de dados

### 2.2.1. Espécies comerciais

A identificação taxonômica das espécies madeireiras na Amazônia é problemática, e uma mistura de diferentes nomes científicos e comuns é utilizada para um único grupo de espécies de madeira comercial (BRANCALION et al., 2018). Para contornar este problema, optamos por realizar as análises ao nível de gênero, pois apresentam características semelhantes, como o mesmo hábito e valor comercial. Nesse sentido, 10 gêneros foram selecionados para avaliação volumétrica a partir de seu valor econômico e do volume existente nas áreas manejadas, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Lista de gêneros selecionados para as análises

N	Família	Gênero	Nome científico	Nome vulgar
1	Anacardiaceae	<i>Astronium spp.</i>	<i>Astronium lecointei</i>	Muiracatiara
2	Bignoniaceae	<i>Tabebuia spp.</i>	<i>Tabebuia incanus</i> <i>Tabebuia impetiginosus</i> <i>Tabebuia serratifolius</i>	Ipê
3	Fabaceae	<i>Dinizia spp.</i>	<i>Dinizia excelsa</i>	Angelim-vermelho
4	Fabaceae	<i>Dipteryx spp.</i>	<i>Dipteryx magnifica</i> <i>Dipteryx odorata</i> <i>Dipteryx polyphylla</i>	Cumaru
5	Fabaceae	<i>Hymenaea spp.</i>	<i>Hymenaea courbaril</i>	Jatobá
6	Fabaceae	<i>Hymenolobium spp.</i>	<i>Hymenolobium elatum</i> <i>Hymenolobium excelsum</i> <i>Hymenolobium heterocarpum</i> <i>Hymenolobium petraeum</i> <i>Hymenolobium pulcherrimum</i>	Angelim-pedra
7	Goupiaceae	<i>Goupia spp.</i>	<i>Goupia glabra</i>	Cupiúba
8	Lauraceae	<i>Mezilaurus spp.</i>	<i>Mezilaurus itauba</i> <i>Mezilaurus synandra</i>	Itaúba
9	Moraceae	<i>Bagassa spp.</i>	<i>Bagassa guianensis</i>	Tatajuba
10	Sapotaceae	<i>Manilkara spp.</i>	<i>Manilkara amazônica</i> <i>Manilkara bidentada</i> <i>Manilkara elata</i> <i>Manilkara huberi</i>	Maçaranduba

### 2.2.2. Obtenção dos volumes pré e pós-exploratório

Os dados utilizados no presente estudo foram cedidos pela Coordenação de Monitoramento e Auditoria Florestal do Serviço Florestal Brasileiro e tem origem no Sistema de Cadeia de Custódia (SCC) do Serviço Florestal Brasileiro (SFB), que é um sistema para cadastro e rastreamento de todas as informações pertinentes ao manejo florestal das áreas sob concessão, o que permite ao SFB controlar a produção, o transporte dos produtos madeireiros e a quantificação dos valores a serem repassados pelos concessionários ao governo federal em áreas sob concessão florestal. Para determinar se as formas de obtenção do volume comercial pré-atividade de exploração são acuradas para promover o manejo florestal sustentável, calculamos os volumes de madeira durante as fases de pré e pós-exploração, constituindo dois grupos:

- a) Volume inventariado:** o volume individual pré-exploratório, é o volume comercial das árvores selecionadas para exploração na UPA, obtido pelo processamento dos dados coletados no inventário florestal a 100% (censo). O volume das árvores



selecionadas foi obtido a partir de equações de volume ajustadas para cada UMF (as equações estão apresentadas no apêndice) e/ou do fator de forma com valor igual a 0,7, conforme a Resolução N° 406 – CONAMA (BRASIL, 2009).

Tabela 3. Métodos utilizados para a estimativa do volume comercial nas diferentes áreas avaliadas

UC	UMF	Método para estimar o volume
Altamira	UMF I	Fator de forma
	UMF II	
	UMF III	Fator de forma e Equação generalista (dupla entrada)
	UMF IV	
Caxiuanã	UMF III	Fator de forma e Equações para cada espécie (simples entrada)
Jacundá	UMF I	Equação generalista (dupla entrada)
	UMF II	
Jamari	UMF I	Equação generalista (dupla entrada)
	UMF III	Equações para cinco espécies (simples entrada) e equação generalista para as demais espécies (simples entrada)
Saracá Taquera	UMF IA	Fator de forma e Equação generalista (dupla entrada)
	UMF IB	
	UMF II	
	UMF III	

**b) Volume explorado:** o volume explorado ou pós-exploratório foi calculado durante o romaneio, a partir do processamento dos dados coletados na mensuração individual das toras estocadas nos pátios. A cubagem foi realizada pelo método de Smalian (DE LIMA et al., 2019; ALMEIDA; SILVA; STEINBRENNER, 2022). Além disso, calculamos o fator de forma para cada gênero botânico considerando o volume comercial explorado.

$$v_L = \frac{\left[ \left( Db^2 * \frac{\pi}{4} \right) + \left( \left( Dt^2 * \frac{\pi}{4} \right) \right) \right]}{2} * L \quad (1)$$

$$ff = \frac{v_L}{v_c} \quad (2)$$

Onde:  $v_L$  é o volume comercial explorado ( $m^3$ );  $Db$  é o diâmetro da base da tora (m), obtido a partir da média dos diâmetros na seção – em cruz;  $Dt$  é o diâmetro do topo da

tora (m), obtido a partir da média dos diâmetros na seção – em cruz;  $L$  é o comprimento da tora (m), erro aleatório,  $ff$  é o fator de forma,  $vc$  é o volume do cilindro (m<sup>3</sup>).

Os dados utilizados estão estruturados de forma hierárquica, cujas fontes de variabilidade se encontram aninhadas (Tabela 4). Dessa forma, conduzimos as análises por UMF em cada UC, para todos os gêneros botânicos selecionados, totalizando 112 grupos. Na Tabela 4 apresentamos a quantidade de árvores avaliadas por UMF para cada gênero botânico, podendo ser observado grande heterogeneidade entre áreas manejadas.

Tabela 4. Distribuição do número de árvores avaliada em cada UMF

UC	UMF	Número de árvores por gênero botânico										Total
		<i>Ast.</i>	<i>Bag.</i>	<i>Din.</i>	<i>Dip.</i>	<i>Gou.</i>	<i>Hyme.</i>	<i>Hym.</i>	<i>Man.</i>	<i>Mez.</i>	<i>Tab.</i>	
Altamira (PA)	I	8	13	-	25	42	106	48	191	-	288	721
	II	175	53	-	43	-	1290	71	122	18	3122	4894
	III	322	36	-	75	-	1160	55	80	44	1654	3426
	IV	81	107	-	61	237	1224	173	262	4	1413	3562
Caxiuanã (PA)	III	942	69	822	682	730	448	527	5372	188	-	9780
Saracá – Taquera (PA)	IA	41	-	99	405	221	903	918	81	2326	-	4994
	IB	555	22	2034	3078	1256	896	1859	4759	3120	58	17637
	II	40	-	35	888	644	483	423	5698	539	104	8854
	III	5	-	71	295	353	157	239	1538	452	-	3110
Jacundá (RO)	I	148	-	404	561	313	29	815	23	54	178	2525
	II	230	-	217	375	141	17	565	31	23	113	1712
Jamari (RO)	I	111	-	173	165	17	5	258	-	113	148	990
	III	935	88	1071	492	197	-	661	23	32	52	3551
<b>Total</b>	13	3593	388	4926	7145	4151	6718	6612	18180	6913	7130	<b>65756</b>

Em que: UC = Identificação da Floresta Nacional; UMF = Identificação da Unidade de Manejo Florestal; *Ast.* = *Astronium spp.*; *Bag.* = *Bagassa spp.*; *Din.* = *Dinizia spp.*; *Dip.* = *Dipteryx spp.*; *Gou* = *Goupia spp.*; *Hyme.* = *Hymenaea spp.*; *Hym.* = *Hymenolobium spp.*; *Man.* = *Manilkara spp.*; *Mez* = *Mezilaurus*; *Tab.* = *Tabebuia spp.*

## 2.3. Análise de dados

### 2.3.1. Relação entre volume pré e pós-exploração

A investigação das relações e tendências entre os volumes comerciais inventariados e explorados foi realizada com a abordagem de modelos mistos. Pois, ao considerar que dados provenientes de florestas inequidêneas são altamente diversificados, a abordagem de modelagem de efeitos mistos permite analisar dados hierarquicamente estruturados de modo mais eficiente do que qualquer outra abordagem. A estrutura do

modelo linear misto utilizado tem a seguinte forma (DE ABREU et al., 2021; RESENDE et al., 2018):

$$y_i = X_i\beta + Z_i b_i + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

$$b_i \sim N(0, G), \quad \varepsilon_i \sim N(0, R_i) \quad (4)$$

Onde  $\beta$  são os efeitos fixos;  $b_i$  são os efeitos aleatórios;  $X_i$  e  $Z_i$  são as matrizes de incidência sobre os efeitos fixos e aleatórios, respectivamente;  $\varepsilon_i$  é o erro aleatório,  $G$  é a matriz de variância e covariância de efeitos aleatórios,  $R_i$  é a matriz  $n \times n$  da covariância residual ( $R_i = I \times \sigma^2$ , onde  $I$  é a matriz de identidade).

O modelo estruturado para esta análise considerou os seguintes preditores categóricos como efeitos aleatórios: gênero botânico e UMF por UC. Os efeitos aleatórios foram atribuídos ao intercepto e inclinação do modelo (Eq. 5). Como efeito fixo, consideramos o volume inventariado. Dessa maneira, os parâmetros da regressão variam entre grupos, explicando as fontes de heterogeneidade dos dados. O ajuste foi realizado a partir da função “lmer” do pacote “lme4” do software R (fonte), utilizando o algoritmo de Máxima Probabilidade Restrita (REML).

$$\ln(v_L) = (\beta_0 + b_{0i} + b_{0j}) + (\beta_1 + b_{1i} + b_{1j}) * \ln(v_I) \quad (5)$$

Onde:  $\beta_0$  e  $\beta_1$  = parâmetros fixos do modelo;  $b_{0i}$  e  $b_{0j}$  = intercepto aleatório para a  $i$ -ésima UMF por UC e para a  $j$ -ésima espécie, respectivamente;  $b_{1i}$  e  $b_{1j}$  = coeficientes de inclinação aleatória para a  $i$ -ésima UMF por UC e para a  $j$ -ésima espécie, respectivamente.

Neste estudo, a variância da variável independente foi considerada homogênea, uma vez que a transformação logarítmica dos dados atende este pressuposto dos modelos lineares usuais. Para avaliar a qualidade de ajuste foi calculado o coeficiente de determinação condicional ( $R^2_{LMM(c)}$ ), que é a proporção da variação explicada tanto pelos efeitos fixos quanto pelos efeitos aleatórios (NAKAGAWA; JOHNSON; SCHIELZETH, 2017) e a raiz quadrada do erro médio percentual. A significância dos efeitos fixos foi testada utilizando análise de variância (Tipo III) ao nível de 95% de probabilidade, através da função “anova”, enquanto a significância dos efeitos aleatórios foi testada a partir da função “ranova” (Anova com exclusão de termos aleatórios). Ambas as análises foram

realizadas pelo pacote “lmerTest” do software R (KUZNETSOVA; BROCKHOFF; CHRISTENSEN, 2017).

### 2.3.2. Acurácia e validação

Para verificar a diferença entre os volumes inventariados e explorados foi utilizado o teste de equivalência de Robinson et al. (2005) (Regression-based TOST using bootstrap), onde se considerou todos os 112 grupos de análises. Esse teste inverte a hipótese nula, isto é, determina a hipótese nula como indicadora de dissimilaridade entre os valores estimados e observados. Testes de equivalência têm sido usados para comparar médias ou à similaridade entre as estimativas e observações de forma individualizada (ROBINSON et al. 2005; WEISKITTEL et al. 2011). Uma vez que a abordagem de regressão para testes de equivalência avalia ambos, esta é a forma mais adequada para a avaliação de um modelo (ROBINSON et al., 2005), ou para avaliar se as estimativas de uma determinada variável, obtidas por dois métodos de avaliação são estatisticamente iguais.

Testou-se da seguinte forma: a) foi subtraída a média das estimativas de todos os valores estimados (Volume inventariado); b) estabeleceu-se as regiões de equivalência para os parâmetros da regressão, onde foi considerado 25% ao nível de 95% de probabilidade, com 1000 bootstrapping; c) ajustou-se a regressão linear entre as observações (Volume explorado) e valores estimados (Volume inventariado); d) testou-se a igualdade do intercepto calculando os dois limites dos intervalos de confiança para o parâmetro, que foi comparado com a região estimada de equivalência; e) a igualdade para o coeficiente de inclinação foi testada calculando o intervalo de confiança unilateral, que foi comparado com a região de equivalência estimada; e f) a hipótese de dissimilaridade foi aceita ou rejeitada com base nos resultados do teste.

Devido à grande quantidade de observações, apresentou-se os resultados do teste de equivalência apenas para os grupos que atenderam a hipótese de similaridade. Os demais resultados estão disponibilizados no apêndice. Por fim, foi avaliado a acurácia do volume inventariado a partir do cálculo do erro quadrático médio percentual ( $RMSE\%$ ) e bias percentuais ( $Bias\%$ ). Dado que a altura foi uma variável utilizada na estimativa do volume em algumas áreas, foi avaliada a sua precisão através da diferença percentual entre a altura calculada no romaneio e a altura estimada pelo inventário florestal:

$$RMSE_{\%} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (v_I - v_L)^2}{N}}}{\bar{v}_L} * 100 \quad (8)$$

$$Bias_{\%} = \frac{\sum_{i=1}^N (v_L - v_I)}{\sum_{i=1}^N v_L} * 100 \quad (9)$$

$$e_{\%} = \frac{\sum h_L - h_I}{\bar{h}_L} * 100 \quad (10)$$

Onde:  $RMSE_{\%}$ : raiz quadrada do erro médio (%);  $Bias_{\%}$ : Viés (%);  $e_{\%}$ : diferença percentual (%);  $v_I$ : Volume inventariado ( $m^3$ );  $v_L$ : Volume explorado ( $m^3$ );  $h_I$ : Altura estimada no inventário florestal 100% (m);  $h_L$ : Altura determinada no romaneio, sendo a altura real (m); N: número de observações;  $\bar{v}_L$ : Média do volume explorado ( $m^3$ );  $\bar{h}_L$ : Altura média das árvores exploradas ( $m^3$ ).

### 3. RESULTADOS

A partir da análise de modelos mistos, foi verificada tendências do volume inventariado em superestimar o volume estocado da floresta, isto é, o volume explorado tende a ser inferior ao estimado pelo inventário florestal. Tal padrão fica evidente para as áreas de Saracá Taquera (todas as UMFs) e UMF IV de Altamira (Figura 2). Em Saracá Taquera foi utilizada uma equação geral para todas as unidades de manejo, enquanto para UMF IV de Altamira utilizou-se uma equação desenvolvida para outra UMF (Altamira – UMF III). Por outro lado, constatou-se tendências de o volume inventariado ser inferior ao volume explorado para alguns gêneros em áreas que utilizaram fator de forma (Altamira – UMF I e II) (Figura 2).

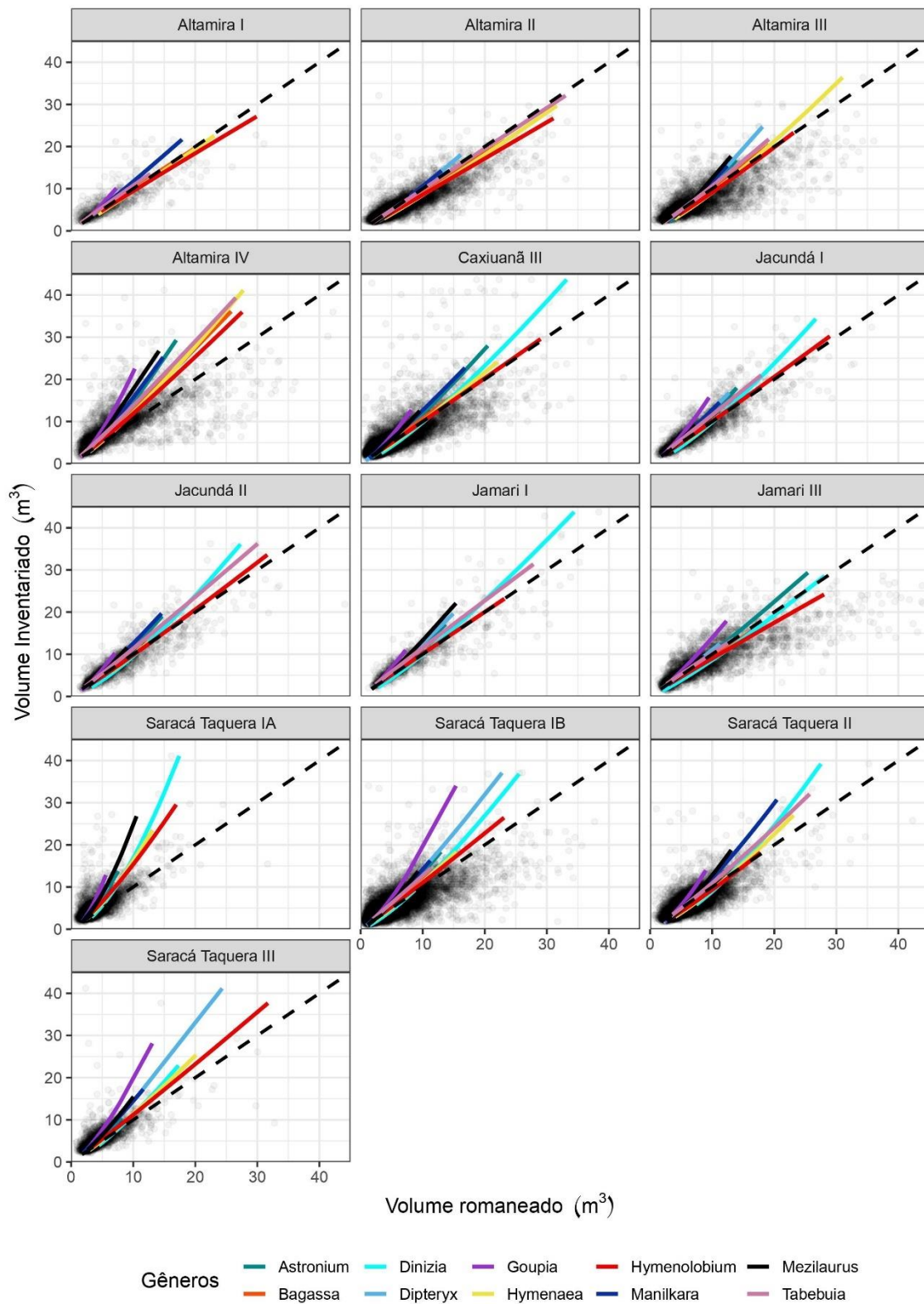


Figura 2. Relação entre volume inventariado e volume explorado para diferentes áreas concessionadas sob manejo florestal no Brasil

Os resultados do ajuste do modelo linear misto se encontram na Tabela 5, sendo que entre parênteses estão os valores exponenciados para os coeficientes do efeito fixo. Todos os parâmetros foram significativos pelo teste t ao nível de 95% de probabilidade.

O  $R^2_{LMM(c)}$  representa a proporção da variância explicada tanto pelo efeito fixo quanto pelos efeitos aleatórios. Foi verificado que 66% da variação do volume explorado foi explicado pelo volume inventariado (efeito fixo) em conjunto com os efeitos aleatórios (UC por UMF e gênero botânico), conforme pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados do ajuste do modelo linear misto para avaliar a relação entre volume inventariado e explorado

<i>Coeficientes</i>	<i>Estimativas</i>	<i>IC</i>	<i>Teste t</i>	<i>p-valor</i>
$\beta_0$	0,1845 (1,202)	0,06 – 0,31	2,81	<b>0,005</b>
$\beta_1$	0,8529 (2,346)	0,79 – 0,92	25,91	<b>&lt;0,001</b>
<b>Efeitos aleatórios</b>				
$\sigma^2$	0,1265			
$\tau_{00}$ UMF	0,0173			
$\tau_{00}$ Gênero botânico	0,0284			
$\tau_{11}$ UMF.ln(Vi)	0,0048			
$\tau_{11}$ Gênero botânico.ln(Vi)	0,0068			
$\rho_{01}$ UMF	-0,60			
$\rho_{01}$ Gênero botânico	-0,75			
N Gênero botânico	10			
N UMF	13			
Observações	65756			
$R^2_{LMM(c)}$	0,660			
RMSE%	22,612			

Em que:  $\beta_i$ : coeficientes para o efeito fixo; IC: intervalo de confiança para os coeficientes de efeitos fixos;  $\sigma^2$ : variância do resíduo;  $\tau_{00}$  UMF: variância para o intercepto considerando efeito aleatório UMF;  $\tau_{00}$  Gênero botânico: variância para o intercepto considerando efeito aleatório gênero botânico;  $\tau_{11}$  UMF.ln(Vi): variância para a inclinação considerando efeito aleatório UMF;  $\tau_{11}$  Gênero botânico.ln(Vi): variância para o intercepto considerando efeito aleatório gênero botânico;  $\rho_{01}$  UMF e  $\rho_{01}$  Gênero botânico: correlação para os efeitos aleatórios UMF e gênero botânico, respectivamente; N Gênero botânico e N UMF: número de categorias para os efeitos aleatórios UMF e gênero botânico, respectivamente;  $R^2_{LMM(c)}$ : coeficiente de determinação condicional; RMSE%: raiz quadrado do erro médio percentual; Vi: Volume do inventário.

Os efeitos fixos e aleatórios foram significativos conforme as análises de variância (Tabela 6). A anova com exclusões de termos aleatórios evidenciou variação estatisticamente significativa nas inclinações entre os grupos avaliados (p-valor < 0,05), cujo menor valor de AIC (50922) se deu para o modelo completo, isto é, considerando os efeitos aleatórios UMF e gênero botânico sobre o intercepto e inclinação do modelo.

Tabela 6. Análises de variância para os efeitos fixos e aleatórios

<b>Análise de variância do tipo III, tabela com método de Satterthwaite's</b>						
Variável	<i>SQS</i>	<i>SQM</i>	<i>DF</i>	<i>DenDF</i>	<i>F</i>	<i>p-value</i>
ln(Vi)	84,959	84,959	1	16,893	671,32	<0,001
<b>ANOVA de termos aleatórios</b>						
	<i>npar</i>	<i>logLik</i>	<i>AIC</i>	<i>LRT</i>	<i>DFL</i>	<i>p-value</i>
Modelo Completo	9	-25452	50922	-	-	-
ln(Vi) em (ln(Vi)   GB)	7	-25639	51293	374,87	2	<0,001
ln(Vi) em (ln(Vi)   UMF)	7	-25621	51256	338,74	2	< 0,001
(ln(Vi)   GB)	6	-27002	54015	6099,6	3	<0,001
(ln(Vi)   UMF)	6	-27981	55974	5058,4	3	<0,001

DenDF: graus de liberdade do denominador; DF: grau de liberdade; F: valor para o teste F; npar: número de parâmetros do modelo; LRT: estatística do teste de razão de verossimilhança, o dobro da diferença na probabilidade logarítmica; DFL: graus de liberdade para o teste de razão de verossimilhança: a diferença no número de parâmetros do modelo; logLik: log-likelihood para o modelo. Note que este é o REML-logLik porque o modelo está equipado com REML; AIC: critério de informação Akaike; GB: Gênero botânico; UMF: Unidade de Manejo Florestal; Vi: Volume do inventário.

Na Figura 3, é possível verificar uma maior variabilidade para os interceptos aleatórios, tanto para UMF quanto para gênero botânico. Por outro lado, verificou-se que os valores para inclinação apresentaram menor variabilidade, com destaque para os gêneros *Hymenaea*, *Dipteryx* e *Manilkara*, com valores próximos de zero (Figura 3). Padrão semelhante foi observado para o efeito aleatório UMF, com menor dispersão ao longo do eixo central.



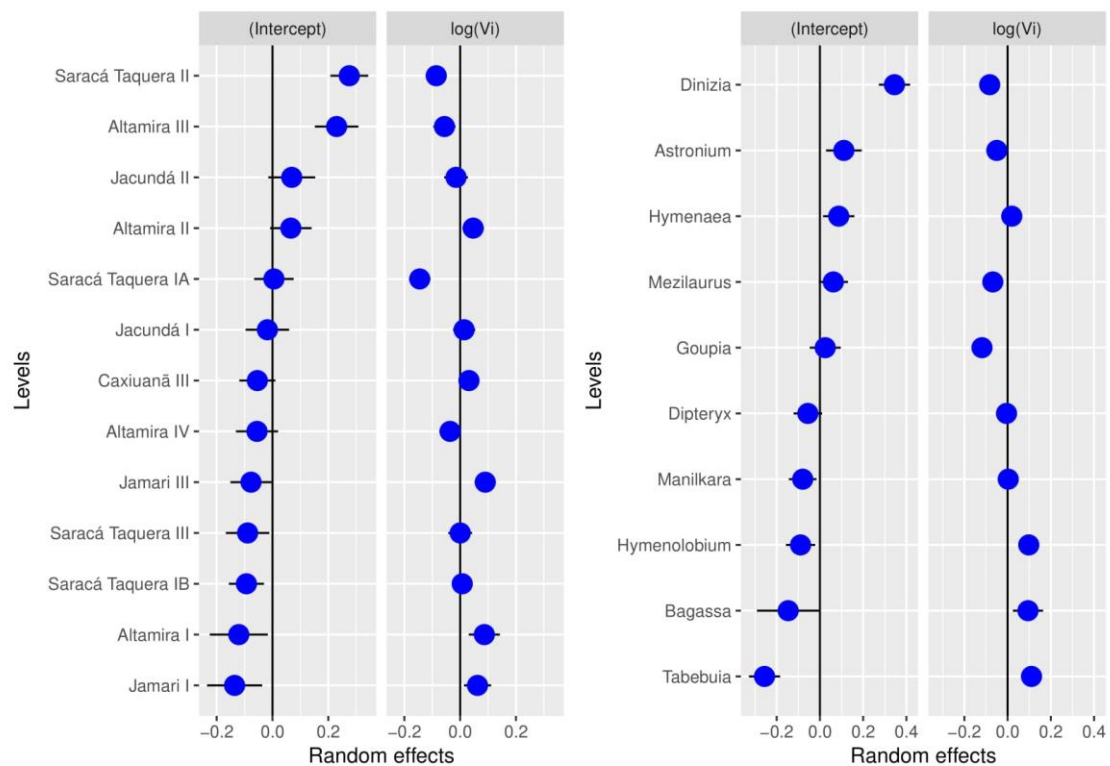


Figura 3. Distribuição dos efeitos aleatórios, UMF por UC e gênero botânico, para a modelagem do volume em áreas concessionadas de manejo florestal no Brasil.

Os coeficientes e erros padrão para os efeitos aleatórios se encontram dispostos na Tabela 7. Entre parênteses estão apresentados os valores exponenciados para todos os coeficientes.

Tabela 7. Coeficientes e erro padrão para os efeitos aleatórios

Unidades de Manejo Florestal (UMF)						
Variável aleatória	$b_{0i}$			$b_{1i}$		
	Estimativa		$ep$	Estimativa		$ep$
Altamira I	-0,1208	(0,886)	0,0531	0,08652	(1,090)	0,0284
Altamira II	0,0656	(1,068)	0,0380	0,04657	(1,048)	0,0196
Altamira III	0,22978	(1,258)	0,0398	-0,0564	(0,945)	0,0203
Altamira IV	-0,0556	(0,946)	0,0386	-0,0363	(0,964)	0,0193
Caxiuanã III	-0,0544	(0,947)	0,0330	0,03146	(1,032)	0,0171
Jacundá I	-0,0183	(0,982)	0,0397	0,01415	(1,014)	0,0203
Jacundá II	0,06901	(1,071)	0,0429	-0,0149	(0,985)	0,0218
Jamari I	-0,1358	(0,873)	0,0504	0,06215	(1,064)	0,0247
Jamari III	-0,077	(0,926)	0,0376	0,08988	(1,094)	0,0191
Saracá Taquera IA	0,005	(1,005)	0,0361	-0,1449	(0,865)	0,0196
Saracá Taquera IB	-0,0934	(0,911)	0,0321	0,0074	(1,007)	0,0167
Saracá Taquera II	0,27511	(1,317)	0,0345	-0,0858	(0,918)	0,0181
Saracá Taquera III	-0,0892	(0,915)	0,0397	0,00005	(1,000)	0,0218
Gêneros botânicos						
Variável aleatória	$b_{0j}$			$b_{1j}$		
	Estimativa		$se$	Estimativa		$se$
<i>Astronium</i>	0,1106	(1,1169)	0,0422	-0,0501	(0,9511)	0,0216
<i>Bagassa</i>	-0,1469	(0,8634)	0,0738	0,0943	(1,0989)	0,0356
<i>Dinizia</i>	0,3447	(1,4116)	0,0369	-0,0829	(0,9204)	0,0181
<i>Dipteryx</i>	-0,056	(0,9455)	0,0337	-0,005	(0,9950)	0,0182
<i>Goupia</i>	0,0244	(1,0247)	0,0365	-0,1185	(0,8883)	0,0205
<i>Hymenaea</i>	0,0869	(1,0908)	0,0370	0,0193	(1,0195)	0,0186
<i>Hymenolobium</i>	-0,0897	(0,9142)	0,0345	0,0979	(1,1029)	0,0178
<i>Manilkara</i>	-0,0798	(0,9233)	0,0327	0,0028	(1,0028)	0,0171
<i>Mezilaurus</i>	0,062	(1,0640)	0,0345	-0,0684	(0,9339)	0,0190
<i>Tabebuia</i>	-0,2564	(0,7738)	0,0367	0,1105	(1,1168)	0,0190

Em que:  $b_{0i}$  e  $b_{0j}$ : coeficientes para o intercepto, considerando os efeitos UMF e gênero botânico respectivamente;  $b_{1i}$  e  $b_{1j}$ : coeficientes para a inclinação, considerando os efeitos aleatórios UMF e gênero botânico;  $ep$ : erro padrão.

Os resultados evidenciaram que grande parte dos fatores de forma médio, calculados para cada gênero e UMF, se situaram abaixo do valor usual de 0,7. Por outro lado, o gênero *Hymenolobium* apresentou valores de fator de forma superior a 0,7 em todas as UMFs. O gênero *Mezilaurus* apresentou comportamento anômalo, cujo fator de forma variou de valores abaixo de 0,7 até valores próximos de 0,8, como pode ser observado na Figura 4.

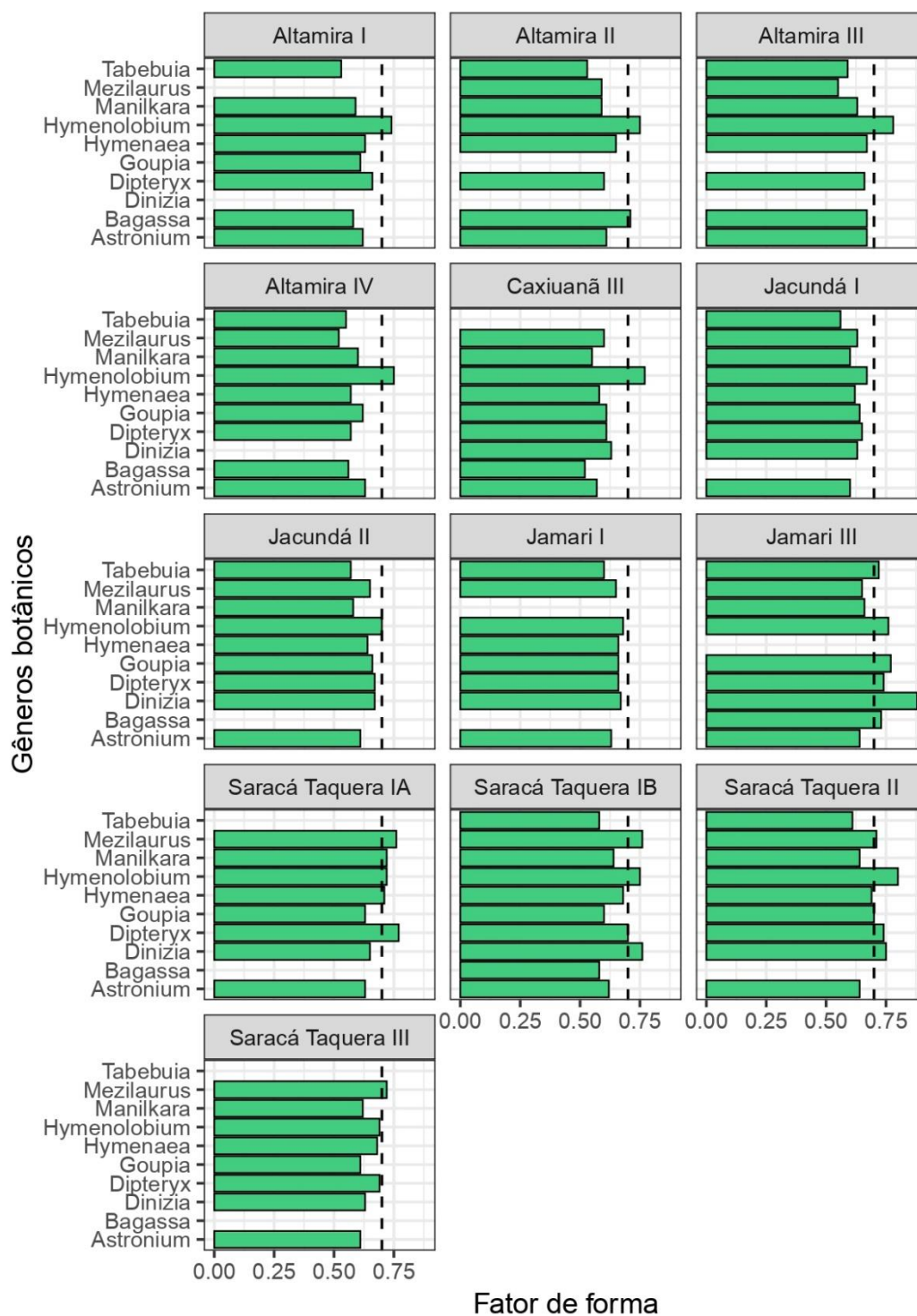


Figura 4. Fator de forma para cada gênero manejado em diferentes unidades de conservação na Amazônia brasileira. Linha tracejada na vertical representa o fator de forma 0,7 adotado nas UMFs, conforme legislação brasileira.

Em relação a diferença percentual para a variável altura, verificou-se tendências de super e subestimativa em todas as UMFs e gêneros botânicos. Em sua maioria, as UMFs de Altamira subestimaram a altura inventariada, com diferenças de até 20%. Por outro lado, as UMFs de Jacundá superestimaram a altura em até 16% (Figura 5).

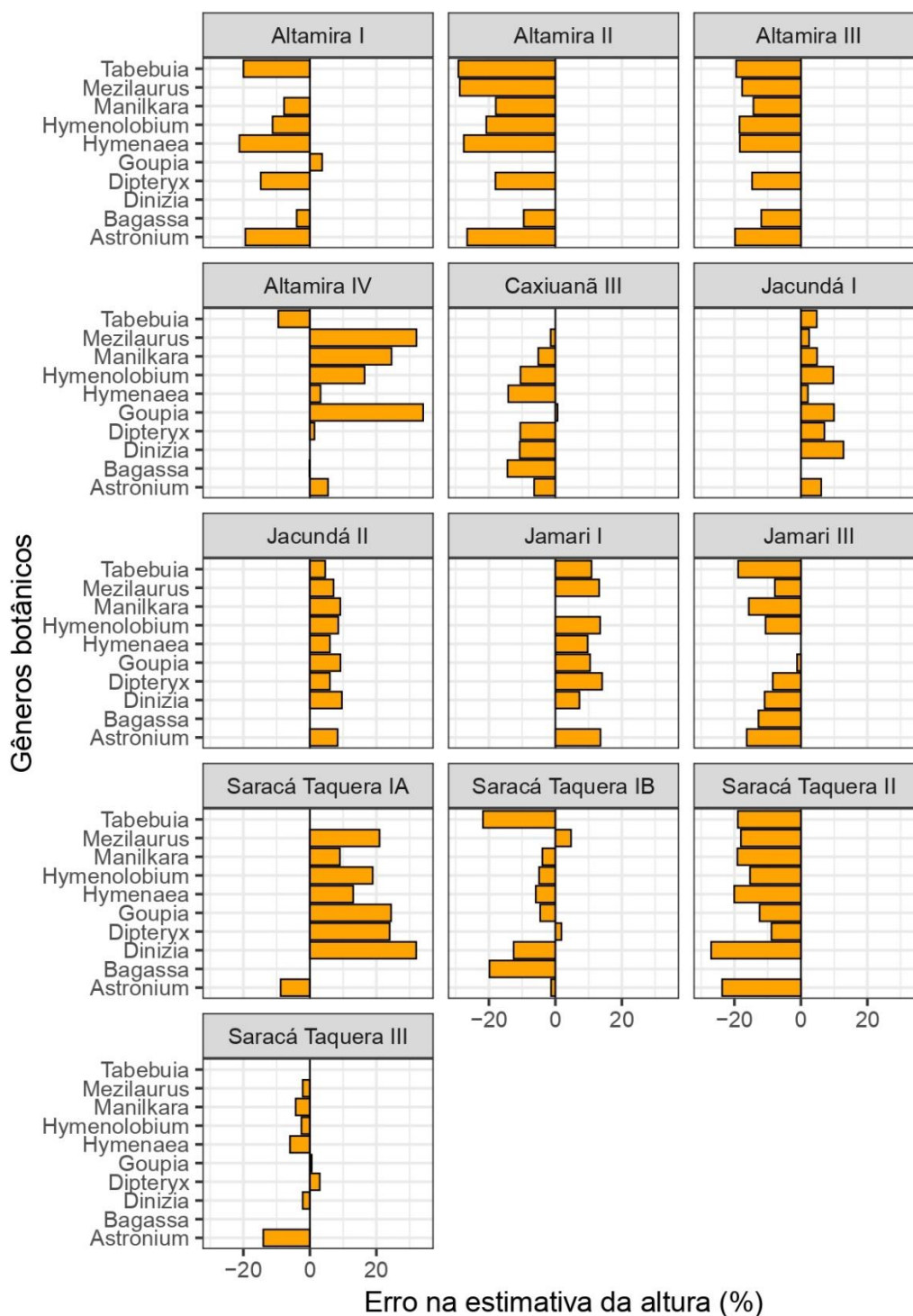


Figura 5. Diferença percentual entre as alturas inventariadas e calculadas durante o romaneio em diferentes UMFs na Amazônia brasileira

Em relação as métricas de acurácia, *RMSE%* e *Bias%*, foi verificado uma elevada heterogeneidade entre os volumes inventariados e explorados, evidenciando a baixa acurácia das estimativas fornecidas no inventário florestal. Para *RMSE%*, constatou-se o predomínio dos valores mais altos para as UCs de Saracá Taquera e Altamira, que

variaram entre 59% e 124,48% (Figura 6). As UMFs de Jacundá apresentaram valores de *RMSE%*, que situaram abaixo de 40%.

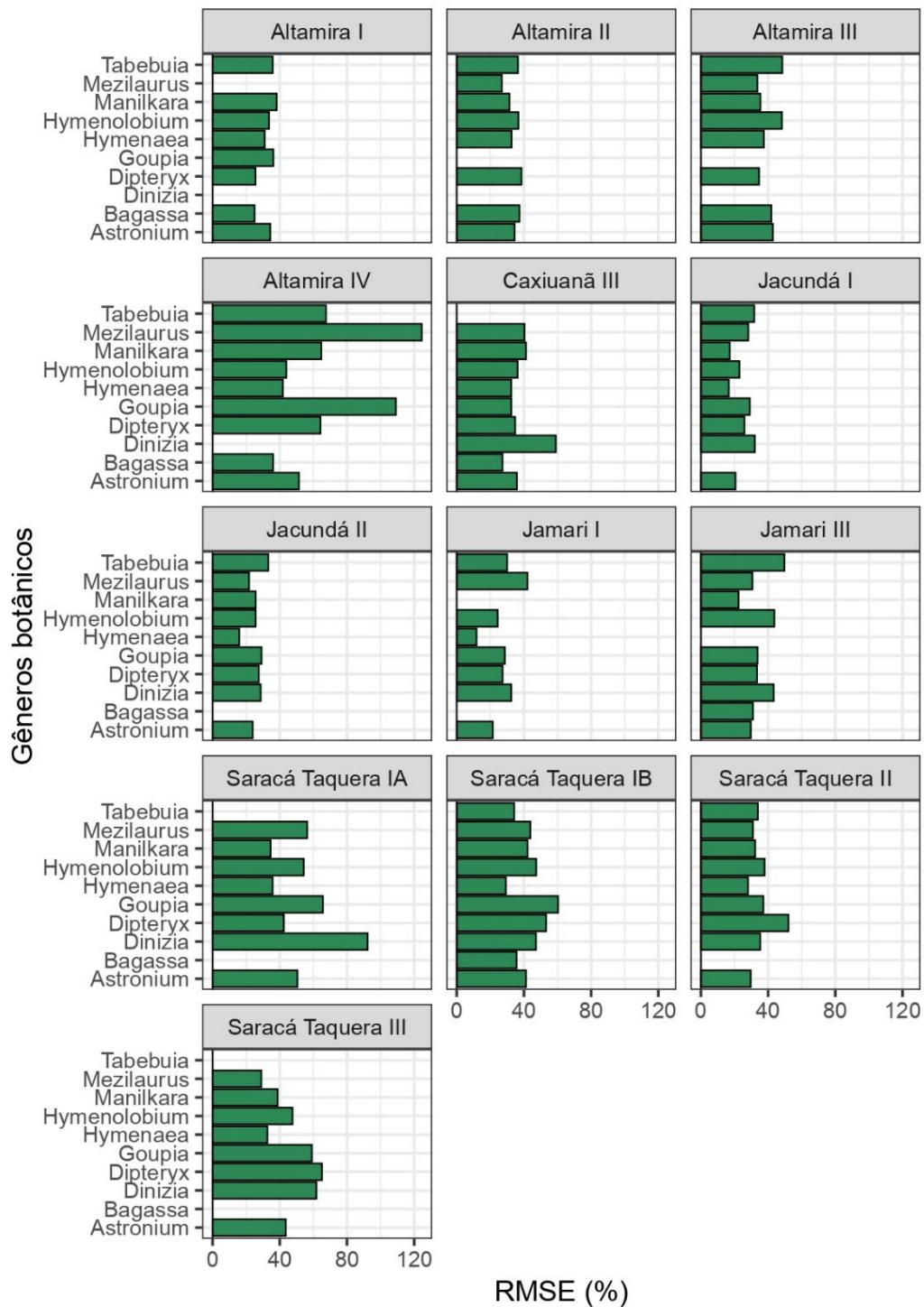


Figura 6. *RMSE%* entre volume inventariado e explorado em áreas concessionadas de manejo florestal na Amazônia brasileira

Para *Bias%*, destacam-se os valores da UC de Caxiuanã, que se estabeleceram próximo de zero, conforme pode ser observado na Figura 7. Padrão semelhante foi

observado para as UMFs de Jacundá, com valores abaixo de 25%. Os valores de *Bias%* corroboram com os resultados obtidos pelo modelo misto, demonstrando que o volume explorado tende a ser menor do que o volume inventariado, que é cadastrado nos sistemas dos órgãos governamentais para controle.

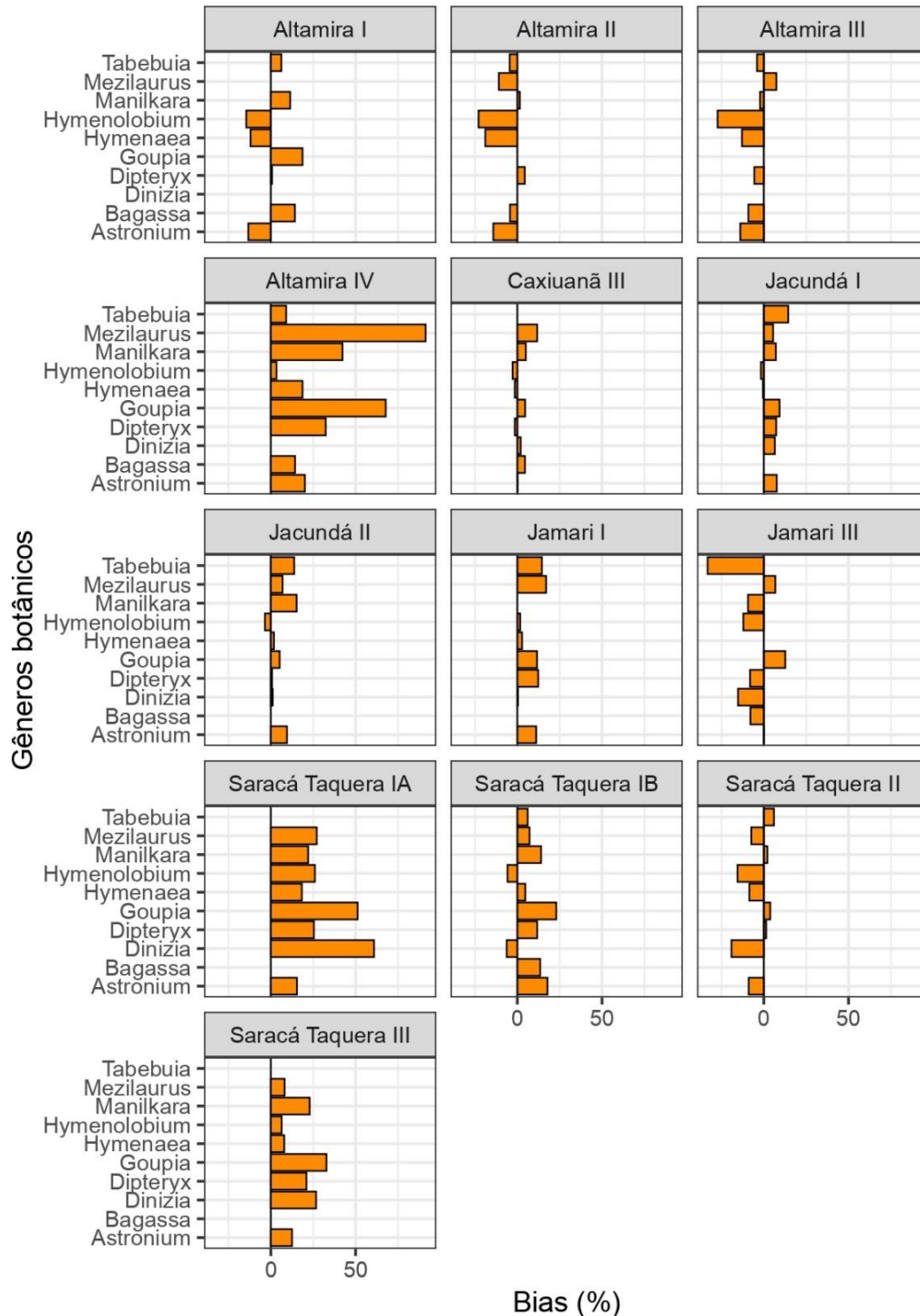


Figura 7. *Bias%* entre volume inventariado e explorado em áreas concessionadas de manejo florestal na Amazônia brasileira.

Para o teste de equivalência, do total de 112 grupos avaliados, apenas 25 apresentaram similaridade estatisticamente significativa. Verificou-se o predomínio do gênero *Hymenolobium* nos grupos validados (7 grupos equivalentes em todas as UCs), seguido dos gêneros *Dipteryx* e *Hymenaea*, ambos com 4 grupos equivalentes, conforme pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8. Teste de equivalência para a relação entre volume explorado e inventariado em áreas de manejo florestal na Amazônia brasileira

UC	UMF	Gêneros	Parâmetros	Intervalo de confiança	Região de similaridade	Dissimilaridade	
Altamira	UMF I	Hymenaea	Intercepto	9,32955 ± 10,40894	6,50313 ± 10,83856	Rejeita	
			Inclinação	0,75301 ± 1,24474	0,75 ± 1,25	Rejeita	
	UMF II	Astronium	Intercepto	5,7975 ± 6,353	3,9074 ± 6,5124	Rejeita	
			Inclinação	0,7816 ± 1,2196	0,75 ± 1,25	Rejeita	
		Bagassa	Intercepto	7,5769 ± 9,2413	6,0238 ± 10,0397	Rejeita	
			Inclinação	0,8013 ± 1,219	0,75 ± 1,25	Rejeita	
	Tabebuia	Intercepto	5,4488 ± 5,5908	3,9517 ± 6,5862	Rejeita		
		Inclinação	0,8861 ± 1,0479	0,75 ± 1,25	Rejeita		
	UMF III	Tabebuia	Intercepto	5,8091 ± 6,096	4,2863 ± 7,1439	Rejeita	
			Inclinação	0,7627 ± 0,8932	0,75 ± 1,25	Rejeita	
	UMF IV	Bagassa	Intercepto	9,0777 ± 10,2737	8,2543 ± 13,7571	Rejeita	
			Inclinação	0,7542 ± 1,0813	0,75 ± 1,25	Rejeita	
		Hymenolobium	Intercepto	10,5416 ± 11,9736	8,7407 ± 14,5679	Rejeita	
			Inclinação	0,8005 ± 1,1157	0,75 ± 1,25	Rejeita	
	Caxiuanã	UMF III	Dipteryx	Intercepto	4,8002 ± 5,0521	3,6375 ± 6,0625	Rejeita
				Inclinação	0,8408 ± 1,0125	0,75 ± 1,25	Rejeita
Hymenaea			Intercepto	9,2666 ± 9,8074	7,0355 ± 11,7258	Rejeita	
			Inclinação	0,7595 ± 0,9688	0,75 ± 1,25	Rejeita	
Hymenolobium		Intercepto	8,5732 ± 9,1106	6,4469 ± 10,7448	Rejeita		
		Inclinação	0,8226 ± 0,9928	0,75 ± 1,25	Rejeita		
Jacundá	UMF I	Dipteryx	Intercepto	4,1934 ± 4,3679	3,4422 ± 5,737	Rejeita	
			Inclinação	0,8635 ± 1,0064	0,75 ± 1,25	Rejeita	
		Hymenolobium	Intercepto	8,3896 ± 8,6605	6,2838 ± 10,473	Rejeita	
			Inclinação	0,9167 ± 1,0489	0,75 ± 1,25	Rejeita	
	UMF II	Dinizia	Intercepto	12,4286 ± 13,3735	9,7748 ± 16,2913	Rejeita	
			Inclinação	0,7895 ± 0,9738	0,75 ± 1,25	Rejeita	
		Dipteryx	Intercepto	4,5265 ± 4,7825	3,5157 ± 5,8596	Rejeita	
			Inclinação	0,8482 ± 1,0243	0,75 ± 1,25	Rejeita	
Hymenolobium	Intercepto	8,2805 ± 8,6261	6,1186 ± 10,1976	Rejeita			

UC	UMF	Gêneros	Parâmetros	Intervalo de confiança	Região de similaridade	Dissimilaridade	
Jamari		Manilkara	Inclinação	$0,8855 \pm 1,0186$	$0,75 \pm 1,25$	Rejeita	
			Intercepto	$6,5117 \pm 7,5719$	$6,0739 \pm 10,1232$	Rejeita	
			Inclinação	$0,7576 \pm 1,2271$	$0,75 \pm 1,25$	Rejeita	
	UMF I	Astronium	Intercepto	$7,3142 \pm 7,8439$	$6,3029 \pm 10,5048$	Rejeita	
			Inclinação	$0,7505 \pm 1,0671$	$0,75 \pm 1,25$	Rejeita	
		Hymenolobium	Intercepto	$8,8689 \pm 9,3825$	$6,951 \pm 11,585$	Rejeita	
			Inclinação	$0,8859 \pm 1,0631$	$0,75 \pm 1,25$	Rejeita	
		UMF III	Dinizia	Intercepto	$12,9454 \pm 13,6283$	$8,4488 \pm 14,0813$	Rejeita
				Inclinação	$1,0566 \pm 1,1824$	$0,75 \pm 1,25$	Rejeita
	Dipteryx		Intercepto	$4,8015 \pm 5,0869$	$3,4018 \pm 5,6696$	Rejeita	
			Inclinação	$0,9931 \pm 1,1904$	$0,75 \pm 1,25$	Rejeita	
	Goupia	Intercepto	$5,5975 \pm 6,1036$	$4,9408 \pm 8,2347$	Rejeita		
		Inclinação	$0,7521 \pm 1,0849$	$0,75 \pm 1,25$	Rejeita		
	Saracá Taquera	UMF IB	Hymenaea	Intercepto	$5,7833 \pm 5,9956$	$4,624 \pm 7,7066$	Rejeita
Inclinação				$0,811 \pm 0,9371$	$0,75 \pm 1,25$	Rejeita	
Hymenolobium			Intercepto	$5,3023 \pm 5,5311$	$3,8278 \pm 6,3797$	Rejeita	
			Inclinação	$1,0308 \pm 1,1861$	$0,75 \pm 1,25$	Rejeita	
UMF II		Hymenaea	Intercepto	$8,8807 \pm 9,2976$	$6,233 \pm 10,3883$	Rejeita	
			Inclinação	$0,7708 \pm 0,9298$	$0,75 \pm 1,25$	Rejeita	
		Hymenolobium	Intercepto	$6,974 \pm 7,4284$	$4,5601 \pm 7,6001$	Rejeita	
			Inclinação	$0,8789 \pm 1,1383$	$0,75 \pm 1,25$	Rejeita	

Em que: UC: Unidade de Conservação; UMF: Unidade Manejo Florestal.



## **4. DISCUSSÃO**

### **4.1. Volume explorado e volume inventariado**

Os resultados demonstraram uma discrepância significativa entre os volumes inventariados e explorados em diferentes áreas destinadas ao manejo florestal sustentável. Do total de 112 grupos avaliados apenas 25 foram equivalentes. Tais achados evidenciam a fragilidade SCC (Sistema de Cadeia de Custódia), cujo monitoramento ocorre a partir dos dados cadastrados do inventário florestal 100%, sendo a declaração de informações falsas uma das formas utilizadas para fraudar a origem da madeira ilegal (BRANCALION et al., 2018; CARVALHO et al., 2019). De tal modo, a verificação em campo da exploração madeireira é essencial para a prevenção de fraudes (FINER et al., 2014; BRANCALION et al., 2018). Por exemplo, inspeções de campo realizadas durante pós-exploração em concessões florestais na Amazônia peruana resultaram no cancelamento de quase metade das concessões, devido a grandes violações das normas existentes (FINER et al., 2014). Apesar disso, no Brasil, grande parte do problema da comercialização de madeira ilegal se encontra em florestas privadas, pois o pagamento pecuniário do volume explorado nos sistemas oficiais de controle por concessionários de planos de manejo em florestas públicas implica em um custo do crédito florestal que inviabilizaria o “esquentamento” de madeira por meio da venda virtual de créditos (PEREIRA, 2020).

Apesar dos resultados do presente trabalho, evidenciando falhas nas estimativas de volume comercial pré-exploratório nas concessões federais, é importante salientar que são áreas mais vistoriadas e monitoradas em relação as áreas privadas. Nas áreas sob concessão existem vistorias periódicas do órgão gestor do contrato (SFB) e do órgão licenciador (IBAMA) em todas as UPA's durante a exploração, diferente das áreas privadas. Então, é importante fazer o paralelo, se as empresas mais capacitadas do Brasil apresentaram resultados discrepantes entre o volume inventariado e explorado, espera-se que em áreas privadas, onde o monitoramento e investimento são menores, a tendência dessa discrepância seja ainda maior. Em áreas de concessão tem-se observado uma taxa de exploração de 61,35%, enquanto em áreas privadas esta taxa foi de 92,96% da Autorização de Exploração Florestal (PEREIRA, 2020). Ou seja, 38% do volume estimado em áreas públicas foi influenciado pela ocorrência de oco, descarte, substituição e superestimativa de volume, enquanto nas áreas privadas apenas 8%. Deixando evidente

que as áreas privadas estão mais suscetíveis a venda de crédito ilegal para “esquentamento” de madeiras oriunda de extração ilegal de outras áreas, pois não existe justificativa para tamanha diferença (PEREIRA, 2020).

Existem pelo menos três maneiras pelas quais os comerciantes ilegais de madeira contornam esse sistema (CARVALHO et al., 2019). Primeiramente, empreendimentos florestais podem adquirir notas fiscais e documentos de origem florestal de locais onde o governo autorizou a extração, onde os titulares de licenças muitas vezes superestimam a quantidade de madeira extraída do projeto de manejo autorizado para dar aparência de legalidade à madeira extraída de áreas não autorizadas, como em áreas griladas ou que não possuem licenciamento (CARVALHO et al., 2019). Em segundo lugar, falsos pequenos comerciantes de madeira são criados em nome de “laranjas”, simulando a movimentação de produtos madeireiros que, na realidade, são transferidos para grandes madeireiros reais em áreas com alto potencial de exploração (POLÍCIA FEDERAL, 2017). Em terceiro lugar, os volumes de espécies madeireiras com alto valor comercial são superestimados nas licenças de corte (BRANCALION et al., 2018; CARVALHO et al., 2019). Todas as maneiras listadas envolvem a superestimativa do volume de madeira, evidenciando que a baixa acurácia dos métodos utilizados para a estimativa do volume comercial é um problema real para a conservação da Amazônia. Isto é demonstrado em nossos resultados, que evidenciam uma grande discrepância entre os volumes explorados e inventariados.

As fraudes durante o licenciamento da extração de madeira podem ocorrer como resultado de negligências e corrupção, como é o caso de superestimar o volume ou a densidade das espécies de alto valor econômico (BRANCALION et al., 2018). Além de ser uma forma de fraudar as licenças, a superestimativa do volume de madeira pelo inventário florestal pode comprometer a viabilidade econômica de planos de manejo florestal, dado que os contratos se baseiam no volume quantificado em campo (ALMEIDA; SILVA; STEINBRENNER, 2022; RODRIGUES et al., 2022). Além disso, a viabilidade econômica desses empreendimentos também depende da melhoria dos sistemas públicos que regem a exploração madeireira em florestas nativas. Como é o caso da Resolução N° 406 de 2009 (CONAMA), que não especifica métodos para o ajuste de equações de volume. Por exemplo, os modelos logarítmicos são frequentemente utilizados no Brasil, principalmente em áreas da Amazônia (DE LIMA et al., 2019). No entanto, poucos estudos têm aplicado a transformação das métricas de ajuste para a escala original dos dados (VIBRANS et al., 2015, NASCIMENTO et al., 2020, LEÃO et al.,

2021), resultando em interpretações equivocadas dos estimadores de precisão durante a seleção de equações, como o  $R^2$ ,  $RMSE\%$  e  $Bias\%$  (DE LIMA et al., 2019). Os resultados evidenciam a importância de os órgãos ambientais licenciadores exigirem maior rigidez e critérios estatísticos adequados no desenvolvimento das equações utilizadas no manejo florestal.

#### **4.2. Altura e fator de forma**

Grande parte das equações volumétricas propostas na literatura são compostas pelas variáveis diâmetro ( $DAP$ ) e altura comercial ( $hc$ ), incluindo suas formas combinadas e transformadas (DE LIMA et al., 2019). Modelos que incluem a variável altura possuem maior precisão nas estimativas do volume de madeira do que aqueles que apresentam apenas o diâmetro como variável independente (WEISKITTEL et al., 2011; BURKHART; TOMÉ, 2012; CYSNEIROS et al., 2017; DE LIMA et al., 2019). Porém, cabe ressaltar que a altura é uma variável de difícil medição na floresta tropical, devido a estratificação vertical e heterogeneidade da floresta, podendo gerar mais custos para o inventário florestal (DE LIMA et al., 2021b). Por esses motivos, são necessários cuidados na medição e inserção da altura nos modelos volumétricos, a fim de minimizar os erros nas estimativas (CYSNEIROS et al., 2017). Dentro desta perspectiva, é recomendado utilizar dados de romaneio das árvores exploradas para o ajuste de equações volumétricas, pois o comprimento do fuste (altura comercial) é medido com maior exatidão, enquanto que no censo é estimado (ALMEIDA; SILVA; STEINBRENNER, 2022).

Na maioria dos casos o volume autorizado para corte é estimado a partir do fator de forma 0,7, que vem sendo empregado desde os primeiros inventários florestais realizados na Amazônia (DE LIMA et al., 2019). De tal modo, o volume estimado durante o inventário florestal é influenciado pela precisão da variável altura (DE LIMA et al., 2021b). Por exemplo, para as UMFs I e II de Altamira, a altura inventariada subestimou, em média, 22% da altura real para os diferentes gêneros manejados. As alturas no inventário tendem a ser subestimadas para compensar o uso do fator de forma 0,7, que tende a ser superior ao fator de forma real, conforme constatamos para a maioria dos gêneros comerciais (Figura 4). Consequentemente, nessas áreas houve uma tendência de o volume explorado ser superior ao estimado pelo inventário florestal. Tal tendência é consequência da subestimativa da altura, cujas  $Bias\%$  para estas UMFs evidenciam que o volume inventariado foi inferior ao explorado em até 50%.

Observamos padrão oposto para as UMFs que superestimaram a altura inventariada, como os casos das UMFs IA de Saracá Taquera e IV de Altamira, cujo volume comercial estimado pelo inventário florestal foi superior ao explorado. Nessas áreas foram utilizadas equações generalistas de dupla entrada. Em inventários florestais na Amazônia, é comum usar alturas estimadas em vez de alturas medidas para as estimativas de volume, biomassa ou carbono (NASCIMENTO et al., 2020; DE LIMA et al., 2021b). Essa prática é comum, mas raramente discutida e o efeito nas previsões e na precisão geralmente é negligenciado (NASCIMENTO et al., 2020). Os resultados evidenciam a importância da precisão na tomada da altura em campo, e seu impacto na estimativa do volume inventariado. Nesse contexto, é necessário que o desenvolvimento de modelos hipsométricos para a Amazônia contemplem a variabilidade natural da floresta, investigando os processos ecofisiológicos e ambientais que atuam na dinâmica da vegetação bem como no crescimento em altura das árvores, sendo essencial avaliar a influência de diferentes espécies e gradientes ecológicos sobre a relação diâmetro/altura (DE LIMA et al., 2021b).

Estudos de volumetria em florestas tropicais mostram que diversos fatores podem influenciar as estimativas volumétricas, havendo destaque para as variações na forma e dimensão do fuste. Nessas florestas, a grande variação é ocasionada pela diversidade florística e estrutural (BREDIN; PERES; HAUGAASEN, 2020). A forma do fuste varia de acordo com uma série de fatores, como: características genéticas; espécie; idade; sítio; tratamentos silviculturais; e pela competição intra e interespecífica entre as espécies arbóreas e outras formas de vida, como lianas e cipós (CYSNEIROS et al., 2017). Portanto, também varia entre árvores da mesma espécie, de tal modo que, à medida que a forma do fuste se distancia de uma condição regular, a dificuldade na aplicação de modelos matemáticos para estimativas do volume também aumenta (WEISKITTEL et al., 2011; BURKHART; TOMÉ, 2012; CAMPOS; LEITE, 2017; SOCHA; NETZEL; CYWICKA, 2020). A variabilidade observada nos fatores de forma médios evidencia a discrepância entre as formas do fuste. Por exemplo, o gênero *Mezilaurus* apresentou uma grande variabilidade entre as áreas, partindo de fatores de forma menores que 0,7 até valores próximos a 0,8. Este foi o único gênero que não apresentou nenhuma relação equivalente entre volume explorado e inventariado, o que reforça ainda mais que mesmo dentro de uma espécie ou gênero, o formato das árvores pode variar drasticamente.

Dessa maneira, as equações por espécie tendem a ser mais precisas na estimativa do volume comercial e, conseqüentemente, mais adequadas para o manejo florestal na Amazônia (DOS SANTOS et al., 2020). Os resultados do presente estudo demonstram

diferenças importantes entre as áreas que utilizam equações genéricas e por espécie. Isto fica evidente ao analisar a distribuição de *Bias%*, cuja UMF de Caxiuanã, que utilizou equações por espécie, possui os menores valores, enquanto as UMFs IV de Altamira e IA de Saracá Taquera, que utilizaram equações genéricas, apresentaram os maiores valores de *Bias%*.

### **4.3. Árvores defeituosas**

As árvores defeituosas também ocasionam diferenças entre as estimativas durante as fases pré e pós-exploratória do MFS (ALMEIDA; SILVA; STEINBRENNER, 2022). Pois, as árvores ocas provocam superestimativa da área basal e do volume de madeira utilizável e, por conseguinte, afetam a estimativa do volume em inventários florestais (NOGUEIRA et al., 2006). Defeitos como fustes ocos, rachaduras e tortuosidades, são os principais motivos de perdas volumétricas. Tais padrões podem ser atribuídas às características de florestas mais antigas, ao estado fitossanitário, ao tamanho das árvores e as características físico-mecânicas da madeira de cada espécie (ZHENG et al., 2016; MEDEIROS; NASCIMENTO, 2020; MEDEIROS et al., 2021 ALMEIDA; SILVA; STEINBRENNER, 2022). A principal perda de rendimento da madeira no manejo florestal é ocasionada pela existência de oco nas árvores. Em um estudo realizado na UMF de Saracá Taquera, Almeida et al. (2022), verificaram que a presença de ocos possui forte relação com o diâmetro das árvores, predominando em árvores de maiores dimensões.

Nessas áreas foram verificados 53,5% de árvores ocas, representando, aproximadamente, duas árvores ocas por hectare manejado (ALMEIDA; SILVA; STEINBRENNER, 2022). Uma das formas de contornar o problema de ocos e outros defeitos, se dá na seleção e corte de árvores substitutas. Esta substituição é essencial para diminuir o risco de rendimentos volumétricos e financeiros insuficientes (ALMEIDA; SILVA; STEINBRENNER, 2022; RODRIGUES et al., 2022), apesar de comprometer o estoque remanescente. No entanto, a substituição de árvores com esse defeito soluciona o problema econômico no curto prazo e na safra atual. Em longo prazo, tal prática tem o efeito de acumular árvores ocas sem valor econômico no estoque restante, que utilizam recursos que poderiam ser partilhados para o crescimento de árvores situadas nas classes de diâmetros menores e com maior valor comercial (ZHENG et al., 2016; ALMEIDA; SILVA; STEINBRENNER, 2022). Neste contexto, esta prática, pode impactar negativamente o crescimento da floresta e, conseqüentemente, a sustentabilidade do

manejo florestal (SIST et al., 2021). Além disso, esta prática pode resultar numa maior diferença entre os volumes comerciais inventariados e explorados, pois as árvores substitutas não apresentam as mesmas dimensões das árvores inicialmente selecionadas.

Identificar a presença de ocos nas árvores ainda é um desafio, muitas vezes este tipo de defeito é diagnosticado apenas após a extração (MEDEIROS et al., 2021). Nesse contexto, o teste do oco no inventário 100% seria uma alternativa para solucionar este problema. Apesar disso mais estudos são necessários para ampliar o entendimento sobre a ocorrência de ocos em florestas manejadas (NOGUEIRA et al., 2006; MEDEIROS et al., 2021; ALMEIDA; SILVA; STEINBRENNER, 2022), considerando diferentes espécies, classes de tamanhos (*DAP* e altura) e ambientes.

#### **4.4.Caminhos para a acurácia no manejo florestal**

Apesar de todos os esforços já feitos, está cada vez mais claro que a exploração florestal na Amazônia brasileira promove estimativas com erros acima dos limites aceitáveis, desencadeando problemas em diferentes escalas e magnitudes. Tais estimativas têm contribuído com a degradação da floresta, pondo em risco o futuro da biodiversidade amazônica e todos os serviços ecossistêmicos prestados (CARVALHO et al., 2019). A superestimativa do volume de madeira além de ser um problema para a sustentabilidade do manejo florestal, também é um problema econômico para as empresas, pois a principal concorrente da madeira legal é a madeira oriunda da exploração ilegal, que diminui os preços de mercado e mina os investimentos em áreas de manejo de impacto reduzido.

Os resultados demonstram que são muitos os fatores que interferem na baixa acurácia da estimativa do volume de madeira na Amazônia, desde a imprecisão das medidas de altura em campo até no uso inadequado do fator de forma 0,7, respaldados pela legislação brasileira. No entanto, para solucionar este problema o setor madeireiro não deve contar apenas com as ações governamentais, mas também ser um agente atuante nas tomadas de decisão e implementação de medidas que minimizem a imprecisão das estimativas do volume de madeira na fase pré-exploratória. Dentro desta perspectiva, são apresentadas, resumidamente, algumas medidas importantes que devem ser tomadas, tanto pelo setor público quanto pelo privado:

**Setor privado:** é fundamental que as empresas analisem os dados pós-exploração das Unidades de produção anual (UPAs) anteriores para ajuste e seleção de equações mais

acuradas a partir do segundo POA, sendo que as seguintes metodologias devem ser empregadas de forma criteriosa:

- I. Utilizar dados do romaneio para o ajuste de equações, visando uma maior quantidade de árvores cubadas, contemplando diferentes sítios florestais, além de permitir quantificar as perdas ocasionadas por defeitos, como os ocos, que normalmente ocorrem na exploração;
- II. As equações devem ser ajustadas por espécie, de modo a se contemplar a real variabilidade do formato dos fustes das árvores, com o intuito de minimizar as sub e/ou superestimativas geradas pelo uso de fatores de forma e equações generalistas. Além disso, é importante estimular o uso de equações de dupla entrada, cujas equações hipsométricas devem ser ajustadas a partir das alturas obtidas no romaneio, visando diminuir os erros obtidos de medidas imprecisas, e em muitos casos subjetivas, durante o inventário florestal;
- III. Promover capacitação em estatística e matemática dos envolvidos no manejo florestal, principalmente dos engenheiros responsáveis pelo desenvolvimento de equações volumétricas;
- IV. Padronização na metodologia do romaneio de toras, independente do nicho de mercado (madeira roliça ou serrada).

**Órgãos governamentais:** Os órgãos governamentais necessitam ser mais rigorosos quanto a quantificação do volume de madeira, e tal rigor deve se iniciar na legislação que regulamenta o manejo florestal no Brasil, como é o caso da Resolução N° 406 de 2009. Os seguintes pontos devem ser considerados pelos órgãos governamentais:

- I. Conferências em campo e análises do volume pós-exploração, com o intuito de avaliar discrepâncias entre o que realmente foi explorado e o que foi declarado nos sistemas de cadeia de custódia (SINAFLOR e SISFLORA, por exemplo);
- II. Integração de tecnologias nos sistemas de controle que permitam a sobreposição de dados espaciais de extração de madeira com dados de transporte e localização de propriedades, facilitando a identificação de atividades ilegais;
- III. Disponibilizar dados pré e pós-exploratório de forma transparente e imediata para a sociedade civil e comunidade científica, de modo a fomentar pesquisas na quantificação do volume de madeira que visem maximizar a acurácia;
- IV. Adaptações na legislação brasileira sobre o desenvolvimento e ajuste de equações, exigindo maior rigor e critério, como no uso de equações por espécie

ou outro método que permita modelar a variabilidade natural da floresta amazônica, além da determinação de um número ideal de árvores cubadas para o ajuste e seleção de equações (vide trabalho de Leão et al., 2021);

- V. Desenvolver e disponibilizar equações ao nível de bioma ou ecorregiões da Amazônia, para as diferentes espécies e sítios florestais, considerando o extenso banco de dados dos sistemas de monitoramento;
- VI. Adoção de créditos suplementares em casos necessários, e que esta adição de crédito seja regulamentada por lei.

## **5. CONCLUSÃO**

O volume comercial estimado pré-exploração não é igual ao volume comercial explorado nas unidades de manejo florestal. As formas de obtenção do volume comercial pré-atividade de exploração, praticadas na atualidade por empresas florestais, não são acuradas o suficiente para promover o manejo florestal sustentável. Há forte tendência do inventário florestal 100% em superestimar o volume comercial de madeira efetivamente explorado, independente do gênero e da área manejada. Os principais fatores responsáveis por esta tendência são: medidas imprecisas da altura tomadas em campo, utilização de equações volumétricas generalistas e o uso de fator de forma (0,7) recomendado pela legislação brasileira, que se mostrou superior ao fator de forma da maioria dos gêneros avaliados.

As análises apresentadas neste estudo mostram a necessidade de considerar mais seriamente a questão da acurácia do volume de madeira pelos órgãos governamentais. Pois, a baixa acurácia dos métodos empregados serve como facilitador da criminalidade na região amazônica, como no esquentamento da madeira ilegal. Os resultados também demonstram que os métodos empregados pelo próprio sistema possibilitam a ilegalidade no mercado de madeiras tropicais, devido aos baixos critérios e falta de rigor exigidos pelos órgãos governamentais. Além disso, a baixa acurácia também é um problema potencial para a viabilidade econômica de empresas que praticam o manejo florestal sustentável e arrecadação das concessões florestais por parte do governo federal. Estas constatações destacam a necessidade de reformas urgentes.



## 6. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, B. R. S., et al. (2021). Eficiência de equações volumétricas para *Couratari guianensis* Aubl. em diferentes cenários na Floresta Nacional do Tapajós. **Scientia Forestalis**, 49(130), e 3503.
- ALMEIDA, V. B.; SILVA, J. N. M.; STEINBRENNER, M. K. A. Impacto da ocorrência de árvores ocas no rendimento da colheita de madeira na Floresta Nacional de Saracá-Taquera, Pará. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 42, 2022.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- BRANCALION, P. H. S. et al. Fake legal logging in the brazilian amazon. **Science Advances**, v. 4, n. 8, p. 1–8, 2018.
- BRASIL, 2009. **Resolução Conama nº 406**, de 02 de fevereiro de 2009.
- BREDIN, Y. K.; PERES, C. A.; HAUGAASEN, T. Forest type affects the capacity of Amazonian tree species to store carbon as woody biomass. **Forest Ecology and Management**, v. 473, n. January, p. 118297, 2020.
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. Modeling Forest Trees and Stands. **Dordrecht: Springer Netherlands**, 2012. v. 9789048131
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. Mensuração Florestal: Perguntas e Respostas. 5a edição ed. **Viçosa: UFV**, 2017.
- CARVALHO, W. D. et al. Deforestation control in the Brazilian Amazon: A conservation struggle being lost as agreements and regulations are subverted and bypassed. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 17, n. 3, p. 122–130, 2019.
- CYSNEIROS, V. C. et al. Modelos genéricos e específicos para estimativa do volume comercial em uma floresta sob concessão na Amazônia. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 45, n. 114, p. 295–304, 2017.
- DE ABREU, J. C. et al. Mixed models for biomass prediction in the semiarid zone of Pernambuco State, Brazil. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 48, n. 128, p. 1–11, 2021.
- DE ABREU, J. C. et al. Mixed-Effect Models for Volumetric Estimation of Lumber From Native Amazonian Species. **Floresta**, v. 52, n. 2, p. 384–393, 2022.
- DE LIMA, R. B. et al. Lumber volume modeling of Amazon Brazilian species. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 38, n. 3, p. 262–274, 2019.
- DE LIMA, R. B. et al. Accurate Estimation of Commercial Volume in Tropical Forests. **Forest Science**, v. 67, n. 1, p. 14–21, 2021a.
- DE LIMA, R. B. et al. Height-diameter allometry for tropical forest in northern Amazonia. **PLoS ONE**, v. 16, n. 12 December, 2021b.

DOS SANTOS, M. F. et al. Species-specific equations: Greater precision in commercial volume estimation in managed forests in the Amazon. **Cerne**, v. 26, n. 3, p. 315–330, 2020.

FERREIRA DA SILVA, E. et al. Optimized forest planning: allocation of log storage yards in the Amazonian sustainable forest management area. **Forest Ecology and Management**, v. 472, n. March, p. 118231, 2020.

FINER, M. et al. Logging concessions enable illegal logging crisis in the peruvian amazon. **Scientific Reports**, v. 4, n. September 2013, p. 1–6, 2014.

KUZNETSOVA, A.; BROCKHOFF, P. B.; CHRISTENSEN, R. H. B. lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. **Journal of Statistical Software**, v. 82, n. 13, p. 1–26, 2017.

LEÃO, F. M. et al. How many trees are necessary to fit an accurate volume model for the Amazon forest? A site-dependent analysis. **Forest Ecology and Management**, v. 480, n. September 2020, 2021.

MEDEIROS, S. H. DA S. et al. Diagnosis of hollow trees in an area of effective sustainable forest management in the Amazon forest. **International Journal for Innovation Education and Research**, v. 9, n. 1, p. 527–539, 2021.

MEDEIROS, S. H. DA S.; NASCIMENTO, C. C. DO; SILVA, G. M. Viabilidade do uso de árvores ocas da espécie *Astronium lecointei* Ducke por meio da utilização da tecnologia da madeira e do design. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 25, n. 4, 2020.

NAKAGAWA, S.; JOHNSON, P. C. D.; SCHIELZETH, H. The coefficient of determination  $R^2$  and intra-class correlation coefficient from generalized linear mixed-effects models revisited and expanded. **Journal of the Royal Society Interface**, v. 14, n. 134, 2017.

NASCIMENTO, R. G. M. et al. The tree height estimated by non-power models on volumetric models provides reliable predictions of wood volume: The Amazon species height modelling issue. **Trees, Forests and People**, v. 2, n. June, p. 100028, 2020.

NETTO, S. P.; BEHLING, A. Rational volumetric models: Tested in forest stands of *Acacia mearnsii* de wild in Southern Brazil. **Cerne**, v. 25, n. 4, p. 491–505, 2019.

NOGUEIRA, M. A. et al. Secondary metabolites from *Diplodia maydis* and *Sclerotium rolfsii* with antibiotic activity. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 37, n. 1, p. 14–16, 2006.

PEREIRA, D. C. P. Produção e rendimento da exploração em florestas públicas e privadas na Amazônia Oriental. 2020. 49 p. Dissertação de mestrado, **Universidade Federal Rural da Amazônia**, Belém.

**POLÍCIA FEDERAL**, (2017). PF combate fraudes em sistemas de controle de produtos florestais, <http://www.pf.gov.br/agencia/noticias/2017/10/pf-combate-fraudes-em-sistemas-de-controle-de-produtos-florestais> (accessed 2 March 2022).

RESENDE, R. T. et al. Environmental uniformity, site quality and tree competition interact to determine stand productivity of clonal *Eucalyptus*. **Forest Ecology and Management**, v. 410, n. September 2017, p. 76–83, 2018.

- RICHARDSON, V. A.; PERES, C. A. Temporal decay in timber species composition and value in amazonian logging concessions. **PLoS ONE**, v. 11, n. 7, p. 1–22, 2016.
- ROBINSON, A. P.; DUURSMA, R. A.; MARSHALL, J. D. A regression-based equivalence test for model validation: Shifting the burden of proof. **Tree Physiology**, v. 25, n. 7, p. 903–913, 2005.
- RODRIGUES, M. I. et al. Financial variability of the second cutting of forest management in Tapajós National Forest, Brazil. **Forest Policy and Economics**, v. 136, n. September 2021, 2022.
- SANTOS, H.F.; FILHO, A.F., GAMA, J.R.V., RETSLAFF, F.A.S., COSTA, D.L.; GOMES, K.M.A.; CRUZ, G. S.; ALMEIDA, B.R.S., (2019). **Eficiência de equações volumétricas para manilkara spp. em floresta manejada na amazônia oriental**. *nativa, sinop*, v. 7, n. 5, p. 621-628.
- SANTOS, H.G., JACOMINE, P.K.T., ANJOS, L.H.C., OLIVEIRA, V.A., LUMBRERAS, J.F., COELHO, M.R., ALMEIDA, J.A., CUNHA, T.J.F., OLIVEIRA, J.B., (2013). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 3rd ed. Embrapa, Brasília, Brazil.
- SIST, P. et al. Sustainability of Brazilian forest concessions. **Forest Ecology and Management**, v. 496, n. March, p. 119440, 2021.
- SOCHA, J.; NETZEL, P.; CYWICKA, D. Stem taper approximation by artificial neural network and a regression set models. **Forests**, v. 11, n. 1, p. 1–14, 2020.
- VIBRANS, A. C.; MOSER, P.; OLIVEIRA, L. Z.; MAÇANEIRO, J. P. Generic and specific stem volume models for three subtropical forest types in southern Brazil. **Annals of Forest Science**, v. 72, p. 865-874, 2015.
- WEISKITTEL, A. R. et al. **Forest Growth and Yield Modeling**. [s.l: s.n.].
- ZHENG, Z. et al. Hollows in living trees develop slowly but considerably influence the estimate of forest biomass. **Functional Ecology**, v. 30, n. 5, p. 830–838, 2016.

## **CAPÍTULO 2: MODELOS DE RAZÃO PARA ESTIMATIVA DO VOLUME COMERCIAL APLICADO AO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL**

**Resumo:** Estimar o volume comercial é de fundamental importância para a atividade do manejo florestal sustentável na Amazônia, baseado nessas estimativas que são realizadas diversas etapas como o licenciamento ambiental, planejamento da exploração florestal e previsão da quantificação da madeira a ser comercializada na atividade. A diversidade natural da Floresta Amazônica acomoda uma abundância de espécies de diferentes formas e tamanhos, conferindo diversas especificidades, o que torna necessário o uso de métodos acurados e atuais para o dimensionamento da produção de madeira. Este trabalho teve como objetivo estudar e propor modelos de razão, elaborados com a teoria de modelos mistos (linear e não linear), combinando variáveis do inventário florestal e romaneio, visando a obtenção de maior acurácia nas estimativas do volume comercial, além de comparar seu desempenho com o tradicional modelo de Schumacher-Hall. Utilizou-se dados de volume de aproximadamente sessenta e seis mil árvores distribuídas entre dez gêneros de ampla comercialização, inventariadas e exploradas em diferentes unidades de conservação sob concessão florestal. Metade das árvores foram separadas para os ajustes e validação dos modelos e a outra metade para simulação/validação do volume comercial estimado pelos modelos ajustados. O modelo de razão mais preciso obtido na validação foi selecionado para a simulação juntamente com o modelo de Schumacher-Hall, foi avaliada a acurácia e similaridade do volume comercial simulado frente ao volume comercial real, para cada gênero botânico, a partir do cálculo do erro quadrático médio percentual, bias percentuais e pelo teste de equivalência. Os resultados demonstraram que os modelos de razão tiveram desempenho superior ao de Schumacher-Hall tanto na validação como também na simulação, evidenciando que as estimativas de volume comercial com a utilização de modelos de razão apresentam maior acurácia comparado com outras formas de estimativas, sendo acuradas o suficiente para promover o manejo florestal sustentável na Amazônia.

Palavras-chave: Acurácia; Manejo Florestal Sustentável; Modelagem de Efeitos Mistos; Madeira ilegal

**Abstract:** Estimating the commercial volume is of fundamental importance for the activity of sustainable forest management in the Amazon, based on these estimates that are performed several steps such as environmental licensing, harvest planning and forecast quantification of timber to be marketed in the activity. The natural diversity of the Amazon Forest accommodates an abundance of species of different shapes and sizes, conferring various specificities, which makes necessary the use of accurate and current methods for the dimensioning of wood production. The objective of this study was to adjust and propose ratio models, developed with the theory of mixed models (linear and non-linear), combining variables from the forest inventory and logged, in order to obtain greater accuracy in estimates of merchantable volume, and to compare its performance with the traditional Schumacher-Hall model. Data on the volume of approximately sixty-six thousand trees distributed among ten widely commercialized genera, inventoried and exploited in different conservation units under forest concession were used. Half of the trees were separated for the adjustments and validation of the models and the other half for the simulation of the merchantable volume estimated by the adjusted models. The most accurate ratio model obtained in the validation was selected for the simulation together with the Schumacher-Hall model, the accuracy and similarity of the simulated merchantable volume compared to the real merchantable volume was evaluated, for each botanical genus, from the calculation of the percentage mean square error, percentage bias and by the equivalence test. The results showed that the ratio models performed better than the Schumacher-Hall both in the validation and in the simulation, evidencing that the estimates of commercial volume with the use of ratio models present greater accuracy compared to other forms of estimates, being accurate enough to promote sustainable forest management in the Amazon.

**Keywords:** Accuracy; Sustainable Forest Management; Mixed Effect modelling; Illegal Timber

## 1. INTRODUÇÃO

Em florestas tropicais como a Amazônia brasileira, as variáveis dendrométricas possuem uma grande heterogeneidade ocasionada pela diversidade florística e estrutural (BREDIN; PERES; HAUGAASEN, 2020). Ao se considerar o porte das árvores, bem como a diversidade das espécies que compõe as florestas tropicais, as equações de volume deveriam ser ajustadas para espécies individualmente ou espécies agrupadas com características semelhantes para garantir estimativas mais precisas (SOARES et al., 2011). Na Amazônia, o volume comercial é estimado durante a fase pré-exploratória do manejo florestal sustentável (MFS), a partir de fatores de forma e equações de volume genéricos. Tais medidas são utilizadas de forma generalizada, independente da espécie. No entanto, estas abordagens têm propiciado o fornecimento de estimativas imprecisas e superestimadas do volume de madeira, comprometendo o MFS e auxiliando o crime organizado no esquentamento de madeira ilegal na região (BRANCALION et al., 2018).

O Brasil é um dos maiores produtores de madeira tropical roliça, com 81 milhões de m<sup>3</sup> (48% da produção total) de toras exploradas anualmente (DE LIMA et al., 2019; FERREIRA DA SILVA et al., 2020), sendo uma importante atividade para a economia brasileira e principalmente para a região norte do país. Além do uso racional, o manejo sustentável das florestas naturais deve ser aprimorado como parte fundamental da manutenção dos ecossistemas das florestas tropicais e do desenvolvimento econômico dessas regiões (WORBES; SCHÖNGART, 2019). Nesse contexto, o uso adequado dos recursos florestais tropicais constitui um dos maiores desafios atuais para a ciência florestal. Sendo primordial o fornecimento de estimativas precisas do volume de madeira a ser explorado.

A quantificação do volume de madeira na Amazônia brasileira é regida pela Resolução N° 406, de 02 de fevereiro de 2009 do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, que determina o uso do fator de forma 0,7 no primeiro plano operacional anual (POA) e exige o desenvolvimento de equações de volume para POAs subsequentes. No entanto, a legislação não determina quais metodologias devem ser empregadas para o ajuste de equações de volume (BRASIL, 2009; LEÃO et al., 2021). A maioria dos planos de manejo florestal sustentável (PMFS) devido a facilidade prática de uso, têm optado por equações de volume genéricas. Conseqüentemente, a falta de regulamentação no desenvolvimento de equações, tem propiciado o fornecimento de estimativas imprecisas do volume de madeira (SANTOS et al., 2019; ALMEIDA et al., 2021).

Desse modo, a partir da necessidade de se obter estimativas de volume precisas, o presente trabalho vem testar a utilização de modelos de razão para as estimativas volumétricas na atividade pré-exploratória. Equações de razão de volume são ajustadas com o propósito de otimizar a predição do volume comercial para determinado limite do fuste (BURKHART, 1977; CAO, BURKHART E MAX, 1980; MATNEY E SULLIVAN, 1982; BI, 1999), portanto, espera-se que tal abordagem propicie estimativas mais precisas do volume comercial. A premissa da utilização dos modelos de razão para a pesquisa partiu da impossibilidade de alterar a forma de coleta de dados dos inventários florestais 100% em campo, pois incorreria mais custos e aumentaria o tempo para a realização da atividade.

Neste contexto, o presente estudo ajustou e propôs modelos de razão, elaborados com a teoria de modelos mistos (linear e não linear), combinando variáveis do inventário florestal e romaneio, visando a obtenção de maior acurácia nas estimativas do volume comercial. Utilizou-se dados de volume de aproximadamente 66.000 árvores de dez gêneros comerciais, inventariadas e exploradas em diferentes unidades de conservação sob concessão florestal no Brasil. Neste sentido, a seguinte questão foi levantada: É possível obter com maior acurácia o volume comercial a partir da combinação de dados do inventário florestal pré-exploratório e romaneio, utilizando modelos de razão? Devido ao uso dos dados de romaneio das unidades de produção anuais (UPAs) anteriores, o uso de equações preditoras para correção de erro na variável altura coletada no inventário e dos modelos de razão, pressupõe-se que as estimativas de volume sejam acuradas, não diferindo estatisticamente do volume real.

## **2. METODOLOGIA**

### **2.1. Área de estudo**

Foram selecionadas áreas sob concessão florestal localizadas em cinco unidades de conservação federal (3 no estado do Pará e 2 no estado de Rondônia) abrigando 13 unidades de manejo florestal, gerenciadas por 8 diferentes empresas. Conforme classificação de Köppen, o clima das áreas estudadas é classificado como 'Am', sendo caracterizado como tropical quente e úmido, com sazonalidade bem definida e um curto período de seca (Tabela 9) (ALVARES et al., 2013). A precipitação média anual varia entre 2000 e 2600 mm, enquanto a temperatura média varia entre 25 e 28,3 °C. Para os solos das áreas, há o predomínio de Argissolos e Neossolos (SANTOS et al., 2013).

Tabela 9. Áreas selecionadas para avaliação, com informações sobre as unidades de conservação e unidades de manejo florestal.

Floresta nacional	Área total (ha)	Unidade de manejo florestal (UMF)	Área sob concessão (ha)	Solo	PPT (mm)	Temp. (°C)	Tipologia Florestal
Altamira (PA)	689.012,00	UMF I	39.073,00	Argi	2300	28,25	Ombrófila Densa e Ombrófila Aberta
		UMF II	112.994,00	Argi			
		UMF III	98.414,00	Argi			
		UMF IV	111.436,00	Argi			
Caxiuana (PA)	322.400,00	UMF III	52.168,08	Lato	2100	25,9	Ombrófila Densa
Saracá-Taquera (PA)	441.152,00	UMF IA	26.898,00	Argi; Neo	2000	25,5	Ombrófila Densa
		UMF IB	59.408,00	Argi; Neo			
		UMF II	29.769,82	Neo			
Jacundá (RO)	220.644,00	UMF I	55.014,27	Lato	2600	25	Ombrófila Aberta
		UMF II	32.757,96	Lato			
Jamari (RO)	222.156,58	UMF I	17.176,36	Lato	2400	25	Ombrófila Densa e Ombrófila Aberta
		UMF III	46.184,20	Podz.			

As concessões federais selecionadas possuem contratos assinados para o manejo florestal, sendo as Florestas Nacionais (FLONAs): do Jamari (RO); de Jacundá (RO); de Altamira (PA); de Saracá-Taquera (PA) e; Caxiuana (PA), conforme Figura 8.

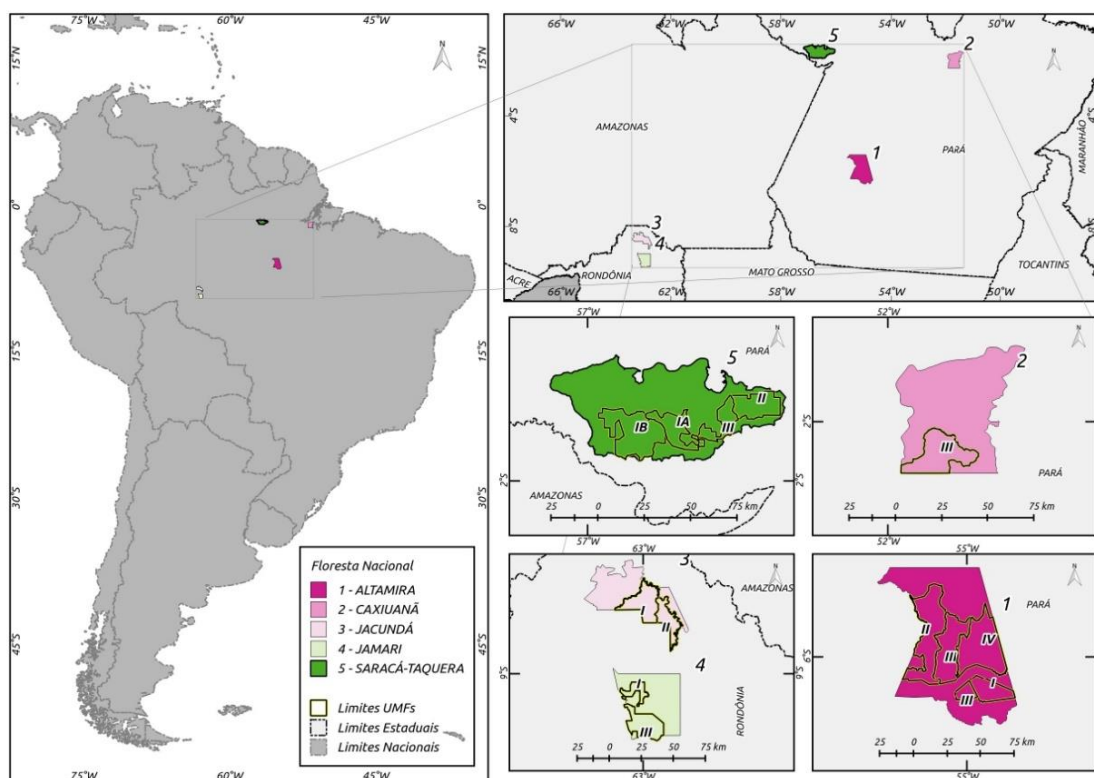


Figura 8. Mapa de localização das áreas selecionadas para análise



## 2.2. Banco de dados

### 2.2.1. Espécies comerciais

A identificação taxonômica das espécies madeireiras na Amazônia é problemática, e uma mistura de diferentes nomes científicos e comuns é utilizada para um único grupo de espécies de madeira comercial (BRANCALION et al., 2018). Para contornar este problema, optamos por realizar as análises ao nível de gênero, pois apresentam características semelhantes, como o mesmo hábito e valor comercial. Nesse sentido, 10 gêneros foram selecionados para os ajustes de modelos volumétricos, que são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Lista de gêneros selecionados para as análises

N	Família	Gênero	Nome científico	Nome vulgar
1	Anacardiaceae	<i>Astronium spp.</i>	<i>Astronium lecointei</i>	Muiracatiara
2	Bignoniaceae	<i>Tabebuia spp.</i>	<i>Tabebuia incanus</i> <i>Tabebuia impetiginosus</i> <i>Tabebuia serratifolius</i>	Ipê
3	Fabaceae	<i>Dinizia spp.</i>	<i>Dinizia excelsa</i>	Angelim-vermelho
4	Fabaceae	<i>Dipteryx spp.</i>	<i>Dipteryx magnifica</i> <i>Dipteryx odorata</i> <i>Dipteryx polyphylla</i>	Cumarú
5	Fabaceae	<i>Hymenaea spp.</i>	<i>Hymenaea courbaril</i>	Jatobá
6	Fabaceae	<i>Hymenolobium spp.</i>	<i>Hymenolobium elatum</i> <i>Hymenolobium excelsum</i> <i>Hymenolobium heterocarpum</i> <i>Hymenolobium petraeum</i> <i>Hymenolobium pulcherrimum</i>	Angelim-pedra
7	Goupiaceae	<i>Goupia spp.</i>	<i>Goupia glabra</i>	Cupiúba
8	Lauraceae	<i>Mezilaurus spp.</i>	<i>Mezilaurus itauba</i> <i>Mezilaurus synandra</i>	Itaúba
9	Moraceae	<i>Bagassa spp.</i>	<i>Bagassa guianensis</i>	Tatajuba
10	Sapotaceae	<i>Manilkara spp.</i>	<i>Manilkara amazônica</i> <i>Manilkara bidentada</i> <i>Manilkara elata</i> <i>Manilkara huberi</i>	Maçaranduba

### 2.2.2. Origem dos Dados

Os dados utilizados no presente estudo foram cedidos pela Coordenação de Monitoramento e Auditoria Florestal do Serviço Florestal Brasileiro e tem origem no Sistema de Cadeia de Custódia (SCC) do Serviço Florestal Brasileiro (SFB), que é um sistema para cadastro e rastreamento de todas as informações pertinentes ao manejo

florestal das áreas sob concessão, o que permite ao SFB controlar a produção, o transporte dos produtos madeireiros e a quantificação dos valores a serem repassados pelos concessionários ao governo federal em áreas sob concessão florestal. O volume explorado ou pós-exploratório foi calculado durante o romaneio, a partir do processamento dos dados coletados na mensuração individual das toras estocadas nos pátios. A cubagem foi realizada pelo método de Smalian (Eq. 1) (DE LIMA et al., 2019; ALMEIDA; SILVA; STEINBRENNER, 2022).

$$v_L = \frac{\left[ \left( Db^2 * \frac{\pi}{4} \right) + \left( \left( Dt^2 * \frac{\pi}{4} \right) \right) \right]}{2} * L \quad (1)$$

Onde:  $v_L$  é o volume comercial explorado ( $m^3$ );  $Db$  é o diâmetro da base da tora (m), obtido a partir da média dos diâmetros na seção – em cruz;  $Dt$  é o diâmetro do topo da tora (m), obtido a partir da média dos diâmetros na seção – em cruz;  $L$  é o comprimento da tora (m).

## **2.3. Análise dos dados**

### **2.3.1. Modelagem volumétrica**

Foram selecionados quatro modelos de razão (Tabela 11), sendo um linear e três não lineares. O modelo linear de razão volumétrica foi adaptado a partir do modelo de Honer, enquanto os demais três modelos não lineares são tradicionalmente utilizados na literatura florestal. Os modelos de razão volumétrica foram comparados com o modelo de Schumacher-Hall em sua forma não linear, que foi ajustado considerando tanto as alturas obtidas no inventário florestal, quanto as alturas mensuradas durante o romaneio de toras. Diferente dos modelos de razão tradicionais, a razão empregada neste estudo se deu entre o volume comercial total e o volume da primeira tora, ambos obtidos durante o romaneio.

Tabela 11. Modelos selecionados para a estimativa do volume comercial de dez gêneros comerciais na Amazônia, Brasil.

N	Equação	Referência
M1	$\frac{v_s/2}{v_L} = 1 - \varphi_1 * \left( \frac{Dt^{\varphi_2}}{DAP^{\varphi_3}} \right)$	Burkhart, 1977
M2	$\frac{v_s}{v_L} = 1 - \varphi_1 * \left[ \frac{(h - Ls)^{\varphi_2}}{h^{\varphi_3}} \right]$	Cao, 1980
M3	$\frac{v_s}{v_L} = 1 + \varphi_1 * [(h - Ls)^{\varphi_2} * h^{\varphi_3}]$	Burkhart; Tomé (2012)
M4	$\frac{v_s}{v_L} = \varphi_0 + \varphi_1 * \left( \frac{Ls}{h} - 1 \right) + \varphi_2 * \left( \frac{Dt}{DAP} \right) + \varphi_3 * \left( \frac{Db}{DAP} \right)$	-
M5	$v_L = \varphi_0 * DAP^{\varphi_1} * h_l^{\varphi_2}$	Schumacher;
M6	$v_L = \varphi_0 * DAP^{\varphi_1} * h^{\varphi_2}$	Hall (1933)

Em que:  $v_s$ : volume da primeira tora ( $m^3$ );  $v_L$ : volume comercial ( $m^3$ );  $DAP$ : diâmetro a altura do peito (m);  $h$ : altura comercial do romaneio (m);  $h_l$ : altura comercial do inventário florestal (m);  $L$ : comprimento da primeira tora (m);  $Db$ : diâmetro da base (m);  $Dt$ : diâmetro do topo (m).

### 2.3.2. Ajuste e validação

Os modelos foram ajustados a partir da abordagem de modelos mistos lineares (modelo 4, Tabela 11) e não lineares (modelos 1, 2, 3, 5 e 6, Tabela 11), pois, ao considerar que dados provenientes de florestas inequidêneas são altamente diversificados, a abordagem de modelagem de efeitos mistos permite analisar dados hierarquicamente estruturados de modo mais eficiente do que qualquer outra abordagem. A estrutura do modelo linear misto utilizado tem a seguinte forma (RESENDE et al., 2018; DE ABREU et al., 2021):

$$y_i = X_i\beta + Z_i b_i + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

$$b_i \sim N(0, G), \quad \varepsilon_i \sim N(0, R_i) \quad (3)$$

Onde  $\beta$  são os efeitos fixos;  $b_i$  são os efeitos aleatórios;  $X_i$  e  $Z_i$  são as matrizes de incidência sobre os efeitos fixos e aleatórios, respectivamente;  $\varepsilon_i$  é o erro aleatório,  $G$  é a matriz de variância e covariância de efeitos aleatórios,  $R_i$  é a matriz  $n \times n$  da covariância residual ( $R_i = I \times \sigma^2$ , onde  $I$  é a matriz de identidade).

O modelo não linear misto contém coeficientes com efeitos fixos comuns a todas as árvores e coeficientes como efeitos aleatórios específicos a cada árvore. Para os modelos não lineares a estrutura adotada tem a seguinte forma:

$$\varphi_i = \begin{bmatrix} \varphi_{1i} \\ \varphi_{2i} \\ \vdots \\ \varphi_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{1i} \\ b_{2i} \\ \vdots \\ b_{ni} \end{bmatrix} = \beta + b_i \quad (4)$$

$$b_i \sim N(0, \sigma^2); \varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2) \quad (5)$$

Os coeficientes  $\beta$  representam os efeitos fixos, os coeficientes  $b_i$  representam os efeitos aleatórios, enquanto  $\varepsilon_{ij}$  representa o erro obtido pelo modelo. Tanto os efeitos aleatórios quanto os erros foram assumidos como independentes. Em alguns casos, nem todos os coeficientes continham um componente aleatório. De tal modo, a matriz de efeitos aleatórios (matriz de tamanho  $S_1 \times S_2$ ) contém apenas um subconjunto das colunas da matriz de efeitos fixos (matriz identidade de tamanho  $S_1 \times S_1$ ), o que permite que alguns elementos de  $\varphi_i$  não tenha nenhum efeito aleatório associado (PINHEIRO et al., 2022).

A decomposição dos coeficientes do modelo foi realizada para inserir a variável “Gênero botânico” como efeito aleatório. O objetivo foi obter modelos capazes de captar a variabilidade entre os diferentes gêneros comerciais. Devido à grande quantidade de observações, optou-se por dividir o presente banco de dados em 50% para ajuste e 50% para validação, de forma que todos os gêneros e classes de diâmetros se encontrassem presentes em ambos os conjuntos de dados. Os ajustes foram realizados a partir da função “nlme” do pacote nlme (PINHEIRO et al., 2022) e da função “lmer” do pacote lme4 para o modelo linear no software estatístico “R” (KUZNETSOVA; BROCKHOFF; CHRISTENSEN, 2017). Os critérios de precisão adotados para a seleção de modelos foram: Raiz quadrada do erro médio percentual ( $RMSE\%$ ), Critério de informação de Akaike ( $AIC$ ) e coeficiente de correlação entre os valores estimados e observados ( $r_{\hat{y}y}$ ). Para os modelos ajustados e com todos os parâmetros significativos foram elaborados gráficos de valores observados *versus* valores estimados, dispersão de resíduo percentual e histograma de resíduos percentuais.

$$RMSE\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum(\hat{y}_i - y_i)^2}{N}}}{\bar{y}_i} * 100 \quad (6)$$

$$AIC = 2K - 2\ln(L) \quad (7)$$

$$r_{\hat{y}y} = \frac{\sum_{i=1}^n \hat{y}_i \cdot y_i}{\sqrt{(\hat{y}_i^2)(y_i^2)}} \quad (8)$$

Onde:  $RMSE\%$ : raiz quadrada do erro médio (%);  $AIC$ : Critério de Informação de Akaike;  $r_{\hat{y}y}$ : coeficiente de correlação;  $\hat{y}_i$ : variável estimada;  $y_i$ : variável observada.

Para verificar a diferença entre os volumes estimados e observados pelos modelos foi utilizado o teste de equivalência de Robinson; Duursma; Marshall (2005) (Regression-based TOST using bootstrap). O teste de equivalência inverte a hipótese nula, isto é, determina a hipótese nula como indicadora de dissimilaridade entre os valores estimados e observados. O teste foi realizado da seguinte forma: a) subtraiu-se a média das estimativas de todos os valores estimados; b) estabeleceu-se as regiões de equivalência para os parâmetros da regressão, onde consideramos 25% ao nível de 95% de probabilidade, com 1000 bootstrapping; c) ajustou-se a regressão linear entre as observações e valores estimados; d) foi testada a igualdade do intercepto calculando os dois limites dos intervalos de confiança para o parâmetro, que foi comparado com a região estimada de equivalência; e) a igualdade para o coeficiente de inclinação foi testada calculando o intervalo de confiança unilateral, que foi comparado com a região de equivalência estimada e; f) a hipótese de dissimilaridade foi aceita ou rejeitada com base nos resultados do teste. O teste de equivalência foi realizado apenas para os modelos selecionados com base nos critérios de precisão e qualidade de ajuste, sendo um modelo de Schumacher-Hall e um modelo de razão. As análises de validação foram realizadas para cada gênero.

### 2.3.3. Simulação do volume explorado

Para responder a segunda questão (“é possível obter, com maior acurácia, o volume comercial a partir da combinação de dados do inventário florestal pré-exploratório e romaneio?”) o volume comercial foi simulado a partir de dados combinados do inventário florestal e do romaneio de toras. Dessa forma, foram necessários modelos para estimar as seguintes variáveis: diâmetro da base ( $Db$ , m); diâmetro do topo ( $Dt$ , m) da primeira tora; comprimento da primeira tora ( $L$ , m) e altura comercial das árvores ( $h$ , m). Foram pré selecionados os seguintes modelos (Tabela 12).

Tabela 12. Modelos selecionados para a estimativa das variáveis dendrométricas de dez gêneros comerciais na Amazônia, Brasil.

N	Equação	Referência
<b>M7</b>	$Db = \varphi_0 * DAP^{\varphi_1}$	Exponencial
<b>M8</b>	$Dt = \varphi_0 * DAP^{\varphi_1}$	
<b>M9</b>	$h = \exp\left[\left(\varphi_0 + \varphi_1 * Db\right) + \left(\frac{\varphi_2}{DAP}\right) * \left(\frac{1}{Dt^{\varphi_3}}\right)\right] * \varphi_4^x$	Nascimento et al. (2020)
<b>M10</b>	$L = \varphi_1 + \left(\varphi_0 - \frac{\varphi_1}{Db}\right) * \exp(-\varphi_2 * Dt) * \varphi_3^x$	Curva de decaimento

Em que:  $v_s$ : volume da primeira tora ( $m^3$ );  $v_L$ : volume comercial ( $m^3$ );  $DAP$ : diâmetro a altura do peito (m);  $h$ : altura comercial do romaneio (m);  $h_i$ : altura comercial do inventário florestal (m);  $L$ : comprimento da primeira tora (m);  $Db$ : diâmetro da base (m);  $Dt$ : diâmetro do topo (m);  $x$ : variável binária indicando a presença de defeitos nas árvores como ocos e rachaduras, sendo 1 para presença de defeitos e 0 para ausência de defeitos aparentes.

Assim como para os modelos de volume, foi adotada a abordagem de modelos não lineares mistos, cujos coeficientes foram decompostos inserindo o efeito “Gênero botânico”. O volume comercial “simulado” foi obtido a partir das estimativas geradas pelos modelos da Tabela 12 da seguinte forma: a) Os diâmetros da base ( $Db$ ) e do topo ( $Dt$ ) foram estimados com dados de  $DAP$  do inventário florestal; b) As estimativas de  $Db$  e  $Dt$  foram utilizadas para estimar a altura comercial ( $h$ ) e o comprimento da primeira seção ( $L$ ); c) O volume da primeira tora foi calculado a partir da equação 1, utilizando as estimativas de  $Db$ ,  $Dt$ ,  $h$  e  $L$ ; d) O volume comercial foi estimado a partir dos modelos que apresentaram maior precisão, isto é, que foram selecionados para validação. Sendo um dos modelos de Schumacher-Hall (M5 ou M6) e um modelo de razão.

Por fim, avaliou-se a acurácia e similaridade do volume comercial “simulado” frente ao volume comercial real, para cada gênero botânico, a partir do cálculo do erro quadrático médio percentual ( $RMSE\%$ ), bias percentuais ( $Bias\%$ ) e pelo teste de equivalência, seguindo a mesma metodologia apresentada para a validação.

$$Bias\% = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)}{\sum_{i=1}^N y_i} * 100 \quad (9)$$

Onde:  $Bias\%$ : Viés (%);  $\hat{y}_i$  = valor estimado pelo modelo;  $y_i$  = valor observado;  $\bar{y}$  = média de  $y$

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Modelos volumétricos

Os modelos volumétricos testados apresentaram estatísticas de precisão distintas, variando entre 12 e 46%. As equações M2, M3 e M4 apresentaram os menores valores para a  $RMSE\%$  e as maiores correlações entre valores observados e estimados (Tabela 13). Em relação ao critério de informação de Akaike, M4 apresentou o menor valor para o critério. Os modelos de Schumacher-Hall apresentaram elevados valores de  $RMSE\%$ , similar ao observado para o modelo de razão M1. Embora tenha apresentado um alto valor para  $RMSE\%$  quando comparado aos demais modelos, o modelo de Schumacher-Hall (M6), contendo medições reais de altura comercial na etapa de romaneio, foi superior ao modelo M5 (Schumacher ajustado com os dados de altura do inventário florestal 100%), apresentando menor  $RMSE\%$ , menor  $AIC$  e maior correlação (Tabela 13).

Tabela 13. Coeficientes ajustados e estatísticas de precisão para cada equação volumétrica, em áreas de concessão florestal na Amazônia, Brasil.

N	Coefficientes	Estimativa	Erro padrão	p-valor	$RMSE\%$	$AIC$	$r_{\hat{y}y}$
<b>M1</b>	$\beta_1$	0,8089	0,0154	<0,005	46,2461	-60460,33	0,8438
	$\beta_2$	0,1951	0,0215	<0,005			
	$\beta_3$	-0,0338	0,0058	<0,005			
<b>M2</b>	$\beta_1$	1,2724	0,0296	<0,005	13,3017	-126417,6	0,9836
	$\beta_2$	1,1616	0,0081	<0,005			
	$\beta_3$	1,2516	0,0053	<0,005			
<b>M3</b>	$\beta_1$	-1,2373	0,0350	<0,005	13,2867	-126498,6	0,9837
	$\beta_2$	1,1504	0,0120	<0,005			
	$\beta_3$	-1,2321	0,0155	<0,005			
<b>M4</b>	$\beta_0$	0,9682	0,0013	<0,005	12,342	-133116,3	0,9862
	$\beta_1$	0,9203	0,0070	<0,005			
	$\beta_2$	-0,1338	0,0100	<0,005			
	$\beta_3$	0,1650	0,0104	<0,005			
<b>M5</b>	$\beta_0$	4,9059	0,7174	<0,005	41,403	152912,9	0,8276
	$\beta_1$	1,7477	0,0537	<0,005			
	$\beta_2$	0,2390	0,0527	<0,005			
<b>M6</b>	$\beta_0$	0,6599	0,0612	<0,005	32,656	137291,4	0,8966
	$\beta_1$	1,5807	0,0339	<0,005			
	$\beta_2$	0,8964	0,0358	<0,005			

Em que:  $\beta_i$  = coeficientes dos efeitos fixos;  $RMSE\%$  = raiz quadrada do erro médio percentual;  $AIC$  = Critério de Informação de Akaike e;  $r_{\hat{y}y}$  = correlação entre valores observados e estimados.

As estimativas dos efeitos aleatórios para cada gênero estão elencadas na Tabela 14. Nota-se que para os modelos de razão (M1, M2, M3 e M4), os coeficientes aleatórios apresentaram valores positivos e negativos, no entanto, com baixa variação. Por outro

lado, os modelos M5 e M6 apresentaram maiores valores para os coeficientes aleatórios, com destaque para aqueles relacionados ao coeficiente  $b_0$ .

Tabela 14. Estimativa dos efeitos aleatórios para os modelos volumétricos mistos em áreas de concessão florestal na Amazônia, Brasil.

<b>N</b>	<b>Gêneros</b>	<b><math>b_0</math></b>	<b><math>b_1</math></b>	<b><math>b_2</math></b>	<b><math>b_3</math></b>
<b>M1</b>	<i>Astronium</i>	-	0,0499	-0,0680	-
	<i>Bagassa</i>	-	0,0030	-0,0688	-
	<i>Dinizia</i>	-	-0,0197	-0,0601	-
	<i>Dipteryx</i>	-	-0,0519	0,0523	-
	<i>Goupia</i>	-	-0,0365	0,0770	-
	<i>Hymenaea</i>	-	0,0514	0,0085	-
	<i>Hymenolobium</i>	-	0,0112	0,0641	-
	<i>Manilkara</i>	-	0,0178	0,0418	-
	<i>Mezilaurus</i>	-	-0,0924	0,0557	-
	<i>Tabebuia</i>	-	0,0672	-0,1024	-
<b>M2</b>	<i>Astronium</i>	-	-0,0180	0,0097	-
	<i>Bagassa</i>	-	-0,0263	-0,0034	-
	<i>Dinizia</i>	-	0,0507	-0,0042	-
	<i>Dipteryx</i>	-	0,0886	-0,0228	-
	<i>Goupia</i>	-	0,0912	-0,0236	-
	<i>Hymenaea</i>	-	-0,0724	0,0200	-
	<i>Hymenolobium</i>	-	0,0707	-0,0040	-
	<i>Manilkara</i>	-	-0,0058	-0,0038	-
	<i>Mezilaurus</i>	-	0,0234	-0,0214	-
	<i>Tabebuia</i>	-	-0,2020	0,0534	-
<b>M3</b>	<i>Astronium</i>	-	-0,0424	0,0293	-0,0332
	<i>Bagassa</i>	-	0,0941	-0,0248	0,0379
	<i>Dinizia</i>	-	-0,0207	-0,0147	0,0166
	<i>Dipteryx</i>	-	-0,0351	-0,0352	0,0235
	<i>Goupia</i>	-	-0,0199	-0,0388	0,0308
	<i>Hymenaea</i>	-	0,0378	0,0310	-0,0192
	<i>Hymenolobium</i>	-	0,0176	-0,0288	0,0440
	<i>Manilkara</i>	-	-0,1852	0,0503	-0,0949
	<i>Mezilaurus</i>	-	-0,0462	-0,0133	-0,0136
	<i>Tabebuia</i>	-	0,2001	0,0450	0,0081
<b>M4</b>	<i>Astronium</i>	-	0,0241	-0,0211	0,0324
	<i>Bagassa</i>	-	-0,0172	0,0329	-0,0281
	<i>Dinizia</i>	-	0,0337	0,0033	0,0050
	<i>Dipteryx</i>	-	-0,0055	0,0192	-0,0255
	<i>Goupia</i>	-	-0,0025	0,0173	-0,0184
	<i>Hymenaea</i>	-	0,0049	-0,0220	0,0197
	<i>Hymenolobium</i>	-	0,0227	-0,0337	0,0296



<b>N</b>	<b>Gêneros</b>	<b><math>b_0</math></b>	<b><math>b_1</math></b>	<b><math>b_2</math></b>	<b><math>b_3</math></b>
	<i>Manilkara</i>	-	-0,0191	-0,0344	0,0224
	<i>Mezilaurus</i>	-	-0,0404	0,0585	-0,0666
	<i>Tabebuia</i>	-	-0,0007	-0,0201	0,0296
<b>M5</b>	<i>Astronium</i>	1,5810	-0,1597	-0,0807	-
	<i>Bagassa</i>	2,0973	0,0359	-0,1561	-
	<i>Dinizia</i>	-0,8252	-0,4084	0,0939	-
	<i>Dipteryx</i>	-2,8810	0,0533	0,2396	-
	<i>Goupia</i>	-0,3237	0,0593	-0,1169	-
	<i>Hymenaea</i>	3,9884	0,0596	-0,1596	-
	<i>Hymenolobium</i>	-1,1250	0,1804	0,0911	-
	<i>Manilkara</i>	0,9469	0,0648	-0,1382	-
	<i>Mezilaurus</i>	-0,8406	-0,0045	-0,0429	-
	<i>Tabebuia</i>	-2,6182	0,1194	0,2698	-
	<b>M6</b>	<i>Astronium</i>	-0,0180	-0,1648	-0,0277
<i>Bagassa</i>		0,1444	-0,0061	-0,0822	-
<i>Dinizia</i>		0,1938	-0,1880	-0,0253	-
<i>Dipteryx</i>		0,0997	0,0479	-0,0680	-
<i>Goupia</i>		0,0207	0,0751	-0,0616	-
<i>Hymenaea</i>		-0,0933	-0,0257	0,0501	-
<i>Hymenolobium</i>		-0,1176	0,1128	0,1021	-
<i>Manilkara</i>		0,0426	0,1017	-0,0634	-
<i>Mezilaurus</i>		0,1582	0,0086	-0,0893	-
<i>Tabebuia</i>		-0,4305	0,0385	0,2653	-

Em que:  $b_i$ : coeficientes aleatórios para os modelos volumétricos.

Ao observar a dispersão de resíduos, a relação “observado vs estimado” e distribuição de classes de resíduos (Figura 9), fica evidente que os modelos volumétricos de razão M2, M3 e M4, ajustados com dados mensurados de altura do romaneio, apresentaram estimativas mais precisas com tendências similares, evidenciando a importância desta variável para a quantificação do volume de madeira na Amazônia. Por outro lado, o modelo M1, ajustado apenas com dados de diâmetros ( $D_t$  e  $DAP$ ), apresentou fortes tendências em superestimar o volume de madeira.

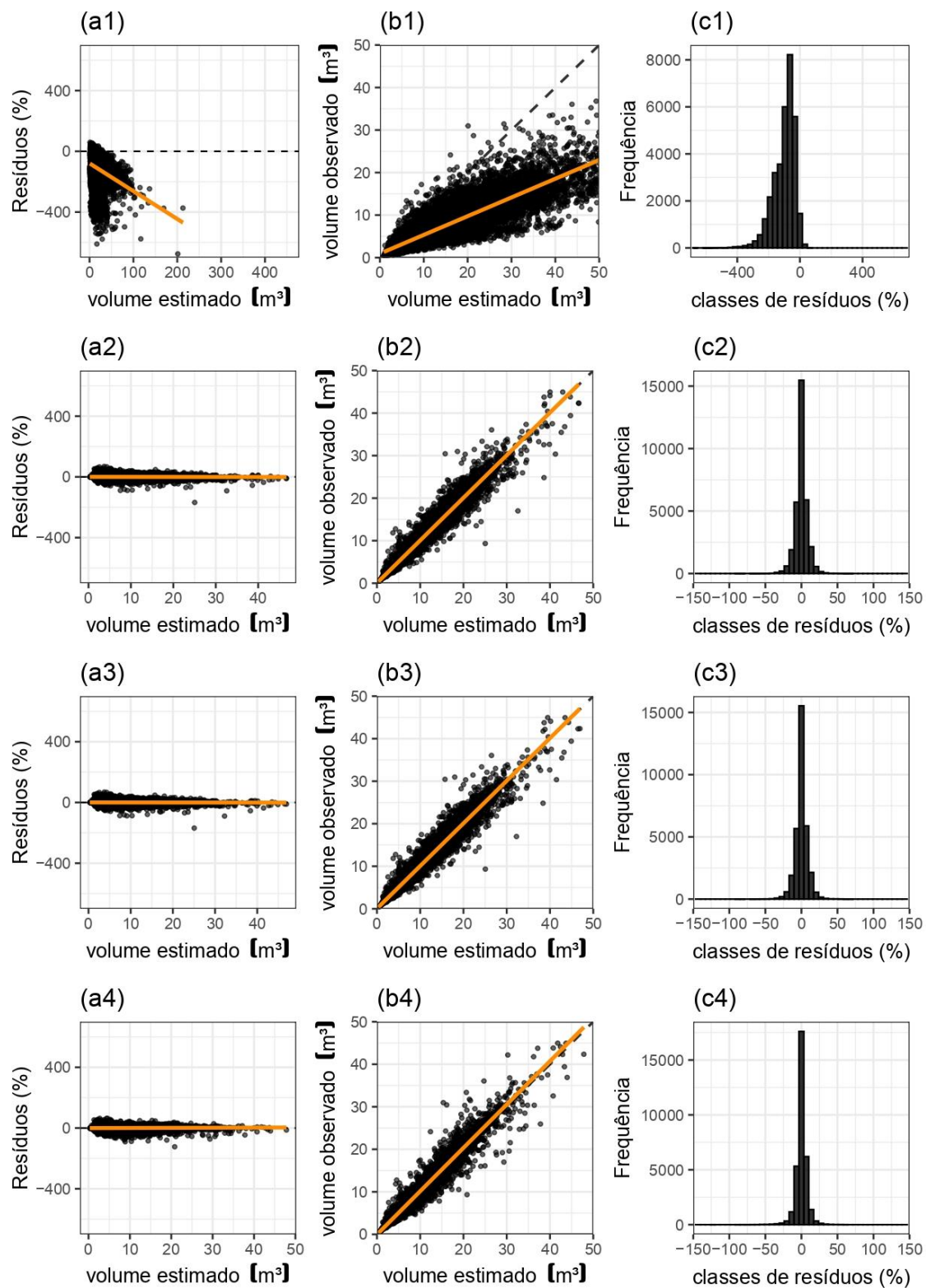


Figura 9. Dispersão de resíduos (ai), relação entre observados x estimados (bi) e distribuição de classes de resíduos (ci) para equações volumétricas de razão para espécies comerciais em áreas de manejo florestal na Amazônia brasileira. Em que: a1, b1 e c1 = modelo M1; a2, b2 e c2= modelo M2; a3, b3 e c3 = modelo M3 e a4, b4 e c4 = modelo M4.

A dispersão de resíduos dos modelos M5 e M6, apresentaram tendências de superestimativas, sendo o modelo M5, ajustado com dados de alturas estimadas durante o inventário florestal 100%, o que gerou maiores tendências, com maior frequência observada nos menores volumes (Figura 10 a1). Por outro lado, o modelo M6, ajustado com dados de altura do romaneio, apresentou tendências de superestimativa inferiores quando comparado ao modelo M5 (Figura 10 a4).

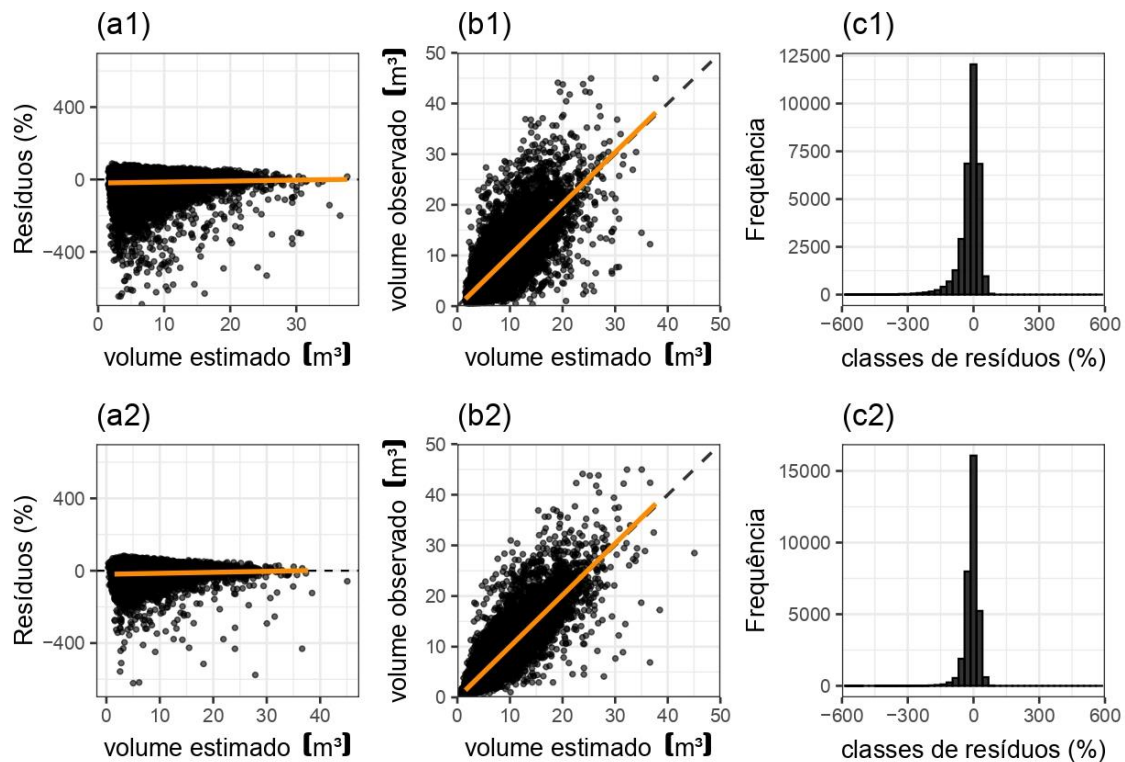


Figura 10. Dispersão de resíduos (ai), relação entre observados x estimados (bi) e distribuição de classes de resíduos (ci) para equações volumétricas para espécies comerciais em áreas de manejo florestal na Amazônia brasileira. Em que: a1, b1 e c1 = modelo M5 e a2, b2 e c2 = modelo M6.

### 3.2. Modelos dendrométricos: Diâmetros da base e do topo, altura comercial e comprimento da primeira tora

Nos ajustes dos modelos para a estimativa do diâmetro da base e do topo, foram obtidos valores similares para  $RMSE\%$ , sendo 15,83% para o modelo M7 e 14,94% para o modelo M8. O coeficiente de correlação variou entre de 0,80 e 0,86, indicando uma forte correlação entre os valores estimados e observados. Por outro lado, os modelos ajustados para estimar a altura comercial e o comprimento da primeira tora, apresentaram valores de  $RMSE\%$  superiores a 15% e coeficiente de correlação inferior a 0,8.

Tabela 15. Coeficientes ajustados e estatísticas de precisão para cada equação volumétrica, em áreas de concessão florestal na Amazônia, Brasil.

<i>N</i>	<i>Coefficientes</i>	<i>Estimativa</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>p-valor</i>	<i>RMSE%</i>	<i>AIC</i>	$r_{\hat{y}y}$
<b>M7</b>	$\beta_0$	0,8577	0,0111	<0,005	15,834	-51513	0,808
	$\beta_1$	0,7892	0,0164	<0,005			
<b>M8</b>	$\beta_0$	0,7882	0,0129	<0,005	14,941	-62719	0,8621
	$\beta_1$	0,8712	0,0173	<0,005			
<b>M9</b>	$\beta_0$	2,8769	0,0724	<0,005	20,772	178936	0,792
	$\beta_1$	0,1380	0,0380	<0,005			
	$\beta_2$	-0,0174	0,0085	0,041			
	$\beta_3$	1,3362	0,0948	<0,005			
	$\beta_4$	0,5544	0,0359	<0,005			
<b>M10</b>	$\beta_0$	10,8337	0,6921	<0,005	21,5738	126411	0,668
	$\beta_1$	1,0918	0,2971	<0,005			
	$\beta_2$	0,6911	0,1129	<0,005			
	$\beta_3$	1,4153	0,0563	<0,005			

Em que:  $\beta_i$  = coeficientes dos efeitos fixos;  $RMSE\%$  = raiz quadrada do erro médio percentual;  $AIC$  = Critério de Informação de Akaike e;  $r_{\hat{y}y}$  = correlação entre valores observados e estimados.

As estimativas dos efeitos aleatórios para cada gênero estão elencadas na Tabela 16. Assim como para os modelos volumétricos, os coeficientes aleatórios apresentaram valores positivos e negativos e com baixa variação. Por outro lado, o modelo M10 apresentou maiores valores para os coeficientes aleatórios, com destaque para aqueles relacionados ao coeficiente  $b_0$ .

Tabela 16. Estimativa dos efeitos aleatórios para os modelos volumétricos mistos em áreas de concessão florestal na Amazônia, Brasil.

<i>N</i>	<i>Gêneros</i>	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
<b>M7</b>	<i>Astronium</i>	-0,017	-0,0508	-	-	-
	<i>Bagassa</i>	0,02116	-0,0458	-	-	-
	<i>Dinizia</i>	0,04236	-0,0697	-	-	-
	<i>Dipteryx</i>	-0,0217	0,02976	-	-	-
	<i>Goupia</i>	-0,0654	0,03627	-	-	-
	<i>Hymenaea</i>	0,0489	-0,0589	-	-	-
	<i>Hymenolobium</i>	0,00029	0,05692	-	-	-
	<i>Manilkara</i>	-0,0198	0,03242	-	-	-
	<i>Mezilaurus</i>	0,03533	0,03639	-	-	-
	<i>Tabebuia</i>	-0,0242	0,03342	-	-	-

<b>N</b>	<b>Gêneros</b>	<b><math>b_0</math></b>	<b><math>b_1</math></b>	<b><math>b_2</math></b>	<b><math>b_3</math></b>	<b><math>b_4</math></b>
<b>M8</b>	<i>Astronium</i>	-0,027	-0,0466	-	-	-
	<i>Bagassa</i>	0,00808	-0,0018	-	-	-
	<i>Dinizia</i>	0,08403	-0,1194	-	-	-
	<i>Dipteryx</i>	-0,0083	0,02374	-	-	-
	<i>Goupia</i>	-0,04	0,00661	-	-	-
	<i>Hymenaea</i>	0,02429	0,00684	-	-	-
	<i>Hymenolobium</i>	0,05376	0,04046	-	-	-
	<i>Manilkara</i>	-0,0463	0,061	-	-	-
	<i>Mezilaurus</i>	-0,0239	-0,0202	-	-	-
	<i>Tabebuia</i>	-0,0246	0,04925	-	-	-
<b>M9</b>	<i>Astronium</i>	0,1849	0,1317	-0,0035	-	-0,1273
	<i>Bagassa</i>	-0,0517	0,0369	0,0041	-	-0,0079
	<i>Dinizia</i>	0,0460	-0,1697	0,0028	-	0,0091
	<i>Dipteryx</i>	-0,1336	-0,0725	0,0147	-	0,0912
	<i>Goupia</i>	-0,1867	-0,1254	0,0261	-	0,1349
	<i>Hymenaea</i>	0,1377	0,1299	-0,0342	-	-0,0791
	<i>Hymenolobium</i>	0,0049	-0,0420	-0,0190	-	0,0972
	<i>Manilkara</i>	-0,1059	0,0336	0,0225	-	0,0207
	<i>Mezilaurus</i>	-0,3709	0,1324	0,0330	-	0,0955
	<i>Tabebuia</i>	0,4754	-0,0548	-0,0464	-	-0,2345
<b>M10</b>	<i>Astronium</i>	-1,4702	-1,1363	-0,3502	-0,0462	-
	<i>Bagassa</i>	-2,1729	-0,7035	-0,3051	-0,2388	-
	<i>Dinizia</i>	1,0118	0,2887	0,1249	0,1157	-
	<i>Dipteryx</i>	-0,8032	-0,3694	-0,1806	0,0271	-
	<i>Goupia</i>	1,2364	0,0438	0,1516	0,0480	-
	<i>Hymenaea</i>	0,5616	-0,2142	0,1075	0,0320	-
	<i>Hymenolobium</i>	-0,2323	0,0905	-0,0675	0,2053	-
	<i>Manilkara</i>	3,9222	1,5270	0,6693	0,0904	-
	<i>Mezilaurus</i>	1,6717	1,3718	0,3397	0,1362	-
	<i>Tabebuia</i>	-3,7251	-0,8985	-0,4897	-0,3697	-

Em que:  $b_i$ : coeficientes aleatórios para os modelos dendrométricos.

A dispersão de resíduos dos modelos M7 e M8, apresentaram ligeiras tendências de superestimativas, como pode ser observado na Figura 11 a1 e a2. Apesar disso, os resíduos se concentraram com maior frequência na classe zero.

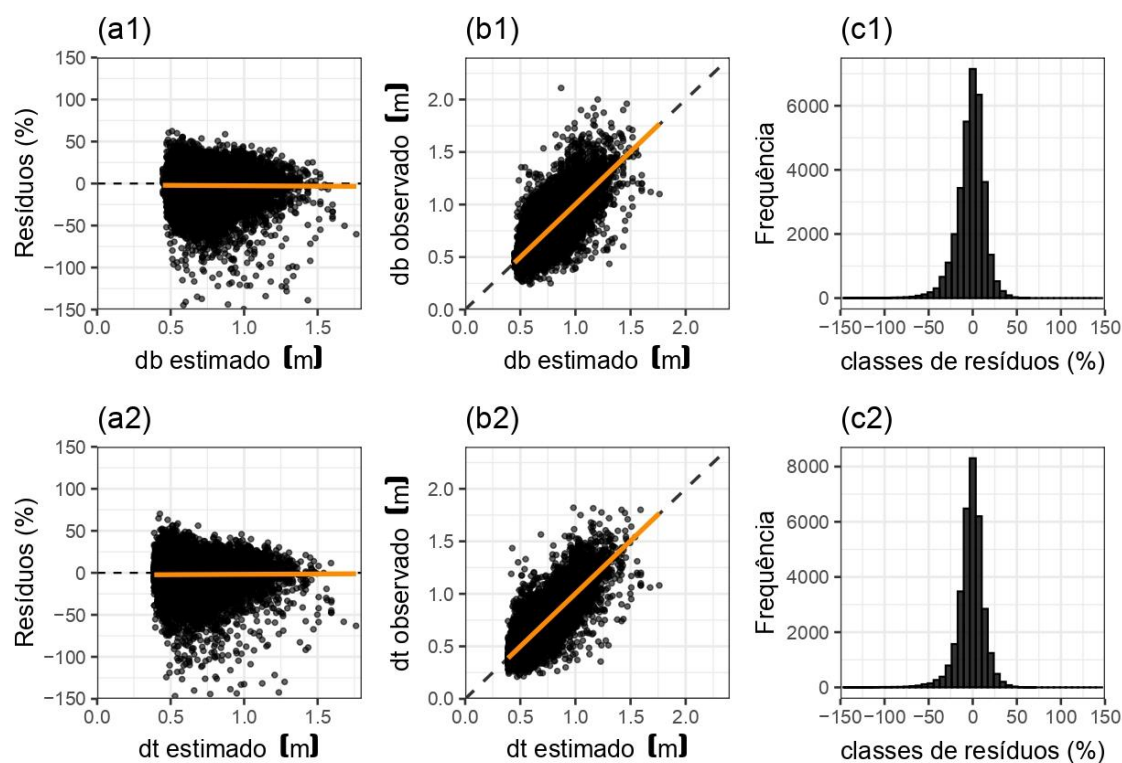


Figura 11. Dispersão de resíduos (ai), relação entre observados x estimados (bi) e distribuição de classes de resíduos (ci) para a estimativa do diâmetro da base e do topo de espécies da primeira tora, de espécies comerciais em áreas de manejo florestal na Amazônia brasileira. Em que: a1, b1 e c1 = modelo M7 e a2, b2 e c2= modelo M8.

A dispersão de resíduos dos modelos M9 e M10, também apresentaram tendências de superestimativas, sendo o modelo M9, ajustado para estimar a altura comercial, o que gerou maiores tendências, com maior frequência observada nas menores alturas (Figura 12 a1), que corresponde à altura de árvores com defeitos. Apesar disso, os resíduos se concentraram majoritariamente em classes próximas a zero, como pode ser observado no histograma para os resíduos. Da mesma forma que o modelo M9, o modelo M10, ajustado para estimar o comprimento da primeira tora, apresentou tendências de superestimativa, porém com resíduos concentrados na classe zero (Figura 12 a2).

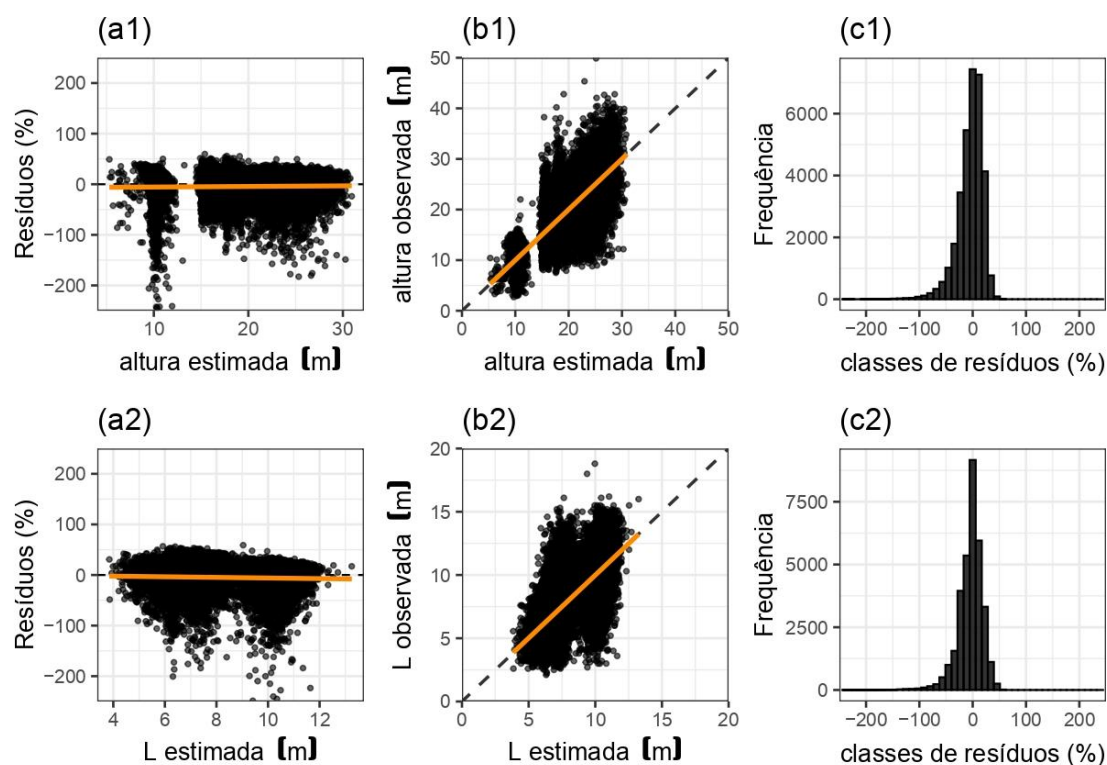


Figura 12. Dispersão de resíduos (ai), relação entre observados x estimados (bi) e distribuição de classes de resíduos (ci) para equações de altura comercial e comprimento da primeira tora para espécies comerciais em áreas de manejo florestal na Amazônia brasileira. Em que: a1, b1 e c1 = modelo M9 e a2, b2 e c2 = modelo M10.

### 3.3. Validação dos modelos volumétricos e dendrométricos

Os modelos de razão volumétrica ajustados com dados de alturas mensuradas durante o romaneio, apresentaram resultados semelhantes quanto a precisão das estimativas. Assim, o modelo M4 foi selecionado para a validação, por apresentar menor  $RMSE\%$  e  $AIC$ , bem como maior correlação entre valores estimados e observados. Por outro lado, para os modelos ajustados para estimar  $Db$ ,  $Dt$ ,  $h$  e  $L$ , obtivemos resultados de não equivalência para alguns gêneros botânicos, cujas regiões de dissimilaridade se concentraram para o coeficiente de inclinação da regressão. Dentre os dez gêneros avaliados, apenas *Bagassa* e *Tabebuia* não obtiveram equivalência em todos os modelos dendrométricos.

Tabela 17. Teste de equivalência para as estimativas dos modelos volumétricos e dendrométricos (*Db*, *Dt*, *h* e *L*) em áreas de concessão florestal na Amazônia brasileira.

Gênero	Modelo	Intervalo de confiança		Região de similaridade		Dissimilaridade	
		Intercepto	Inclinação	Intercepto	Inclinação	Intercepto	Inclinação
<i>Astronium</i>	M4	7,2406 ± 7,31	1,0221 ± 1,0628	5,3834 ± 8,9723	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Bagassa</i>		8,348 ± 8,6376	1,0443 ± 1,1132	6,1658 ± 10,2763	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Dinizia</i>		11,1981 ± 11,3232	0,9887 ± 1,0244	8,3029 ± 13,8382	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Dipteryx</i>		4,0896 ± 4,1153	0,9926 ± 1,0284	3,0566 ± 5,0943	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Goupia</i>		3,8228 ± 3,8502	0,9587 ± 0,994	2,8739 ± 4,7898	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Hymenaea</i>		9,3642 ± 9,4239	1,0395 ± 1,0607	6,9384 ± 11,564	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Hymenolobium</i>		7,1843 ± 7,2406	1,005 ± 1,0431	5,3449 ± 8,9082	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Manilkara</i>		4,665 ± 4,6813	1,0093 ± 1,0217	3,4811 ± 5,8019	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Mezilaurus</i>		3,7346 ± 3,7514	0,9842 ± 1,008	2,7991 ± 4,6652	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Tabebuia</i>		5,8635 ± 5,9151	1,0762 ± 1,1086	4,2991 ± 7,1652	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Astronium</i>	M6	7,1896 ± 7,3612	1,0828 ± 1,1899	5,4884 ± 9,1473	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Bagassa</i>		8,1383 ± 8,8731	0,7628 ± 1,1732	6,3241 ± 10,5401	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Dinizia</i>		11,101 ± 11,4132	0,9559 ± 1,062	8,4273 ± 14,0454	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Dipteryx</i>		4,0559 ± 4,1508	0,7954 ± 1,0121	3,1162 ± 5,1936	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Goupia</i>		3,792 ± 3,8837	0,9061 ± 1,0473	2,8411 ± 4,7351	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Hymenaea</i>		9,3183 ± 9,4635	0,9802 ± 1,0299	7,1229 ± 11,8715	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Hymenolobium</i>		7,1406 ± 7,2876	0,9743 ± 1,0566	5,3613 ± 8,9355	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Manilkara</i>		4,6504 ± 4,6955	1,0247 ± 1,0652	3,5203 ± 5,8672	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Mezilaurus</i>		3,7124 ± 3,7774	0,9828 ± 1,0784	2,8051 ± 4,6752	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Tabebuia</i>		5,8179 ± 5,9606	0,8979 ± 1,0178	4,4245 ± 7,3742	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Astronium</i>	M7	0,6947 ± 0,7037	0,9204 ± 1,0416	0,5235 ± 0,8726	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Bagassa</i>		<b>0,8326 ± 0,8729</b>	<b>0,6927 ± 1,0041</b>	<b>0,6344 ± 1,0573</b>	<b>0,75 ± 1,25</b>	<b>Rejeita</b>	<b>Aceita</b>
<i>Dinizia</i>		0,9309 ± 0,9463	0,9681 ± 1,0702	0,7003 ± 1,1672	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Dipteryx</i>		0,6389 ± 0,6455	0,8567 ± 1,0018	0,4825 ± 0,8041	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita



Gênero	Modelo	Intervalo de confiança		Região de similaridade		Dissimilaridade	
		Intercepto	Inclinação	Intercepto	Inclinação	Intercepto	Inclinação
<i>Goupia</i>	M8	0,6215 ± 0,6302	0,8108 ± 1,0443	0,4646 ± 0,7743	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Hymenaea</i>		0,8218 ± 0,8296	0,9856 ± 1,0562	0,6218 ± 1,0364	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Hymenolobium</i>		0,733 ± 0,741	1,0213 ± 1,0975	0,5487 ± 0,9144	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Manilkara</i>		0,6567 ± 0,6602	1,0068 ± 1,0487	0,4937 ± 0,8228	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Mezilaurus</i>		0,6659 ± 0,6718	0,9906 ± 1,0823	0,5019 ± 0,8365	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Tabebuia</i>		0,6352 ± 0,6424	0,8966 ± 1,0159	0,4802 ± 0,8003	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Astronium</i>		0,6171 ± 0,6243	0,9475 ± 1,0541	0,4644 ± 0,7741	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Bagassa</i>		0,7448 ± 0,7775	0,7548 ± 1,018	0,5736 ± 0,9559	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Dinizia</i>		0,9047 ± 0,9177	0,9865 ± 1,0871	0,6804 ± 1,1341	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Dipteryx</i>		0,5826 ± 0,5887	0,8312 ± 0,9847	0,4399 ± 0,7332	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Goupia</i>		0,5749 ± 0,5825	0,8232 ± 1,0438	0,4322 ± 0,7204	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Hymenaea</i>		0,7254 ± 0,731	0,9752 ± 1,0297	0,5489 ± 0,9149	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Hymenolobium</i>		0,7106 ± 0,7175	1,0066 ± 1,0617	0,5327 ± 0,8879	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Manilkara</i>		0,5644 ± 0,5673	1,0024 ± 1,0392	0,4241 ± 0,7069	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Mezilaurus</i>		0,564 ± 0,5693	0,9673 ± 1,0639	0,4259 ± 0,7098	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Tabebuia</i>		0,5667 ± 0,5727	0,8944 ± 1,019	0,4272 ± 0,7119	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Astronium</i>	M9	24,0762 ± 24,4835	0,9377 ± 1,0693	18,0487 ± 30,0812	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<b><i>Bagassa</i></b>		<b>18,0368 ± 18,971</b>	<b>0,3409 ± 1,0446</b>	<b>14,1844 ± 23,6406</b>	<b>0,75 ± 1,25</b>	<b>Rejeita</b>	<b>Aceita</b>
<i>Dinizia</i>		16,8806 ± 17,194	0,9805 ± 1,0925	12,8216 ± 21,3694	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Dipteryx</i>		13,7349 ± 13,916	0,968 ± 1,0315	10,4782 ± 17,4636	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Goupia</i>		13,5481 ± 13,7604	0,8793 ± 0,9768	10,2884 ± 17,1473	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Hymenaea</i>		22,5161 ± 22,7963	0,9155 ± 0,9981	16,9478 ± 28,2463	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Hymenolobium</i>		16,6763 ± 16,9051	0,9585 ± 1,0342	12,5462 ± 20,9103	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Manilkara</i>		16,719 ± 16,848	0,9877 ± 1,0231	12,583 ± 20,9717	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Mezilaurus</i>		12,5762 ± 12,7442	0,9361 ± 1,0031	9,4759 ± 15,7932	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita

Gênero	Modelo	Intervalo de confiança		Região de similaridade		Dissimilaridade	
		Intercepto	Inclinação	Intercepto	Inclinação	Intercepto	Inclinação
<i>Tabebuia</i>	M10	23,9674 ± 24,3099	0,913 ± 1,0094	18,1028 ± 30,1713	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Astronium</i>		24,0791 ± 24,4902	0,9416 ± 1,0644	18,0487 ± 30,0812	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Bagassa</i>		<b>6,3311 ± 6,7578</b>	<b>0,4475 ± 1,2705</b>	<b>4,8921 ± 8,1534</b>	<b>0,75 ± 1,25</b>	<b>Rejeita</b>	<b>Aceita</b>
<i>Dinizia</i>		6,478 ± 6,6015	0,8758 ± 0,999	4,9075 ± 8,1791	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Dipteryx</i>		8,2105 ± 8,3271	0,9344 ± 1,018	6,2863 ± 10,4772	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Goupia</i>		8,3055 ± 8,4522	1,0002 ± 1,0978	6,2855 ± 10,4758	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Hymenaea</i>		6,7297 ± 6,8303	0,9272 ± 1,0944	5,0709 ± 8,4515	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Hymenolobium</i>		7,4427 ± 7,5437	0,9527 ± 1,0298	5,6047 ± 9,3411	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Manilkara</i>		8,0007 ± 8,0699	0,9569 ± 1,0195	6,0117 ± 10,0195	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Mezilaurus</i>		8,7545 ± 8,8821	0,9727 ± 1,0568	6,5397 ± 10,8994	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Tabebuia</i>		<b>6,2688 ± 6,3308</b>	<b>1,0393 ± 1,5581</b>	<b>4,687 ± 7,8116</b>	<b>0,75 ± 1,25</b>	<b>Rejeita</b>	<b>Aceita</b>

Na Figura 13 é apresentado as relações entre “observados e estimados” para os dados de ajuste e validação, para os modelos de volume M4 e M6. Nota-se uma maior dispersão para o modelo M6, principalmente para os gêneros *Dinizia* e *Hymenolobium*.

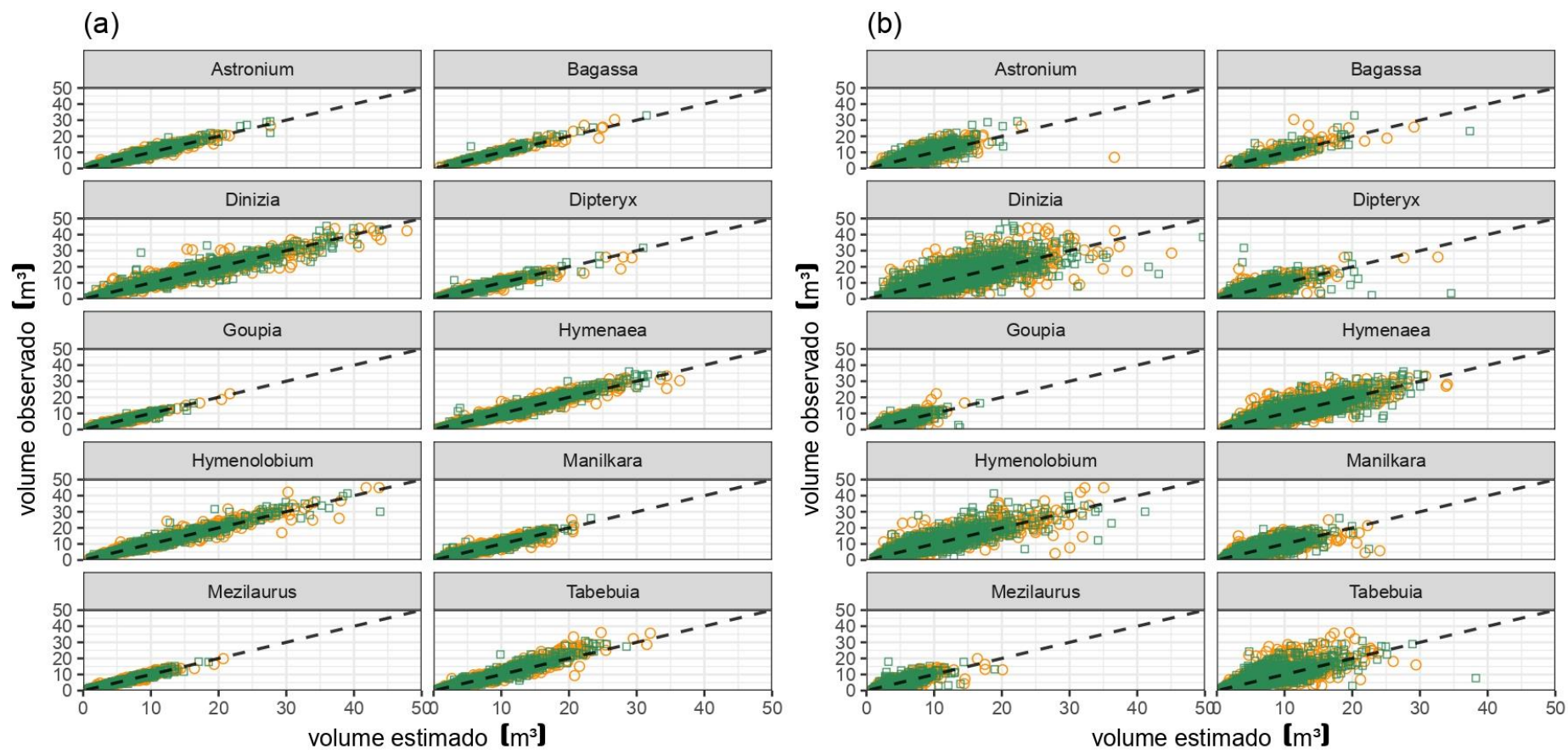


Figura 13. Relação entre observados x estimados para equações de volume validadas de dez gêneros comerciais em áreas de manejo florestal na Amazônia brasileira. Em que: a = modelo M4 e b= modelo M6.

### 3.4. Acurácia e validação da simulação do volume comercial de madeira

Os modelos de M4 e M6 apresentaram estimativas similares para a simulação do volume comercial de madeira. Os valores de  $RMSE\%$  variaram entre 30 e 45%, enquanto os valores para  $Bias\%$  variaram entre -5 a 2%. Para o teste de validação, que se deu entre o volume real e o volume simulado, apenas o gênero *Bagassa* não foi validado. Para  $Bias\%$ , o modelo M4 apresentou tendências em subestimar o volume comercial, enquanto o modelo M6 apresentou tendências em superestimar. Apesar disso, todos os valores de  $Bias\%$  foram iguais ou inferiores a 5% (Figura 14).

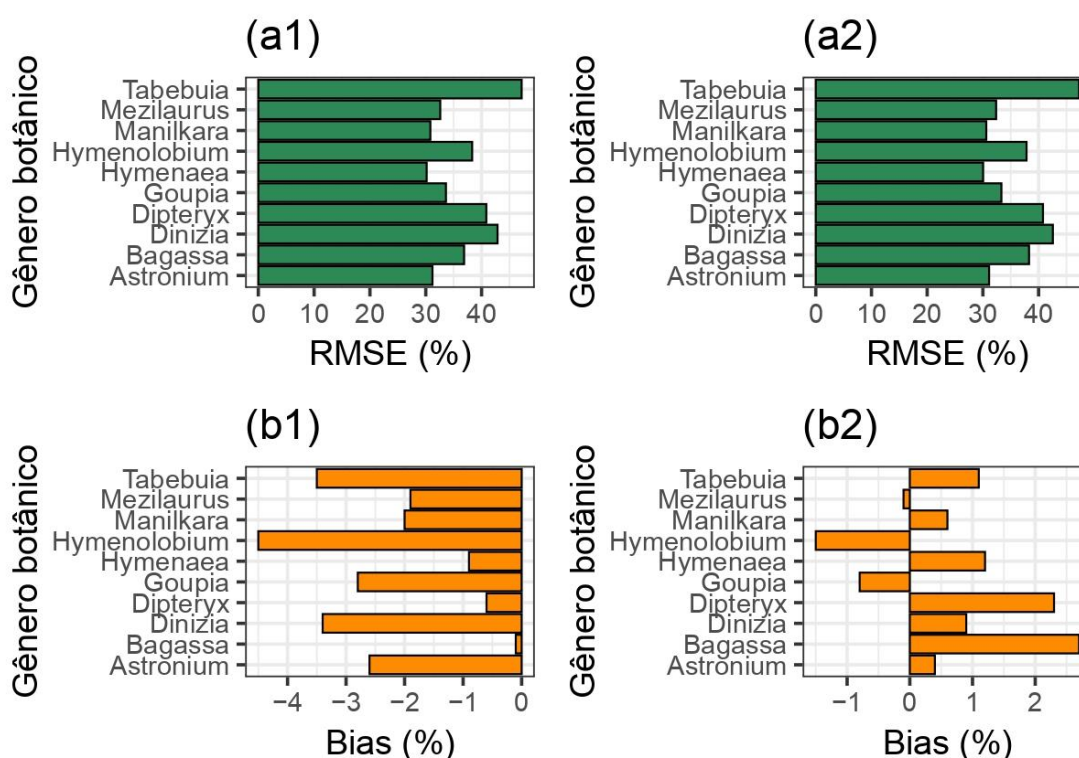


Figura 14.  $RMSE\%$  e  $Bias\%$  para o volume de madeira comercial "simulado" de gêneros comerciais em áreas de manejo florestal na Amazônia brasileira. Em que: a1 e b1 =  $RMSE\%$  e  $Bias\%$  para o modelo M4 e a2 e b2 =  $RMSE\%$  e  $Bias\%$  para o modelo M6.

Para o teste de equivalência, do total de dez gêneros botânicos estudados, apenas o gênero *Bagassa* não foi validado pelo teste de equivalência ao nível de 95% de probabilidade para o modelo M4, embora tenha apresentado o menor valor de  $Bias\%$ . Enquanto para o modelo M6 os gêneros *Bagassa* e *Tabebuia* não foram validados. Tal resultado evidencia a superioridade dos modelos de razão (Tabela 18).

Tabela 18. Teste de equivalência para as estimativas do volume comercial simulado em áreas de concessão florestal na Amazônia brasileira.

Gênero	N	Intervalo de confiança		Região de similaridade		Dissimilaridade	
		Intercepto	Inclinação	Intercepto	Inclinação	Intercepto	Inclinação
<i>Astronium</i>	M4	7,1693 ± 7,3803	1,0051 ± 1,1344	5,35 ± 8,9167	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Bagassa</i>		<b>8,0857 ± 8,9471</b>	<b>0,6685 ± 1,1976</b>	<b>6,3784 ± 10,6307</b>	<b>0,75 ± 1,25</b>	<b>Rejeita</b>	<b>Aceita</b>
<i>Dinizia</i>		11,0788 ± 11,444	0,9382 ± 1,0734	8,2001 ± 13,6668	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Dipteryx</i>		4,0509 ± 4,1629	0,8573 ± 1,1329	3,0202 ± 5,0337	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Goupia</i>		3,7792 ± 3,8848	0,9184 ± 1,1666	2,81 ± 4,6833	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Hymenaea</i>		9,3001 ± 9,49	1,0121 ± 1,0954	6,9653 ± 11,6088	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Hymenolobium</i>		7,1168 ± 7,2963	1,0487 ± 1,147	5,1867 ± 8,6445	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Manilkara</i>		4,6437 ± 4,7042	1,0494 ± 1,1062	3,428 ± 5,7134	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Mezilaurus</i>		3,7024 ± 3,7827	0,9734 ± 1,0838	2,7488 ± 4,5814	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Tabebuia</i>		5,8024 ± 5,9779	0,8168 ± 1,0853	4,2465 ± 7,0776	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Astronium</i>	M6	7,1597 ± 7,3773	1,0541 ± 1,1875	5,5062 ± 9,1771	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Bagassa</i>		<b>8,0788 ± 8,913</b>	<b>0,6951 ± 1,2121</b>	<b>6,597 ± 10,995</b>	<b>0,75 ± 1,25</b>	<b>Rejeita</b>	<b>Aceita</b>
<i>Dinizia</i>		11,0777 ± 11,445	0,9822 ± 1,1157	8,5769 ± 14,2949	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Dipteryx</i>		4,054 ± 4,1562	0,919 ± 1,1688	3,126 ± 5,2101	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Goupia</i>		3,7833 ± 3,8881	0,9268 ± 1,1222	2,8757 ± 4,7928	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Hymenaea</i>		9,3036 ± 9,4913	0,9618 ± 1,0441	7,1058 ± 11,8429	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Hymenolobium</i>		7,1122 ± 7,2982	1,0327 ± 1,1328	5,3796 ± 8,966	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Manilkara</i>		4,6429 ± 4,7007	1,0363 ± 1,0926	3,5222 ± 5,8703	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Mezilaurus</i>		3,7015 ± 3,7843	0,9656 ± 1,0687	2,8049 ± 4,6748	0,75 ± 1,25	Rejeita	Rejeita
<i>Tabebuia</i>		<b>5,7975 ± 5,9795</b>	<b>0,7245 ± 0,9641</b>	<b>4,4638 ± 7,4397</b>	<b>0,75 ± 1,25</b>	<b>Rejeita</b>	<b>Aceita</b>

O gráfico da relação “observados vs estimados” para os modelos selecionados demonstram a forte similaridade entre os modelos, em contrapartida o modelo de razão validou uma maior quantidade de gêneros.

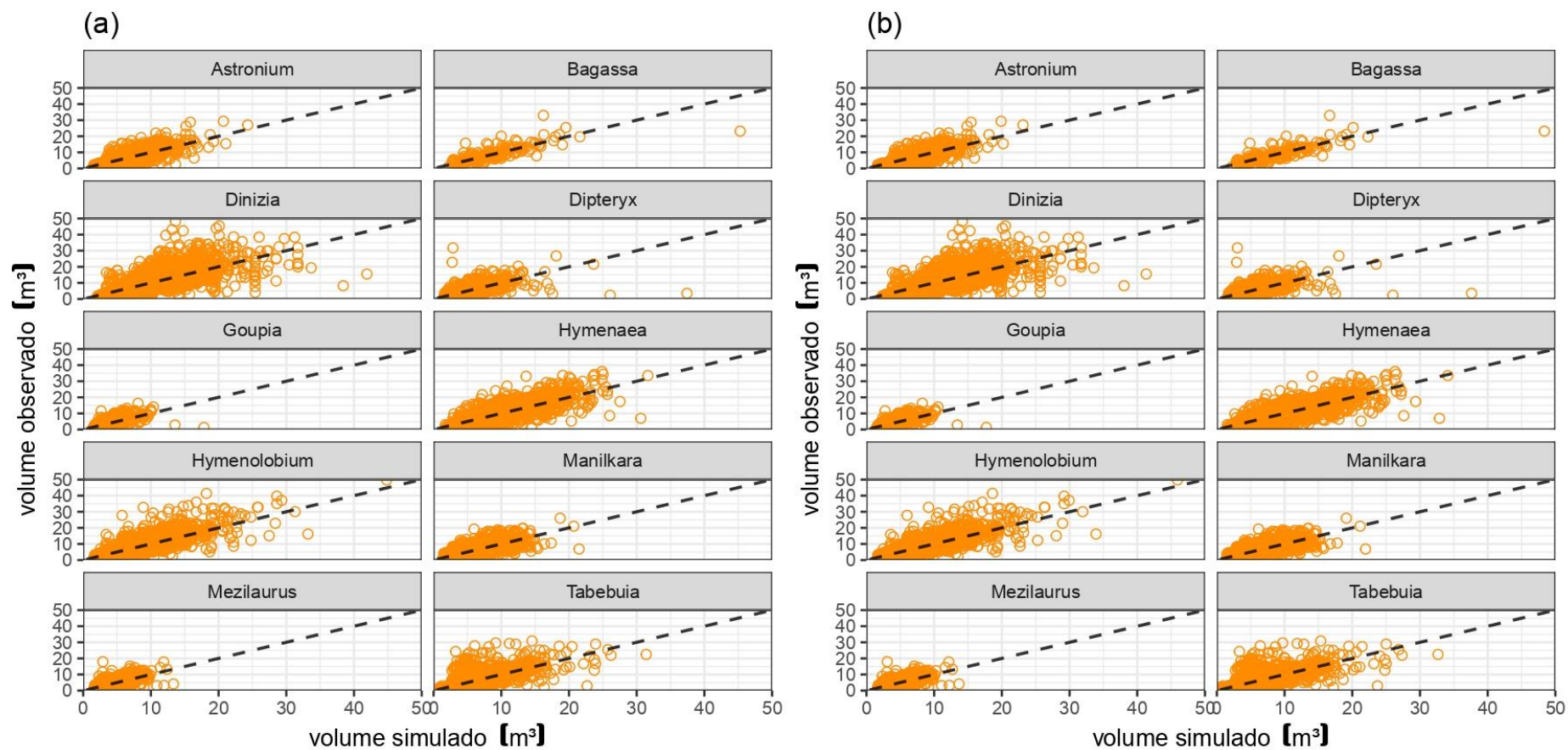


Figura 15. Relação entre observados x estimados para o volume comercial simulado de dez gêneros comerciais em áreas de manejo florestal na Amazônia brasileira. Em que: a = modelo M4 e b= modelo M6.

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1. Modelos volumétricos

Os modelos de efeito misto são utilizados para descrever a relação entre uma variável de interesse e uma ou mais covariáveis em dados agrupados de acordo com um ou mais fatores, tais como medições repetidas e dados com estrutura hierárquica (PINHEIRO et al., 2022). Neste estudo, os dados dendrométricos obtidos durante o inventário florestal e romaneio de toras foram agrupados em gêneros botânicos, possibilitando estimar precisamente o volume comercial, conforme pode ser observado na Figura 13, com ênfase para o modelo de razão (Figura 13 a). O uso da abordagem de modelos de efeito misto não são comuns em estudos na Amazônia (DE ABREU et al., 2022), principalmente quando aplicados em modelos de razão volumétrica. Estudos recentes que utilizaram a teoria de modelos mistos para estimar o volume comercial de madeira na Amazônia, apresentaram ganhos significativos na acurácia das estimativas (MONTEIRO et al., 2021; DE ABREU et al., 2022). Neste contexto, este é um dos primeiros estudos que aplica o uso da teoria de modelos mistos (lineares e não lineares) em modelos razão volumétrica na Amazônia e, nota-se que os resultados são promissores, pois superam inclusive o tradicional modelo de Schumacher-Hall.

Dada a qualidade de ajuste, das suas estatísticas, os modelos de razão ajustados com dados de altura compõem ferramentas úteis para estimar o volume comercial de diferentes gêneros comerciais na Amazônia brasileira, com destaque para o modelo M4. Por outro lado, o modelo M1, ajustado apenas com dados de diâmetro ( $DAP$  e  $Dt$ ) apresentou resultados enviesados, com erro superior a 40%. Neste sentido, tais resultados sugerem que a inclusão da variável altura mensurada durante o romaneio é imprescindível para gerar estimativas confiáveis de volume de madeira, ao passo que, modelos que utilizam apenas o diâmetro assumem que árvores de mesmo diâmetro possuem o mesmo volume pois desconsideram a altura (DE ABREU et al., 2020; NASCIMENTO et al., 2020). O que não pode ser assumido para florestas inequiâneas, como a Amazônia, que possui, naturalmente, alta heterogeneidade para a variável altura.

No Brasil, modelos logarítmicos são frequentemente utilizados para diferentes áreas na Amazônia brasileira (CYSNEIROS et al., 2017; DE LIMA et al., 2021a). No entanto, poucos estudos aplicaram as devidas correções de escala da transformação logarítmica, ocasionando em interpretações inadequadas de estimadores de precisão,

como o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (DE LIMA et al., 2019). Além de equívocos estatísticos, outro ponto importante que carece de discussões na literatura florestal é o impacto do uso da altura tomada durante o inventário florestal para estimar o volume comercial em modelos de dupla entrada (NASCIMENTO et al., 2020). Neste estudo, o modelo de Schumacher-Hall ajustado com dados de alturas estimadas durante o inventário apresentou erro superior a 40%, evidenciando que a altura comercial tomada no inventário florestal 100% compromete estimativas confiáveis de volume. De tal modo, salientamos que as medidas de altura devem ser tomadas com afinco durante o inventário florestal, sendo ideal o uso da altura mensurada no romaneio de toras.

O modelo de Schumacher-Hall tem sido empregado com bastante frequência na estimativa do volume comercial de espécies amazônicas, por exemplo, De Lima et al. (2021a), ao ajustar modelos volumétricos no Amapá, obteve *Bias%* de 6% para o modelo em sua forma linearizada. Neste estudo, o modelo de Schumacher-Hall ajustado com dados de altura do romaneio (M6) apresentou resultados superiores ao ajustado com dados de altura do inventário florestal (M5). No entanto, as estimativas geradas pelo modelo M6 foram menos precisas que as dos modelos de razão (M2, M3 e M4), que apresentaram erro percentual inferior em até 20%. Embora tenha sido menos preciso que os modelos de razão, o modelo M6 também foi validado pelo teste de equivalência.

#### **4.2. Modelos dendrométricos**

Na literatura florestal, usualmente são utilizados modelos de afilamento para estimar diâmetros em qualquer altura do fuste (SOCHA; NETZEL; CYWICKA, 2020). No entanto, os modelos de afilamento requerem informações acerca da altura em que os diâmetros foram tomados, por exemplo, a altura em que o diâmetro da base foi medido (LANSSANOVA et al., 2013). Desse modo, a aplicação desta abordagem não foi possível para dados do romaneio de toras, por se tratar de uma medida não tomada em campo. Além disso, tem-se a presença da variabilidade natural das árvores (TER STEEGE et al., 2019), como a presença de sapopemas, que impede a padronização na altura de corte, e consequentemente na altura em que o diâmetro da base foi medido.

Os modelos ajustados para a estimativa de *Db* e *Dt* apresentaram resultados satisfatórios, apesar da alta variabilidade presente nos dados, cujas estimativas apresentaram erro inferior a 20%. Apesar disso, as estimativas de *Db* não foram validadas pelo teste de equivalência para o gênero *Bagassa*. Por outro lado, apesar de ter apresentado maior erro, as estimativas para *Dt* foram validadas para todos os gêneros.



Diferente do observado para funções de afilamento, que demonstraram maior dificuldade para estimar os diâmetros das seções superiores do tronco, possivelmente devido à baixa relação da ponta do fuste das espécies florestais da Floresta Amazônica aos protótipos dendrométricos (LANSSANOVA et al., 2013).

A estimativa da altura em florestas tropicais é um grande desafio para o manejo florestal sustentável, havendo muitas lacunas importantes para os diferentes ambientes amazônicos (DE LIMA et al., 2021b). As relações hipsométricas dependem de uma série de fatores fisiológicos, biogeográficos e ambientais (CHAVE et al., 2006, 2014; DE LIMA et al., 2021b). Fatores como os climáticos, de altitude, edáficos locais, restrições evolutivas e morfológicas, bem como a competição por recursos também podem influenciar a variabilidade da altura e, conseqüentemente a precisão desses modelos. O uso de equipamentos também carrega erros, uma vez que, os hipsômetros assumem que as árvores são verticais, a altura das árvores inclinadas para longe de um observador será subestimada, enquanto a altura das árvores inclinadas para um observador será superestimada (PHILIP et al., 1994; HUSCH et al., 2003). Nesse contexto, muitos estudos foram desenvolvidos para estimar a altura em florestas tropicais em outras regiões do mundo, o que não é observado para a América do Sul, que ainda carece de estudos em escalas mais amplas (DE LIMA et al., 2021b).

Dentro desta perspectiva, estimar a altura de forma precisa é essencial para o manejo florestal sustentável, pois modelos que incluem a altura como variável independente fornecem maior precisão nas estimativas de volume do que estratégias que dependem apenas do diâmetro à altura do peito como variável independente (NASCIMENTO et al., 2020). Pois a altura das árvores reflete a dinâmica e produtividade dos ecossistemas florestais, e incorpora características ecológicas importantes, como a eficiência do uso de fatores de produção (luz e água) e reprodutivos (síndromes de polinização e dispersão) (DE LIMA et al., 2021b). Para os modelos M9 e M10, que estimaram a altura comercial e o comprimento da primeira tora, respectivamente, foram obtidos erros superiores a 20%. Apesar disso, obteve-se uma maior frequência de resíduos na classe zero, como pode ser observado na Figura 12 c1 e c2. Dessa forma, apenas os gêneros *Bagassa* (M9 e M10) e *Tabebuia* (M10) não foram validados pelo teste de equivalência.

### 4.3. Simulação do volume comercial

Alguns estudos desenvolveram modelos para estimar a altura total do fuste, volume comercial e biomassa acima do solo em diferentes escalas, a partir de um grande número de observações (CHAVE et al., 2014; HUNTER et al., 2013). Porém, estes estudos não validaram seus modelos em dados independentes, promovendo resultados conflitantes em diferentes escalas, locais e espécies (NASCIMENTO et al., 2020). Indo mais além, quando esses modelos são aplicados para estimar as variáveis de interesse como o volume comercial, é comum usar alturas estimadas em vez de alturas medidas (NASCIMENTO et al., 2020; LEÃO et al., 2021). Esta prática é comum, mas raramente o seu impacto sobre as estimativas e precisão são discutidos (NASCIMENTO et al., 2020; MONTEIRO et al., 2021). Dessa forma, avaliamos a precisão do volume comercial “simulado” (estimado conforme metodologia apresentada na seção 2.6 do Material e Métodos) frente ao volume comercial real.

Estudos de volumetria em florestas tropicais mostram que diversos fatores podem influenciar as estimativas volumétricas, havendo destaque para as variações na forma e dimensão do fuste. Nessas florestas, a grande variação é ocasionada pela diversidade florística e estrutural (BREDIN; PERES; HAUGAASEN, 2020). O formato da árvore pode variar conforme vários fatores, dentre eles a idade e a competição por recursos, seja ela inter ou intraespecífica (CYSNEIROS et al., 2017). Dentro deste contexto, a forma do fuste também varia entre árvores da mesma espécie, de tal modo que, à medida que a forma do fuste se distancia de uma condição regular, a dificuldade na aplicação de modelos matemáticos para estimativas do volume também aumenta (WEISKITTEL et al., 2011; BURKHART; TOMÉ, 2012; CAMPOS; LEITE, 2017; SOCHA; NETZEL; CYWICKA, 2020). Contudo, nossos resultados evidenciam que a aplicação de modelos de razão fornece estimativas precisas e confiáveis e podem ser utilizados para quantificar o volume de madeira para os principais gêneros comerciais estudados. Para o modelo de razão selecionado (M4), dos dez gêneros avaliados apenas *Bagassa* não foi validado, sendo este um resultado esperado, tendo em vista que os modelos de *Db*, *h* e *L* também não foram validados para o gênero. Apesar disso, o menor valor de *Bias%* foi observado para o gênero (-0,1%).

## 5. CONCLUSÃO

O volume comercial estimado pré-exploração, por equações hierárquicas de razão, é estatisticamente igual ao volume romaneado para 90% dos gêneros estudados. As estimativas de volume comercial com a utilização de modelos de razão apresentam maior acurácia comparado com outras formas de estimativas e são acurados suficientemente para promover o manejo florestal sustentável na Amazônia. Observou-se que a mensuração da variável altura é essencial para o aumento da acurácia das estimativas de volume comercial, ao mesmo tempo que sua obtenção durante o inventário ainda continua um grande desafio. O presente trabalho aponta que a variável altura coletada no inventário florestal de forma visual não deve ser utilizada de forma direta nas estimativas de volume comercial para a atividade do manejo florestal na Amazônia. As análises apresentadas neste estudo mostram a necessidade de considerar os ajustes dos modelos baseado no romaneio de toras, a importância de as equações serem ajustadas para espécies ou grupo de espécies e a realização de validação/simulação robusta, pois, os métodos empregados garantiram estimativas mais acuradas que as praticadas no primeiro capítulo deste estudo.

Os resultados demonstram que as equações de razão com a utilização da abordagem de modelos de efeitos mistos, foram superiores aos modelos tradicionais e devem ser utilizadas no manejo florestal amazônico como forma de se obter estimativas mais acuradas visando melhor planejamento da exploração florestal, maior viabilidade econômica das empresas florestais e também na busca da redução de superestimativas volumétricas na fase pré-exploratória do manejo florestal sustentável, contribuindo com o combate da ilegalidade no mercado de madeiras tropicais. Devido ao robusto banco de dados para o ajuste do modelo, validação e simulação, assim como a grande distribuição espacial das áreas e árvores, os modelos de razão desenvolvidos no presente trabalho podem ser testados em grande escala, buscando estimativas de volume comercial de forma acurada para os gêneros avaliados em diversas localidades do bioma Amazônia.

## 6. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, B. R. S., CRUZ, G. S., NICOLETTI, M. F., GAMA, J. R. V., LIMA, B. A., & PECH, T. M. (2021). Eficiência de equações volumétricas para *Couratari guianensis* aubl. em diferentes cenários na floresta nacional do tapajós. **Scientia Forestalis**, 49(130), E3503.

ALMEIDA, V. B.; SILVA, J. N. M.; STEINBRENNER, M. K. A. Impacto da ocorrência de árvores ocas no rendimento da colheita de madeira na Floresta Nacional de Saracá-Taquera, Pará. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 42, 2022.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

BI, H. Predicting stem volume to any height limit for native tree species in Southern New South Wales and Victoria. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 29, p. 318-331. 1999.

BRANCALION, P. H. S. et al. Fake legal logging in the Brazilian Amazon. **Science Advances**, v. 4, n. 8, p. 1–8, 2018.

BRASIL, 2009. **Resolução Conama nº 406**, de 02 de fevereiro de 2009.

BREDIN, Y. K.; PERES, C. A.; HAUGAASEN, T. Forest type affects the capacity of Amazonian tree species to store carbon as woody biomass. **Forest Ecology and Management**, v. 473, n. January, p. 118297, 2020.

BURKHART, H. E. Cubic-foot volume of loblolly pine to any merchantable top limit. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 1, n. 2, p. 7-9, 1977.

BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. Modeling Forest Trees and Stands. **Dordrecht: Springer Netherlands**, 2012. v. 9789048131

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. Mensuração Florestal: Perguntas e Respostas. 5a edição ed. **Viçosa: UFV**, 2017.

CAO, Q.V., H.E. BURKHART, AND T.A. MAX. Evaluation of two methods for cubic-volume prediction of loblolly pine to any merchantable limit. **Forest Science**, 26 p. 71– 80. 1980.

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, 2006.

CHAVE, J. et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, v. 20, n. 10, p. 3177–3190, out. 2014.

CYSNEIROS, V. C. et al. Modelos genéricos e específicos para estimativa do volume comercial em uma floresta sob concessão na Amazônia. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 45, n. 114, p. 295–304, 2017.

DE ABREU, J. C. et al. Alternatives to estimate the volume of individual trees in forest formations in the state of Minas Gerais, Brazil. **Cerne**, v. 26, n. 3, p. 393–402, 2020.

DE ABREU, J. C. et al. Mixed models for biomass prediction in the semiarid zone of Pernambuco State, Brazil. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 48, n. 128, p. 1–11, 2021.

DE ABREU, J. C. et al. Mixed-Effect Models for Volumetric Estimation of Lumber From Native Amazonian Species. **Floresta**, v. 52, n. 2, p. 384–393, 2022.

- DE LIMA, R. B. et al. Lumber volume modeling of Amazon Brazilian species. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 38, n. 3, p. 262–274, 2019.
- DE LIMA, R. B. et al. Accurate Estimation of Commercial Volume in Tropical Forests. **Forest Science**, v. 67, n. 1, p. 14–21, 2021a.
- DE LIMA, R. B. et al. Height-diameter allometry for tropical forest in northern Amazonia. **PLoS ONE**, v. 16, n. 12 December, 2021b.
- FERREIRA DA SILVA, E. et al. Optimized forest planning: allocation of log storage yards in the Amazonian sustainable forest management area. **Forest Ecology and Management**, v. 472, n. March, p. 118231, 2020.
- HUNTER, M. O. et al. Tree height and tropical forest biomass estimation. **Biogeosciences**, v. 10, n. 12, p. 8385–8399, 20 dez. 2013.
- HUSCH, B., T.W. BEERS, AND J.A. KERSHAW JR. 2003. **Forest mensuration**, 4th ed. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ. 443 p.
- KUZNETSOVA, A.; BROCKHOFF, P. B.; CHRISTENSEN, R. H. B. lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. **Journal of Statistical Software**, v. 82, n. 13, p. 1–26, 2017.
- LANSSANOVA, L. R. et al. Avaliação de funções de afilamento para a estimativa de diâmetro de espécies florestais comerciais do bioma amazônico mato-grossense. **Floresta**, v. 43, n. 2, p. 205–214, 2013.
- LEÃO, F. M. et al. How many trees are necessary to fit an accurate volume model for the Amazon forest? A site-dependent analysis. **Forest Ecology and Management**, v. 480, n. September 2020, 2021.
- MATNEY, T.G., AND SULLIVAN, A.D. Variable top volume and height predictors for Slash pine trees. **Forest Science**, v. 28, n. 2, p. 274-282. 1982.
- MEDEIROS, S. H. DA S. et al. Diagnosis of hollow trees in an area of effective sustainable forest management in the Amazon forest. **International Journal for Innovation Education and Research**, v. 9, n. 1, p. 527–539, 2021.
- MEDEIROS, S. H. DA S.; NASCIMENTO, C. C. DO; SILVA, G. M. Viabilidade do uso de árvores ocas da espécie *Astronium lecointei* Ducke por meio da utilização da tecnologia da madeira e do design. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 25, n. 4, 2020.
- MONTEIRO, B. C. et al. Uso de modelos mistos para estimativa de volume de árvores individuais em tipologias florestais no Estado do Amapá. **Biota Amazônia**, v. 11, p. 7–10, 2021.
- NASCIMENTO, R. G. M. et al. The tree height estimated by non-power models on volumetric models provides reliable predictions of wood volume: The Amazon species height modelling issue. **Trees, Forests and People**, v. 2, n. June, p. 100028, 2020.
- PHILIP, M.S. 1994. **Measuring trees and forests**, 2nd ed. CAB International, Wallingford, UK. 310 p.

PINHEIRO, J. et al. **Linear and Nonlinear Mixed Effects Models**, 2022. Disponível em: <<https://svn.r-project.org/R-packages/trunk/nlme/>>

RESENDE, R. T. et al. Environmental uniformity, site quality and tree competition interact to determine stand productivity of clonal Eucalyptus. **Forest Ecology and Management**, v. 410, n. September 2017, p. 76–83, 2018.

ROBINSON, A. P.; DUURSMA, R. A.; MARSHALL, J. D. A regression-based equivalence test for model validation: Shifting the burden of proof. **Tree Physiology**, v. 25, n. 7, p. 903–913, 2005.

SANTOS, H. G. et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3. ed. Brasília, Brazil: **Embrapa**, 2013.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. D. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 9, p. 719–734, 1933.

SOCHA, J.; NETZEL, P.; CYWICKA, D. Stem taper approximation by artificial neural network and a regression set models. **Forests**, v. 11, n. 1, p. 1–14, 2020.

SOARES, C. P. B. et al. Equações hipsométricas, volumétricas e de taper para onze espécies nativas. **Revista Árvore**, v. 35, n. 5, p. 1039-1051, 2011.

TER STEEGE, H. et al. Towards a dynamic list of Amazonian tree species. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–5, 2019.

WEISKITTEL, A. R. et al. **Forest Growth and Yield Modeling**. [s.l: s.n.].

WORBES, M.; SCHONGART, J. (2019) Measures for sustainable forest management in the tropics – A tree-ring based case study on tree growth and forest dynamics in a Central Amazonian lowland moist forest. **PLoS ONE** 14(8): e0219770.

ZHENG, Z. et al. Hollows in living trees develop slowly but considerably influence the estimate of forest biomass. **Functional Ecology**, v. 30, n. 5, p. 830–838, 2016.

## APÊNDICE

No apêndice serão detalhadas as seguintes informações:

- Tabela 1: Fatores de forma e equações de volume utilizados nas unidades de produção anual para estimar o volume comercial pré-exploração em unidades de manejo florestal.
- Tabela 2: Resultados do teste de equivalência para a relação entre o volume explorado e inventariado para todos os 112 grupos avaliados em unidades de manejo florestal na Amazônia brasileira.

Tabela 1. Formas de estimativas de volume utilizadas nas unidades de produção anual para estimar o volume comercial pré-exploração em unidades de manejo florestal

UC	UMF	UPA	Gêneros	Forma para estimar	Betas
ALTAMIRA	UMF I	UPA 01	Todos Gêneros	Fator de Forma 0.700	-
	UMF II	UPA 01	Todos Gêneros	Fator de Forma 0.700	-
		UPA 02 and 03	Todos Gêneros	Fator de Forma 0.785	-
	UMF III	UPA 01	Todos Gêneros	Fator de Forma 0.700	-
		UPA 02	Todos Gêneros	$\ln(v) = b_0 + b_1 * \ln(dap) + b_2 * \ln(dap^2) + b_3 * \ln(h) + b_4 * \ln(h^2)$	$b_0 = -0,035431$ $b_1 = 1,69335$ $b_2 = -0,499869$ $b_3 = 0,86329$ $b_4 = -0,023413$
					-
	UPA 01	Todos Gêneros	Fator de Forma 0.700	-	
	UMF IV	UPA 02	Todos Gêneros	$\ln(v) = b_0 + b_1 * \ln(dap) + b_2 * \ln(dap^2) + b_3 * \ln(h) + b_4 * \ln(h^2)$	$b_0 = -0,035431$ $b_1 = 1,69335$ $b_2 = -0,499869$ $b_3 = 0,86329$ $b_4 = -0,023413$
-					

UC: Unidade de Conservação; UMF: Unidade de Manejo Florestal; UPA: Unidade de Produção Anual; v: volume; dap: diâmetro a altura do peito; h: altura comercial.



UC	UMF	UPA	Gêneros	Forma para estimar	Betas
CAXIUANÃ	UMF III	UPA 01	Todos Gêneros	Fator de Forma 0.700	-
		UPA 02	<i>Astronium</i> spp.	$v = b_0 * dap + b_1$	$b_0 = 8,679$ $b_1 = -8,0921$
			<i>Bagassa</i> spp.	$v = b_0 * dap + b_1$	$b_0 = 13,492$ $b_1 = -5,5878$
			<i>Dinizia</i> spp.	$v = b_0 * dap^{b_1}$	$b_0 = 8,0249$ $b_1 = 1,5223$
			<i>Dipteryx</i> spp.	$v = b_0 * dap + b_1$	$b_0 = 11,841$ $b_1 = -4,5869$

UC: Unidade de Conservação; UMF: Unidade de Manejo Florestal; UPA: Unidade de Produção Anual; v: volume; dap: diâmetro a altura do peito; h: altura comercial.

UC	UMF	UPA	Gêneros	Forma para estimar	Betas
CAXIUANÃ	UMF III	UPA 02	<i>Goupia</i> spp.	$v = b_0 * dap + b_1$	$b_0 = 7,8036$ $b_1 = -2,145$
			<i>Hymenaea</i> spp.	$v = b_0 * dap^{b_1}$	$b_0 = 9,8194$ $b_1 = 2,1209$
			<i>Hymenolobium</i> spp.	$v = b_0 * dap^2 + b_1 * dap + b_2$	$b_0 = 6,7148$ $b_1 = 6,5402$ $b_2 = -2,4689$
			<i>Manilkara</i> spp	$v = b_0 * dap + b_1$	$b_0 = 8,2475$ $b_1 = 2,2574$
			<i>Mezilaurus</i> spp.	$v = b_0 * dap^2 + b_1 * dap + b_2$	$b_0 = 7,2376$ $b_1 = -3,5325$ $b_2 = 2,3775$

UC: Unidade de Conservação; UMF: Unidade de Manejo Florestal; UPA: Unidade de Produção Anual; v: volume; dap: diâmetro a altura do peito; h: altura comercial.

UC	UMF	UPA	Gêneros	Forma para estimar	Betas
CAXIUANÃ	UMF III	UPA 03	<i>Astronium</i> spp.	$v = b_0 * dap^{b_1}$	$b_0 = 10,599$ $b_1 = 2,2035$
			<i>Bagassa</i> spp.	$v = b_0 * dap^{b_1}$	$b_0 = 7,7917$ $b_1 = 2,2364$
			<i>Dinizia</i> spp.	$v = b_0 * dap^{b_1}$	$b_0 = 8,0816$ $b_1 = 1,639$
			<i>Dipteryx</i> spp.	$v = b_0 * dap^{b_1}$	$b_0 = 7,0039$ $b_1 = 2,1622$

UC: Unidade de Conservação; UMF: Unidade de Manejo Florestal; UPA: Unidade de Produção Anual; v: volume; dap: diâmetro a altura do peito; h: altura comercial.

UC	UMF	UPA	Gêneros	Forma para estimar	Betas
CAXIUANÃ	UMF III	UPA 03	<i>Goupia</i> spp.	$v = b_0 * dap^{b_1}$	$b_0 = 5,9801$ $b_1 = 1,9087$
			<i>Hymenaea</i> spp.	$v = b_0 * dap^{b_1}$	$b_0 = 9,7592$ $b_1 = 2,0627$
			<i>Hymenolobium</i> spp.	$v = b_0 * dap^{b_1}$	$b_0 = 9,5684$ $b_1 = 1,8645$
			<i>Manilkara</i> spp	$v = b_0 * dap^{b_1}$	$b_0 = 6,1473$ $b_1 = 1,7555$
			<i>Mezilaurus</i> spp.	$v = b_0 * dap^{b_1}$	$b_0 = 6,1431$ $b_1 = 1,9783$

UC: Unidade de Conservação; UMF: Unidade de Manejo Florestal; UPA: Unidade de Produção Anual; v: volume; dap: diâmetro a altura do peito; h: altura comercial.

UC	UMF	UPA	Gêneros	Forma para estimar	Betas
JAUCNDÁ	UMF I	UPA 02, 03 e 04	Todos Gêneros	$v = b_0 + b_1 * dap^2 + b_2 * dap^2 * h$	$b_0 = 0,966419$ $b_1 = -0,00013$ $b_2 = 0,000005$
	UMF II	UPA 02, 03 e 04	Todos Gêneros	$v = \exp (b_0 + b_1 * \ln(dap^2 * h))$	$b_0 = -0,584103$ $b_1 = 0,947461$

UC: Unidade de Conservação; UMF: Unidade de Manejo Florestal; UPA: Unidade de Produção Anual; v: volume; dap: diâmetro a altura do peito; h: altura comercial.

UC	UMF	UPA	Gêneros	Forma para estimar	Betas
JAMARI	UMF I	UPA 06, 09 e 10	Todos Gêneros	$v = \exp(b_0 + b_1 * \ln(dap^2 * h))$	$b_0 = -0,493671$ $b_1 = 0,920011$
	UMF III	UPA 05, 06 e 11	<i>Astronium</i> spp.	$v = b_0 + b_1 * dap$	$b_0 = -7,0815$ $b_1 = 0,1947$
			<i>Dinizia</i> spp.	$\ln(v) = b_0 + b_1 * \ln(dap) + b_2 * \left(\frac{1}{dap}\right)$	$b_0 = 7,0931$ $b_1 = -0,4773$ $b_2 = 251,5654$
			<i>Dipteryx</i> spp.	$v = b_0 + b_1 * dap + b_2 * dap^2$	$b_0 = -3,1175$ $b_1 = 0,00042$
			<i>Hymenolobium</i> spp.	$\ln(v) = b_0 + b_1 * dap + b_2 * dap^2$	$b_0 = 0,8988$ $b_1 = 0,0438$
			<i>Tabebuia</i> spp.	$v = b_0 + b_1 * dap + b_2 * dap^2$	$b_0 = 11,3867$ $b_1 = -0,253$ $b_2 = -0,0023$
			Other Gêneros	$v = b_0 + b_1 * dbh + b_2 * dbh^2$	$b_0 = 0,9494$ $b_1 = -0,0053$ $b_2 = -0,00086$

UC: Unidade de Conservação; UMF: Unidade de Manejo Florestal; UPA: Unidade de Produção Anual; v: volume; dap: diâmetro a altura do peito; h: altura comercial.

UC	UMF	UPA	Gêneros	Forma para estimar	Betas
SARACÁ TAQUERA	UMF IA	UPA 01, 02 e 03	Todos Gêneros	$\log(v) = b_0 * dap^{b_1} * h^{b_2}$	$b_0 = -0,0337$ $b_1 = 2,0045$ $b_2 = 0,8454$
	UMF IB	UPA 01	Todos Gêneros	Fator de Forma 0.700	
		UPA 02 e 03	Todos Gêneros	$\log(v) = b_0 * dap^{b_1} * h^{b_2}$	$b_0 = -0,0337$ $b_1 = 2,0045$ $b_2 = 0,8454$
	UMF II	UPA 04, 05 e 06	Todos Gêneros	$\log(v) = b_0 * dap^{b_1} * h^{b_2}$	$b_0 = -0,0337$ $b_1 = 2,0045$ $b_2 = 0,8454$
	UMF III	UPA 04 e 05	Todos Gêneros	$\log(v) = b_0 * dap^{b_1} * h^{b_2}$	$b_0 = -0,0337$ $b_1 = 2,0045$ $b_2 = 0,8454$

UC: Unidade de Conservação; UMF: Unidade de Manejo Florestal; UPA: Unidade de Produção Anual; v: volume; dap: diâmetro a altura do peito; h: altura comercial.

Tabela 2: Resultados do teste de equivalência para a relação entre volumes explorados e inventariados em áreas de manejo florestal na Amazônia brasileira.

Unidade de Conservação	UMF	Gêneros botânicos	Parâmetros	Intervalo de confiança	Região de similaridade	Dissimilaridade
ALTAMIRA	UMF I	<i>Astronium</i>	Intercepto	6,7507±10,8114	5,4394±9,0657	Não Rejeita
			Inclinação	0,8737±4,1677	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Bagassa</i>	Intercepto	6,5982±8,484	6,4483±10,7472	Rejeita
			Inclinação	0,599±1,275	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Dipteryx</i>	Intercepto	5,4444±6,506	4,4961±7,4936	Rejeita
			Inclinação	0,6529±1,1	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Goupia</i>	Intercepto	3,597±4,29	3,4904±5,8173	Rejeita
			Inclinação	0,5793±0,9128	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Hymenaea</i>	<b>Intercepto</b>	<b>9,3296±10,4089</b>	<b>6,5031±10,8386</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,753±1,2447</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Hymenolobium</i>	Intercepto	11,8738±14,098	8,2861±13,8101	Não Rejeita
			Inclinação	0,9371±1,4222	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Manilkara</i>	Intercepto	6,7844±7,4182	5,9116±9,8526	Rejeita
			Inclinação	0,5221±0,8048	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Tabebuia</i>	Intercepto	3,9721±4,3098	3,3015±5,5025	Rejeita
			Inclinação	0,7273±1,0561	0,75±1,25	Não Rejeita

UMF: Unidade de Manejo Florestal



<b>Unidade de Conservação</b>	<b>UMF</b>	<b>Gêneros botânicos</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Intervalo de confiança</b>	<b>Região de similaridade</b>	<b>Dissimilaridade</b>
<b>ALTAMIRA</b>	<b>UMF II</b>	<i>Astronium</i>	<b>Intercepto</b>	<b>5,7975±6,353</b>	<b>3,9074±6,5124</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,7816±1,2196</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Bagassa</i>	<b>Intercepto</b>	<b>7,5769±9,2413</b>	<b>6,0238±10,0397</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,8013±1,219</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Dipteryx</i>	Intercepto	4,6701±5,8756	4,1417±6,9028	Rejeita
			Inclinação	0,4732±0,9974	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Hymenaea</i>	Intercepto	11,5746±11,9119	7,1394±11,8991	Não Rejeita
			Inclinação	0,9118±1,0253	0,75±1,25	Rejeita
		<i>Hymenolobium</i>	Intercepto	11,3541±11,8564	6,7663±11,2771	Não Rejeita
			Inclinação	1,0834±1,1781	0,75±1,25	Rejeita
		<i>Manilkara</i>	Intercepto	4,6309±5,1803	3,7376±6,2294	Rejeita
			Inclinação	0,6081±1,0286	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Mezilaurus</i>	Intercepto	3,9766±4,9187	3,0012±5,002	Rejeita
			Inclinação	0,7746±1,6166	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Tabebuia</i>	<b>Intercepto</b>	<b>5,4488±5,5908</b>	<b>3,9517±6,5862</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,8861±1,0479</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>

UMF: Unidade de Manejo Florestal

<b>Unidade de Conservação</b>	<b>UMF</b>	<b>Gêneros botânicos</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Intervalo de confiança</b>	<b>Região de similaridade</b>	<b>Dissimilaridade</b>
<b>ALTAMIRA</b>	<b>UMF III</b>	<i>Astronium</i>	Intercepto	6,8145±7,4091	4,5876±7,6459	Rejeita
			Inclinação	0,5989±0,9583	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Bagassa</i>	Intercepto	10,0674±13,045	7,7671±12,9452	Não Rejeita
			Inclinação	0,4556±1,0515	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Dipteryx</i>	Intercepto	6,8948±7,9785	5,25±8,7501	Rejeita
			Inclinação	0,6545±1,0412	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Hymenaea</i>	Intercepto	11,8046±12,2769	7,8671±13,1118	Rejeita
			Inclinação	0,715±0,8687	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Hymenolobium</i>	Intercepto	12,3209±15,0854	7,421±12,3683	Não Rejeita
			Inclinação	0,7829±1,4268	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Manilkara</i>	Intercepto	5,2793±6,0678	4,1333±6,8888	Rejeita
			Inclinação	0,4537±0,8275	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Mezilaurus</i>	Intercepto	4,5741±5,483	4,037±6,7283	Rejeita
			Inclinação	0,4519±0,974	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Tabebuia</i>	<b>Intercepto</b>	<b>5,8091±6,096</b>	<b>4,2863±7,1439</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,7627±0,8932</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>

UMF: Unidade de Manejo Florestal

Unidade de Conservação	UMF	Gêneros botânicos	Parâmetros	Intervalo de confiança	Região de similaridade	Dissimilaridade
ALTAMIRA	UMF IV	<i>Astronium</i>	Intercepto	7,8859±9,2837	7,7027±12,8378	Rejeita
			Inclinação	0,2567±0,6573	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Bagassa</i>	<b>Intercepto</b>	<b>9,0777±10,2737</b>	<b>8,2543±13,7571</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,7542±1,0813</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Dipteryx</i>	Intercepto	4,6585±5,5995	5,0637±8,4394	Não Rejeita
			Inclinação	0,3045±0,6829	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Goupia</i>	Intercepto	3,2907±3,6225	4,3443±7,2406	Não Rejeita
			Inclinação	0,1957±0,3001	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Hymenaea</i>	Intercepto	9,758±10,1339	8,8482±14,747	Rejeita
			Inclinação	0,6086±0,7534	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Hymenolobium</i>	<b>Intercepto</b>	<b>10,5416±11,9736</b>	<b>8,7407±14,5679</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,8005±1,1157</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Manilkara</i>	Intercepto	5,7842±6,3742	6,4933±10,8222	Não Rejeita
			Inclinação	0,4359±0,6856	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Mezilaurus</i>	Intercepto	5,3626±30,6927	8,1906±13,6509	Não Rejeita
			Inclinação	0,4394±5,6465	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Tabebuia</i>	Intercepto	5,7324±6,1438	4,8509±8,0848	Rejeita
			Inclinação	0,7262±0,9877	0,75±1,25	Não Rejeita

UMF: Unidade de Manejo Florestal

Unidade de Conservação	UMF	Gêneros botânicos	Parâmetros	Intervalo de confiança	Região de similaridade	Dissimilaridade
CAXIUANÃ	UMF III	<i>Astronium</i>	Intercepto	7,3908±7,7207	5,6697±9,4494	Rejeita
			Inclinação	0,7026±0,9403	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Bagassa</i>	Intercepto	7,8932±8,9657	6,5862±10,977	Rejeita
			Inclinação	0,6075±0,9311	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Dinizia</i>	Intercepto	11,2519±12,0169	8,8852±14,8086	Rejeita
			Inclinação	0,3715±0,5818	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Dipteryx</i>	<b>Intercepto</b>	<b>4,8002±5,0521</b>	<b>3,6375±6,0625</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,8408±1,0125</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Goupia</i>	Intercepto	3,5542±3,7208	2,8576±4,7626	Rejeita
			Inclinação	0,7297±0,8819	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Hymenaea</i>	<b>Intercepto</b>	<b>9,2666±9,8074</b>	<b>7,0355±11,7258</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,7595±0,9688</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Hymenolobium</i>	<b>Intercepto</b>	<b>8,5732±9,1106</b>	<b>6,4469±10,7448</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,8226±0,9928</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Manilkara</i>	Intercepto	3,7197±3,7986	2,959±4,9316	Rejeita
			Inclinação	0,7449±0,8295	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Mezilaurus</i>	Intercepto	3,3444±3,7277	2,9596±4,9326	Rejeita
			Inclinação	0,5747±1,0268	0,75±1,25	Não Rejeita

UMF: Unidade de Manejo Florestal

Unidade de Conservação	UMF	Gêneros botânicos	Parâmetros	Intervalo de confiança	Região de similaridade	Dissimilaridade
JACUNDÁ	UMF I	<i>Astronium</i>	Intercepto	7,9467±8,4622	6,6236±11,0393	Rejeita
			Inclinação	0,749±1,0504	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Dinizia</i>	Intercepto	11,482±12,0851	9,4024±15,6706	Rejeita
			Inclinação	0,652±0,7955	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Dipteryx</i>	<b>Intercepto</b>	<b>4,1934±4,3679</b>	<b>3,4422±5,737</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,8635±1,0064</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Goupia</i>	Intercepto	4,4041±4,6508	3,7117±6,1861	Rejeita
			Inclinação	0,622±0,8029	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Hymenaea</i>	Intercepto	7,9439±8,9918	6,3535±10,5892	Rejeita
			Inclinação	0,3886±1,227	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Hymenolobium</i>	<b>Intercepto</b>	<b>8,3896±8,6605</b>	<b>6,2838±10,473</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,9167±1,0489</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Manilkara</i>	Intercepto	6,8456±7,7362	5,8616±9,7694	Rejeita
			Inclinação	0,7026±1,0068	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Mezilaurus</i>	Intercepto	3,9636±4,4678	3,3266±5,5444	Rejeita
			Inclinação	0,8276±1,343	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Tabebuia</i>	Intercepto	7,5764±8,2364	6,7845±11,3074	Rejeita
			Inclinação	0,7129±0,9922	0,75±1,25	Não Rejeita

UMF: Unidade de Manejo Florestal

Unidade de Conservação	UMF	Gêneros botânicos	Parâmetros	Intervalo de confiança	Região de similaridade	Dissimilaridade
JACUNDÁ	UMF II	<i>Astronium</i>	Intercepto	7,9338±8,375	6,6894±11,149	Rejeita
			Inclinação	0,6887±0,8998	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Dinizia</i>	<b>Intercepto</b>	<b>12,4286±13,3735</b>	<b>9,7748±16,2913</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,7895±0,9738</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Dipteryx</i>	<b>Intercepto</b>	<b>4,5265±4,7825</b>	<b>3,5157±5,8596</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,8482±1,0243</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Goupia</i>	Intercepto	4,2756±4,6696	3,5354±5,8924	Rejeita
			Inclinação	0,5494±0,8684	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Hymenaea</i>	Intercepto	7,5784±8,9131	6,3503±10,5839	Rejeita
			Inclinação	0,5182±1,2553	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Hymenolobium</i>	<b>Intercepto</b>	<b>8,2805±8,6261</b>	<b>6,1186±10,1976</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,8855±1,0186</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Manilkara</i>	<b>Intercepto</b>	<b>6,5117±7,5719</b>	<b>6,0739±10,1232</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,7576±1,2271</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Mezilaurus</i>	Intercepto	3,9363±4,4557	3,3537±5,5896	Rejeita
			Inclinação	0,4894±0,7914	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Tabebuia</i>	Intercepto	8,0868±8,9021	7,227±12,0449	Rejeita
			Inclinação	0,7129±0,9922	0,75±1,25	Não Rejeita

UMF: Unidade de Manejo Florestal

Unidade de Conservação	UMF	Gêneros botânicos	Parâmetros	Intervalo de confiança	Região de similaridade	Dissimilaridade
JAMARI	UMF I	<i>Astronium</i>	Intercepto	7,3142±7,8439	6,3029±10,5048	Rejeita
			Inclinação	0,7505±1,0671	0,75±1,25	Rejeita
		<i>Dinizia</i>	Intercepto	13,1193±14,3003	10,329±17,215	Rejeita
			Inclinação	0,7126±0,8866	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Dipteryx</i>	Intercepto	5,2713±5,6313	4,5941±7,6569	Rejeita
			Inclinação	0,7183±0,8792	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Goupia</i>	Intercepto	4,3065±5,4387	4,1162±6,8604	Rejeita
			Inclinação	0,3298±0,9253	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Hymenaea</i>	Intercepto	7,5171±8,9941	6,3833±10,6388	Rejeita
			Inclinação	0,4954±4,3612	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Hymenolobium</i>	Intercepto	8,8689±9,3825	6,951±11,585	Rejeita
			Inclinação	0,8859±1,0631	0,75±1,25	Rejeita
		<i>Mezilaurus</i>	Intercepto	3,9572±4,4309	3,6661±6,1102	Rejeita
			Inclinação	0,4287±0,962	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Tabebuia</i>	Intercepto	7,6779±8,3269	6,8622±11,4369	Rejeita
			Inclinação	0,7459±1,0045	0,75±1,25	Não Rejeita

UMF: Unidade de Manejo Florestal

<b>Unidade de Conservação</b>	<b>UMF</b>	<b>Gêneros botânicos</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Intervalo de confiança</b>	<b>Região de similaridade</b>	<b>Dissimilaridade</b>
<b>JAMARI</b>	<b>UMF III</b>	<i>Astronium</i>	Intercepto	8,0711±8,3678	6,1601±10,2669	Rejeita
			Inclinação	0,7026±0,9554	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Bagassa</i>	Intercepto	6,1577±6,9802	4,521±7,535	Rejeita
			Inclinação	0,8047±1,2605	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Dinizia</i>	<b>Intercepto</b>	<b>12,9454±13,6283</b>	<b>8,4488±14,0813</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>1,0566±1,1824</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Dipteryx</i>	<b>Intercepto</b>	<b>4,8015±5,0869</b>	<b>3,4018±5,6696</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,9931±1,1904</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Goupia</i>	<b>Intercepto</b>	<b>5,5975±6,1036</b>	<b>4,9408±8,2347</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,7521±1,0849</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Hymenolobium</i>	Intercepto	8,6303±9,156	5,8536±9,756	Rejeita
			Inclinação	1,0794±1,3239	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Manilkara</i>	Intercepto	4,9269±6,1163	3,7255±6,2091	Rejeita
			Inclinação	0,5578±1,5481	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Mezilaurus</i>	Intercepto	4,5127±5,5765	4,0407±6,7346	Rejeita
			Inclinação	0,848±1,7618	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Tabebuia</i>	Intercepto	8,8395±10,5944	4,8725±8,1209	Não Rejeita
			Inclinação	1,3618±2,0189	0,75±1,25	Não Rejeita

UMF: Unidade de Manejo Florestal



<b>Unidade de Conservação</b>	<b>UMF</b>	<b>Gêneros botânicos</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Intervalo de confiança</b>	<b>Região de similaridade</b>	<b>Dissimilaridade</b>
<b>SARACÁ TAQUERA</b>	<b>UMF IA</b>	<i>Astronium</i>	Intercepto	3,6953±4,4055	3,4416±5,736	Rejeita
			Inclinação	-0,0978±0,8227	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Dinizia</i>	Intercepto	6,6422±7,8582	8,7464±14,5773	Não Rejeita
			Inclinação	0,2743±0,5237	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Dipteryx</i>	Intercepto	3,2498±3,4391	3,1442±5,2403	Rejeita
			Inclinação	0,5271±0,7265	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Goupia</i>	Intercepto	2,744±2,9769	3,2454±5,409	Não Rejeita
			Inclinação	0,4048±0,5961	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Hymenaea</i>	Intercepto	5,4141±5,6241	4,8911±8,1518	Rejeita
			Inclinação	0,6563±0,8294	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Hymenolobium</i>	Intercepto	4,2667±4,4895	4,1423±6,9039	Rejeita
			Inclinação	0,5435±0,7386	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Manilkara</i>	Intercepto	2,5097±2,7784	2,4245±4,0409	Rejeita
			Inclinação	0,416±0,8179	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Mezilaurus</i>	Intercepto	3,4373±3,5371	3,3219±5,5365	Rejeita
			Inclinação	0,3033±0,4317	0,75±1,25	Não Rejeita

UMF: Unidade de Manejo Florestal

Unidade de Conservação	UMF	Gêneros botânicos	Parâmetros	Intervalo de confiança	Região de similaridade	Dissimilaridade
SARACÁ TAQUERA	UMF IB	<i>Astronium</i>	Intercepto	4,9768±5,2488	4,5145±7,5242	Rejeita
			Inclinação	0,5909±0,7892	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Bagassa</i>	Intercepto	5,486±6,7688	5,2552±8,7586	Rejeita
			Inclinação	0,2661±0,7266	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Dinizia</i>	Intercepto	9,3749±9,7515	6,723±11,205	Rejeita
			Inclinação	0,6485±0,7799	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Dipteryx</i>	Intercepto	3,4±3,5106	2,8968±4,828	Rejeita
			Inclinação	0,6486±0,7438	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Goupia</i>	Intercepto	3,1514±3,3108	2,9785±4,9642	Rejeita
			Inclinação	0,2598±0,6378	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Hymenaea</i>	<b>Intercepto</b>	<b>5,7833±5,9956</b>	<b>4,624±7,7066</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,811±0,9371</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Hymenolobium</i>	<b>Intercepto</b>	<b>5,3023±5,5311</b>	<b>3,8278±6,3797</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>1,0308±1,1861</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Manilkara</i>	Intercepto	3,7644±3,8446	3,2559±5,4265	Rejeita
			Inclinação	0,7456±0,8061	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Mezilaurus</i>	Intercepto	3,1047±3,1934	2,5294±4,2157	Rejeita
			Inclinação	0,5745±0,6814	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Tabebuia</i>	Intercepto	4,4194±5,0969	3,784±6,3067	Rejeita
			Inclinação	0,4658±0,81	0,75±1,25	Não Rejeita

UMF: Unidade de Manejo Florestal

Unidade de Conservação	UMF	Gêneros botânicos	Parâmetros	Intervalo de confiança	Região de similaridade	Dissimilaridade
SARACÁ TAQUERA	UMF II	<i>Astronium</i>	Intercepto	5,9436±7,085	4,4118±7,353	Rejeita
			Inclinação	0,7298±1,3053	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Dinizia</i>	Intercepto	17,8631±23,1198	12,4774±20,7957	Não Rejeita
			Inclinação	0,4405±1,3165	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Dipteryx</i>	Intercepto	4,663±4,9223	3,6372±6,0619	Rejeita
			Inclinação	0,2523±0,9126	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Goupia</i>	Intercepto	4,2463±4,4698	3,3894±5,649	Rejeita
			Inclinação	0,5341±0,698	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Hymenaea</i>	<b>Intercepto</b>	<b>8,8807±9,2976</b>	<b>6,233±10,3883</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,7708±0,9298</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Hymenolobium</i>	<b>Intercepto</b>	<b>6,974±7,4284</b>	<b>4,5601±7,6001</b>	<b>Rejeita</b>
			<b>Inclinação</b>	<b>0,8789±1,1383</b>	<b>0,75±1,25</b>	<b>Rejeita</b>
		<i>Manilkara</i>	Intercepto	6,3164±6,4127	4,873±8,1217	Rejeita
			Inclinação	0,6565±0,7303	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Mezilaurus</i>	Intercepto	6,0324±6,3428	4,2963±7,1604	Rejeita
			Inclinação	0,7391±1,0337	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Tabebuia</i>	Intercepto	9,8896±11,173	8,358±13,9299	Rejeita
			Inclinação	0,6906±0,9373	0,75±1,25	Não Rejeita

UMF: Unidade de Manejo Florestal

<b>Unidade de Conservação</b>	<b>UMF</b>	<b>Gêneros botânicos</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Intervalo de confiança</b>	<b>Região de similaridade</b>	<b>Dissimilaridade</b>
<b>SARACÁ TAQUERA</b>	<b>UMF III</b>	<i>Astronium</i>	Intercepto	4,4268±8,0282	4,7103±7,8505	Não Rejeita
			Inclinação	-0,9509±1,5627	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Dinizia</i>	Intercepto	7,6358±9,096	7,894±13,1567	Não Rejeita
			Inclinação	0,2691±0,7297	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Dipteryx</i>	Intercepto	4,1508±4,5721	3,9392±6,5653	Rejeita
			Inclinação	0,1154±0,8875	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Goupia</i>	Intercepto	3,5608±3,8198	3,6663±6,1105	Não Rejeita
			Inclinação	0,1947±0,6828	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Hymenaea</i>	Intercepto	6,5935±7,1942	5,5885±9,3142	Rejeita
			Inclinação	0,4246±0,8897	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Hymenolobium</i>	Intercepto	6,1055±6,9015	5,1682±8,6137	Rejeita
			Inclinação	0,6405±1,2259	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Manilkara</i>	Intercepto	3,835±3,9318	3,5804±5,9674	Rejeita
			Inclinação	0,5945±0,6897	0,75±1,25	Não Rejeita
		<i>Mezilaurus</i>	Intercepto	5,4463±5,7405	4,5266±7,5443	Rejeita
			Inclinação	0,7436±0,9195	0,75±1,25	Não Rejeita

UMF: Unidade de Manejo Florestal