



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

SEBASTIÃO RODRIGO DO R. SOUZA DE OLIVEIRA

MODELAGEM DO VOLUME DE ESPÉCIES FLORESTAIS DA AMAZÔNIA:
COMPARAÇÃO ENTRE EQUAÇÕES GENÉRICAS E ESPECÍFICAS POR ESPÉCIE

BELÉM

2022

SEBASTIÃO RODRIGO DO R. SOUZA DE OLIVEIRA

**MODELAGEM DO VOLUME DE ESPÉCIES FLORESTAIS DA AMAZÔNIA:
COMPARAÇÃO ENTRE EQUAÇÕES GENÉRICAS E ESPECÍFICAS POR ESPÉCIE**

Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do programa de pós graduação em Ciências Florestais, para obtenção do título de mestre em Ciências Florestais.
Área de concentração: Manejo de Ecossistemas Florestais.

Orientador: Dr. Hassan C. David
Coorientador: Dr. Alexandre Behling

BELÉM

2022

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

Oliveira, Sebastião Rodrigo do Remédio Souza de

Modelagem do volume de espécies florestais da Amazônia: comparação entre equações genéricas e específicas por espécie / Sebastião Rodrigo do Remédio Souza de Oliveira. - 2022.
80 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF),
Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2022.
Orientador: Prof. Dr. Hassan C. David; Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Behling.

1. Amazônia. 2. Modelo específico por espécie. 3. Bootstrap. 4. Regressão clássica. 5. Manejo florestal. I. David, Hassan C., (*orient.*) II. Título

CDD: 634.9285

SEBASTIÃO RODRIGO DO R. SOUZA DE OLIVEIRA

**MODELAGEM DO VOLUME DE ESPÉCIES FLORESTAIS DA AMAZÔNIA:
COMPARAÇÃO ENTRE EQUAÇÕES GENÉRICAS E ESPECÍFICAS POR ESPÉCIE**

Dissertação de mestrado apresentada a Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do programa de pós graduação em Ciências Florestais, para obtenção do título de mestre em Ciências Florestais.
Área de concentração: Manejo de Ecossistemas Florestais.

28/04/2022

Data da defesa

BANCA AVALIADORA

Hassan C. David - Orientador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA-UFRA

Prof. Dr. Emanuel José Gomes de Araújo - 1º Avaliador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO – UFRRJ

Prof. Dr. Luan D. Fiorentin - 3º Avaliador
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ-UFPR

Prof. Dr. Vinicius Augusto Moraes - 2º Avaliador
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO - UNEMAT

Dedico a Deus pelo dom da vida. Também dedico a minha mãe Nilma Souza, ao meu pai Sebastião Oliveira, e aos meus irmãos (Rogério, Rômulo e Benedita Oliveira) e a todos que de alguma forma, tenha contribuído com minha formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelas oportunidades concedidas, e por ter mostrado que tudo surge na nossa vida por um propósito, a ele eu glorifico por todas as bênçãos derramada sobre minha vida.

A minha mãe Nilma Souza de Oliveira e ao meu pai Sebastião Alves de Oliveira, por todo apoio e esforço realizado mesmo quando suas condições estavam limitadas. Aos meus irmãos Rogério, Rômulo e Benedita Oliveira, e a minha sobrinha Sophia.

Ao meu orientador Hassan C. David e ao meu coorientador Alexandre Behling, pela disposição, pelos ensinamentos repassados, pelas oportunidades concedidas e sobretudo pela paciência durante o desenvolvimento dessa dissertação, sempre disposto a tirar minhas dúvidas, por esses e outros momentos serei eternamente grato.

À professora Vanessa Mayara Souza Pamplona, que foi uma pessoa fundamental na minha formação acadêmica.

À Universidade Federal Rural da Amazônia e ao Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais (PPGCF), em especial a professora Lina Bufalino, por todo empenho e dedicação ao programa.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pelo apoio concedido através da bolsa de estudos, permitindo o desenvolvimento da presente dissertação.

A Secretaria de Estado e Meio Ambiente de Mato Grosso (SEMA-MT), pelo apoio dado através da disponibilização da base de dados utilizado nesta pesquisa.

“Se a matemática é o pincel com que Deus desenhou o universo, então, a estatística é a ferramenta humana criada para tentar entendê-lo!”

Waldenei Travassos de Queiroz

RESUMO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa foi quantificar o efeito de se adotar modelos específicos por espécie na estimativa do volume de madeira de árvores em florestas amazônicas. Dados de 789 indivíduos de 13 espécies florestais foram utilizados nesta pesquisa. No Capítulo 1, o objetivo foi mensurar o ganho em acurácia e precisão nas estimativas de volume, quando se utiliza equações específicas por espécie ao invés de equações genéricas. Os modelos de Husch e Schumacher-Hall foram ajustados para 14 conjuntos de dados. Modelos foram ajustados pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários, em uma abordagem de inferência pelo método *bootstrap* ($n_{rep}=5.000$), gerando 5.000 vetores de coeficientes em cada modelo e conjunto de dados. O intervalo de confiança *bootstrap* (IC, $\alpha=0,05$) dos coeficientes angulares foram calculados para o ajuste global, isto é, com todas as espécies. A comparação das equações específicas com a equação global obedeceu ao seguinte critério: se 95% dos coeficientes angulares de uma equação específica estiver dentro do IC dos coeficientes da equação global, então ambas equações não diferem estatisticamente. Também foi avaliado a acurácia ($\bar{\epsilon}_l\%$), precisão ($S_{yx}\%$) e os desvios das estimativas (pela análise gráfica). Como conclusão, foi notado que as equações específicas por espécie diferiram estatisticamente da equação global. As equações globais foram, de modo geral, menos acuradas e precisas que as equações específicas. No Capítulo 2, o objetivo foi comparar o desempenho de equações volumétricas, ajustadas com e sem uso de *bootstrap*. Como no capítulo anterior, o método *bootstrap* foi aplicado na análise de regressão, em que 5.000 vetores de coeficientes foram gerados para cada base de dados de ajuste (por espécie e misturado). Esses vetores foram usados para determinar o IC *bootstrap* ($\alpha=0,05$). Para comparar as equações ajustadas com e sem *bootstrap*, foi analisado se os coeficientes obtidos sem *bootstrap* enquadraram-se no IC daqueles obtidos com *bootstrap*. Precisão, acurácia e desvio de estimativas também foram analisados, como no capítulo anterior. A conclusão foi que ambos os métodos produzem coeficientes estatisticamente iguais.

Palavras chave: Amazônia; Modelo específico por espécie; *Bootstrap*; Regressão clássica.

GENERAL ABSTRACT

The general objective of this research was to quantify the effect in adopting species-specific models for estimating wood volume of trees in Amazonian forests. A dataset of 789 boles of 13 merchantable tree species were utilized. In Chapter 1, the aim was to measure the gain in accuracy and precision in wood volume estimates, when species-specific equations are applied rather than general equations. Husch and Schumacher-Hall volume models were fit to 14 datasets. The models were fit through the Ordinary Least Square method, under an approach based on the bootstrap technique ($n_{rep}=5.000$), generating 5,000 vectors of coefficients by model and dataset. The bootstrap-based confidence interval (CI, $\alpha=0.05$) for angular coefficients were calculated for the global fitting, that is including all species. The comparison of the specific equations to the generic ones obeyed the following criterion: if 95% of the angular coefficients of a specific equation fitted into the CI of the coefficients of the generic equation, then both equations are statistically equal. The accuracy ($\bar{\epsilon}_l\%$), precision ($S_{yx}\%$), and deviation of estimates (assessed via residual plots) also were examined. This chapter revealed that the specific equations are statistically different from the generic ones. In addition, the generic equations were, in general, less accurate and precise than the specific equations. In Chapter 2, the aim was compare the performance of volume equations fitted with and without using the bootstrap technique. As in the previous chapter, the bootstrap technique was applied to the regression analysis, in which 5,000 vectors of coefficients were generated by model and calibration dataset (by species and mixed). Such vectors were used to determine the bootstrap-based CI ($\alpha=0,05$). To compare equations fitted with and without bootstrap, it was assessed if the coefficients obtained without bootstrap fitted into the CI for those obtained with bootstrap. Precision, accuracy and deviation of estimates were examined as in the previous chapter. The coefficients were statistically equal for both regression approaches. As a conclusion, both regression approaches yielded coefficients statistically equal.

Keywords: Amazon; Species-specific model; Bootstrap; Classical regression.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Média ($n_{rep}=5.000$) dos coeficientes das equações específicas por espécie.	37
Tabela 2- Percentagem de coeficientes angulares (modelo de Husch e Schumacher & Hall) que estão dentro do intervalo de confiança bootstrap obtido para o ajuste global (todas as espécies).	42
Tabela 3- Média do erro relativo ($\epsilon_i\%$) obtidos para estimativas específicas por espécie e globais, seguindo o modelo de Husch e Schumacher & Hall.....	43
Tabela 4- Erro padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) calculados para estimativas específicas por espécie e globais, seguindo o modelo de Husch e Schumacher & Hall.	43
Tabela 5- Coeficientes das equações específicas ajustadas nas diferentes abordagens.....	60
Tabela 6- Média do erro relativo ($\epsilon_i\%$) e erro padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) obtidos para estimativas específicas no modelo ajustado de Schumacher & Hall.	61
Tabela 7- Valor mínimo (Min), mediana, média, valor máximo (Max), desvio padrão (s) e número de observações (n) específico e global, baseados na variável diâmetro a altura do peito (dap).....	69
Tabela 8- Valor mínimo (Min), mediana, média, valor máximo (Max), desvio padrão (s) e número de observações (n) específico e global, baseados na variável altura comercial (h_c).....	69
Tabela 9- Valor mínimo (Min), mediana, média, valor máximo (Max), desvio padrão (s) e número de observações (n) específico e global, baseados na variável volume de madeira em toras (vol).	70
Tabela 10- Correlações entre as variáveis: diâmetro a altura do peito (dap), altura comercial (h_c) e volume de madeira (Vol), para cada espécie e também para o conjunto das espécies avaliadas na pesquisa.....	70
Tabela 11- Matriz de covariância para os coeficientes de regressão obtidos através dos modelos de Husch e Schumacher & Hall.....	71
Tabela 12- Matriz de correlação para os coeficientes de regressão obtidos através do modelo de Husch.	72
Tabela 13- Matriz de correlação para os coeficientes de regressão obtidos através do modelo de Schumacher & Hall.....	73
Tabela 14- Coeficientes médio ajustado e seus respectivos desvios padrão obtidos pelo modelo de Husch	74

Tabela 15- Coeficientes médio ajustado e seus respectivos desvios padrão obtidos pelo modelo de Schumacher e Hall	74
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa de localização das unidades de manejo em que as informações foram coletadas.	31
Figura 2- Esquema ilustrativo dos diâmetros e secções para cubagem utilizando o método de Smalian	32
Figura 3- Gráfico de violino para as espécies individualizadas e para o conjunto de espécies utilizadas na pesquisa, baseado na variável diâmetro a altura do peito (dap).	35
Figura 4- Gráfico de violino para as espécies individualizadas e para o conjunto de espécies utilizadas na pesquisa, baseada na variável altura comercial	36
Figura 5- Gráfico de violino para as espécies individualizadas e para o conjunto de espécies utilizadas na pesquisa, baseado na variável volume (m ³).	36
Figura 6- Frequência relativa da distribuição bootstrap para os coeficientes β_1 obtidos, utilizando o modelo de Husch, aplicado as espécies e ao conjunto de espécies. ..	39
Figura 7- Frequência relativa da distribuição bootstrap para os coeficientes β_1 obtidos, utilizando o modelo de Schumacher & Hall, aplicado as espécies e ao conjunto de espécies.	40
Figura 8- Frequência relativa da distribuição <i>bootstrap</i> para os coeficientes β_2 obtidos, utilizando o modelo de Schumacher & Hall, aplicado as espécies e ao conjunto de espécies.	41
Figura 9- Desvios dos volumes estimados em relação ao volume observado para todas as espécies utilizadas no estudo, calculado com base no modelo de Husch ajustado a nível específico e global.	44
Figura 10- Desvios dos volumes estimados em relação ao volume observado de todas as espécies utilizadas no estudo, calculado com base no modelo de Schumacher & Hall ajustado a nível específico e global.	45
Figura 11- Mapa de localização das unidades de manejo em que as informações foram coletadas.	56
Figura 12- Esquema ilustrativo dos diâmetros e secções para cubagem utilizando o método de Smalian	58
Figura 13- Desvios dos volumes estimados em relação ao volume observado, para o conjunto de espécies, seguindo as diferentes abordagens de estimativas.....	62
Figura 14- Desvios dos volumes estimados em relação ao volume observado, por espécie, seguindo as diferentes abordagens de estimativas.....	63

Figura 15- Gráfico de dispersão para as variáveis dap (cm) vs altura comercial (m).	75
Figura 16- Gráfico de dispersão para as variáveis dap (cm) vs volume (m ³).	76
Figura 17- Gráfico de dispersão para as variáveis altura comercial (m) vs volume do fuste (m ³).	77
Figura 18- Gráfico de dispersão para as variáveis log do volume do fuste (m ³) vs dap (cm).	78
Figura 19- Gráfico de dispersão para as variáveis log do volume do fuste (m ³) vs altura comercial (m).	79

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

CC- Ciclo de Corte

CONAMA- Conselho Nacional de Meio Ambiente

d - Diâmetro

D - Diâmetro a altura do peito

$\bar{\varepsilon}_l\%$ - Erro médio da estimativa

f - Fator de forma

hm - Altura comercial

IC- Intervalo de confiança

IN- Instrução Normativa

MMA- Ministério do Meio Ambiente

PMFS- Plano de Manejo Florestal Sustentável

$S_{yx}\%$ - Erro padrão da estimativa

l - Comprimento

$\hat{v}$ - Volume estimado

v - Volume observado

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	7
GENERAL ABSTRACT.....	8
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	11
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	13
SUMÁRIO	14
1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	16
1.1 Manejo florestal na Amazônia e os marco legais.....	16
1.2 Manejo específico por espécie.....	17
1.3 Modelagem do volume	18
1.3.1 Coleta de dados por meio de inventário florestal	18
1.3.2 Modelos alométricos.....	19
1.3.3 <i>Bootstrap</i> como técnica de reamostragem	20
2 QUESTÃO CIENTÍFICA, HIPÓTESE E OBJETIVO DA PESQUISA	22
2.1 Questões científicas.....	22
2.2 Objetivo geral.....	22
REFERÊNCIAS.....	23
3 COMPARAÇÃO ENTRE EQUAÇÕES DE VOLUME DE FUSTE GENÉRICA E ESPECÍFICAS POR ESPÉCIE AJUSTADAS COM USO DO <i>BOOTSTRAP</i>	28
RESUMO.....	28
ABSTRACT	29
3.1 Introdução.....	30
3.2 Material e métodos	31
3.2.1 Área do estudo	31
3.2.2 Dados	32
3.2.3 Ajuste de modelos usando <i>bootstrap</i>	33
3.3 Resultados	35
3.3.1 Variabilidade entre espécies	35
3.3.2 Coeficientes de equações específicas vs. equação global	37
3.3.3 Medidas de ajuste das equações volumétricas	42
3.4 Discussão	46
3.4.1 Variabilidade das variáveis e dos coeficientes angulares	46

3.4.2	Coeficientes dos modelos específicos.....	46
3.4.3	Parâmetros de ajuste	47
3.4.4	Manejo específico	48
3.5	Conclusão	48
3.6	Referências	49
4	DESEMPENHO DE EQUAÇÕES VOLUMÉTRICAS ESPECÍFICA E GENÉRICA AJUSTADAS POR DOIS DIFERENTES MÉTODOS	53
	RESUMO.....	53
	ABSTRACT	54
4.1	Introdução	55
4.2	Material e métodos	56
4.2.1	Área do estudo	56
4.2.2	Dados	57
4.2.3	Ajuste de modelos usando as diferentes abordagens	58
4.2.3.1	Regressão com <i>bootstrap</i>	58
4.2.3.2	Regressão clássica.....	59
4.2.4	Comparação dos coeficientes angulares ajustados nos diferentes métodos	59
4.2.5	Acurácia e precisão das equações.....	59
4.3	Resultados	60
4.3.1	Coeficientes ajustados pelos diferentes métodos	60
4.3.2	Parâmetros de ajuste	60
4.4	Discussão	64
4.4.1	Coeficientes ajustado	64
4.4.2	Parâmetros de ajustamento do modelo	64
4.5	Conclusão	65
4.6	Referências	65
	APÊNDICE	69

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

1.1 Manejo florestal na Amazônia e os marco legais

Devido à importância ecológica para a conservação e preservação da fauna e da flora amazônica, muito se tem discutido sobre a continuidade da exploração dos recursos no interior da sua floresta (FERREIRA et al., 2005). Desde o período de ocupação da região, iniciada no ano de 1970 (incentivadas pelas políticas públicas da época), grande parte da exploração local é realizada sem planejamento e de maneira predatória (PINHEIRO et al., 2020). A exploração irracional dos recursos naturais provoca grandes mudanças na paisagem local, além de gerar muitos outros impactos, tais como: na dinâmica florestal, na elevação das taxas de desmatamento e na redução da biodiversidade do ecossistema (VERÍSSIMO; PEREIRA, 2014). Nesse sentido, o manejo florestal sustentável contribui diretamente para a conservação das espécies, além de fomentar a atividade econômica regional, assegurando as futuras gerações o direito ao meio ambiente equilibrado, assim como também o acesso aos recursos florestais (GOMES et al., 2018; LIMA et al., 2018).

Diante da importância das florestas, houve a necessidade de regulamentar a atividade florestal por meio de instrumentos legais. Exemplo disso foi a criação da instrução normativa (IN 05) nº 5, instituída em dezembro do ano de 2006, pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA). Essa IN dispunha de informações voltadas aos 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 (BRASIL, 2006).

A partir do ano de 2006, outras diretrizes também foram elaboradas, principalmente aquelas com o propósito de regulamentar os planos de manejo florestal. A exemplo disso, a instrução normativa nº 1 de setembro de 2007, que instituiu diretrizes técnicas complementares para elaboração dos planos de manejo florestal sustentável, baseadas no antigo código florestal (BRASIL, 2007).

No ano de 2009, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) publicou a resolução de nº 406 que dispunha de parâmetros técnicos a serem utilizados para a elaboração, apresentação, avaliação técnica e execução dos PMFS com fins madeireiros. Essa resolução tinha como objetivo regulamentar o manejo nas florestas nativas e suas formas de sucessão no bioma Amazônia (BRASIL, 2009).

Cabe ressaltar, que grande parte das resoluções que regulamentavam os planos de manejo florestal tiveram seus conteúdos alterados ou substituídos integralmente, sobretudo,

como forma de adequar-se as novas diretrizes estabelecidas pela Lei 12.651 de 2012, conhecida como Novo Código Florestal Brasileiro, além das suas alterações dispostas na Lei 12.727 de 2012 (BRASIL, 2012). Além dos regimentos federais (resoluções e o novo código florestal), os planos de manejo realizados atualmente, seguem também, resoluções especiais definidas pelas secretarias de meio ambiente de cada estado da federação.

1.2 Manejo específico por espécie

Grande parte das diretrizes desenvolvidas com o objetivo de regulamentar o manejo florestal, é bastante generalizada, pois geralmente considera as espécies florestais como objetos uniformes, em que fatores de crescimento e fisiologia intrínsecos às espécies não são considerados (ANDRADE et al., 2019). Como exemplo, podem ser citadas questões como diâmetro mínimo de corte para todas as espécies que é de 50 cm (exceto quando comprovado mediante a elaboração de estudo técnico), o ciclo de corte que varia de 25 a 35 anos para planos de manejo florestal pleno, o qual estima-se que as espécies possuem um crescimento médio de $0,86 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$. (GAMA et al., 2017; OLIVEIRA; JARDIM; GOMES, 2020). As generalidades no manejo florestal muitas vezes contribuem para a exploração desigual das espécies, além de torna-se uma barreira para o manejo de outras com grande potencial madeireiro, e, no entanto, não apresentam grandes diâmetros (ANDRADE et al., 2019; DAVID et al., 2019; ROSA et al., 2016)

Nesse sentido, espera-se que essas generalidades (i) contraponham a sustentabilidade de certas espécies, sobretudo aquelas de recomposição mais lenta, e (ii) uniformizem espécies com dinâmicas de crescimento totalmente diferentes (ANDRADE et al., 2019). Além disso, a variação da dinâmica de crescimento das espécies entre sítios florestais geralmente não é levada em conta (LIMA et al., 2018; SILVA et al., 2020). Manejar a floresta de acordo com as particularidades das espécies e o ambiente é uma alternativa que possibilita a exploração mais racional e equilibrada das espécies (SANTOS et al., 2018). Neste contexto, entende-se que a adoção de práticas de manejo mais específico, contribui para uma melhor recuperação florestal de curto a longo prazo (LOPEZ; VILLALBA; BRAVO, 2013).

O manejo específico é fundamental para o desenvolvimento de novos modelos de manejo, sobretudo que considerem a influência das espécies e toda sua dinâmica, sendo imprescindíveis para o melhoramento das práticas comumente usadas, modernizando o manejo florestal sustentável (COUTINHO et al., 2017; LIMA; LEÃO, 2013; SANTOS et al., 2017; SCHÖNGART, 2008). Neste cenário, o manejo específico facilita o emprego do sistema silvicultural adequado, assim como evita a superexploração das espécies com crescimento

lento, permitindo ao povoamento manejado produzir o estoque semelhante ao explorado em curto período (CUNHA; FINGER; HASENAUER, 2016; CASTRO; CARVALHO, 2014; MARTINS et al., 2018). Além disso, a individualização ou a seleção de espécies com características semelhantes contribui diretamente para uma correta estimativa do estoque madeireiro disponível na área de manejo (BIAZATTI et al., 2020; EBLING et al., 2013; SOARES et al., 2011).

1.3 Modelagem do volume

1.3.1 Coleta de dados por meio de inventário florestal

Inventários florestais são indispensáveis no levantamento de informações da floresta, pois é possível obter informações tanto de natureza qualitativas quanto quantitativas, podendo ter um elevado grau de detalhamento (intrinsecamente dependente do objetivo do inventário) (BARBOSA et al., 2017; FERREIRA, et al., 2020; MOTA). As informações geradas nos inventários nos permitem (i) realizar um melhor gerenciamento dos recursos florestais, (ii) detectar a necessidade de aplicação de desbastes e tratamentos silviculturais, (iii) quantificar o estoque florestal, (iv) conhecer a capacidade produtiva e econômica de um determinado povoamento ou de uma área, entre outras diversidades de informações (PONTE; PAULETO, 2018; RIBEIRO et al., 2019).

Por meio dos inventários florestais, o levantamento quantitativo de variáveis como número de indivíduos, diâmetro e altura podem ser obtidos (FERNANDES et al., 2017). A partir dessas informações o estoque de madeira, a densidade populacional pode ser estimada, servindo de indicadores para a viabilidade do manejo florestal (GAMA et al., 2017; GOMES et al., 2018; REGO et al., 2019; RIBEIRO et al., 2014). Outra questão igualmente importante baseada nos inventários florestais, refere-se à capacidade de determinar o acúmulo de biomassa e carbono florestal. Essas estimativas podem ser extrapoladas nas escalas micro, regional, continental ou global (GATTO et al., 2011). O conhecimento do potencial florestal em acumular carbono também serve para compreender a capacidade da floresta em atenuar efeitos das mudanças climáticas, causadas pelo aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (NASCIMENTO et al., 2020; THAINES et al. 2010).

Por essas e outras razões que o inventário florestal é uma ferramenta indispensável na elaboração de planos de manejo florestal sustentável (QUEIROZ, 2012). Principalmente em regiões com alta heterogeneidade, como na Amazônia, sendo indispensável para o planejamento e racionalização dos recursos naturais disponíveis (CASTRO; CARVALHO, 2014; CASTRO et al., 2019)

1.3.2 Modelos alométricos

Árvores de espécies amazônicas geralmente possuem uma geometria expressivamente irregular. A variação na forma do fuste dificulta a mensuração das principais variáveis coletadas em campo, como por exemplo o diâmetro, e isso afeta diretamente na determinação do volume real do indivíduo, além de reduzir a precisão das estimativas da madeira em pé (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2014). Devido à dificuldade em determinar os limites de cada forma ao longo do fuste, é comum considerar o tronco de uma árvore como um parabolóide, o que, no entanto, favorece o surgimento de erros nas estimativas (CAMPOS; LEITE, 2013).

Ao longo do tempo, diversos modelos alométricos foram desenvolvidos com o objetivo de modelar o volume de tronco em função de variáveis biofísicas da árvore, especialmente o diâmetro e altura (MACHADO et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2020). Os primeiros modelos alométricos utilizados nas investigações do comportamento florestal foram desenvolvidos nos primórdios do século XX na França, idealizada por Algan, em que foi determinado o volume da madeira com base no diâmetro à altura do peito, sendo melhoradas ao longo do tempo através da inserção de outras variáveis preditoras, além do erro inerente a estimativa obtida por cada modelo (LAAR; AKÇA; 2007).

Dentre os diversos modelos alométricos desenvolvidos, destacam-se as equações aplicadas as estimativas do volume de madeira em pé, em que seu princípio consiste em determinar o volume da madeira em uma zona de manejo, por meio da coleta de variáveis de fácil mensuração, como a circunferência à altura do peito, diâmetro à altura do peito, altura total, entre outras variáveis coletadas diretamente na árvore (BURKHART; TOMÉ, 2012). Os principais modelos alométricos utilizados nas estimativas, podem ser classificados de acordo com o número de variável preditoras (d , h , d^2 , $d.h$, e etc.) e entrada (simples entrada, dupla entrada e etc.) (LAAR; AKÇA; 2007). Atualmente, grande parte dos ajustes são feitos por meio do uso de modelos de regressão, em que suas variáveis preditoras são compostas por informações coletadas diretamente na floresta (diâmetros à altura do peito e altura total, altura comercial), os quais serão também as variáveis independentes, e que posteriormente resultarão em uma equação ajustada a ser utilizada no povoamento local (SALES et al., 2015).

Entretanto, devido às especificidades de cada sítio em que é realizado o manejo florestal, as espécies manejadas apresentam comportamentos alométricos distintos, e isso afeta a aplicação de um modelo matemático genérico (HESS et al., 2014). Isso sugere que equações devam ser ajustadas com alguma especificidade, sobretudo para a redução de possíveis erros na

estimativa. Diante disso, diversas pesquisas são realizadas, tendo como o objetivo selecionar equações alométricas adequadas para estimar o estoque florestal (LIMA et al., 2019).

1.3.3 *Bootstrap* como técnica de reamostragem

O *bootstrap* é uma abordagem intensiva de reamostragem do conjunto original de dados, e é baseado no método Monte Carlo (MMC). Essa técnica tem como princípio estimar a distribuição empírica dos dados, baseados em uma amostra coletada aleatoriamente e de tamanho finito, como se fosse a população verdadeira. Esse método é amplamente utilizado, principalmente em situações onde há a necessidade de se quantificar as medidas de incertezas dos estimadores (intervalo de confiança, viés, erros padrões, entre outros), os quais seriam quase impossíveis por meios de métodos estatísticos tradicionais (EFRON; TIBSHIRANI, 1983). Ou seja, o método *bootstrap* é aplicado em modelos mais complexos, onde a inferência estatística se torna complexa.

O método *bootstrap* é dividido basicamente em duas categorias (de acordo com o comportamento dos dados), sendo; (i) *bootstrap* paramétrico e (ii) *bootstrap* não paramétrico. O *bootstrap* paramétrico é utilizado em processos em que são conhecidos ou tem-se a suposição de sua distribuição amostral, e tem suas reamostragens realizadas com base na distribuição postulada, sempre considerando os valores dos parâmetros estimados, para a geração das reamostragens. O *bootstrap* não paramétrico é aplicado em dados que não se tem suposição de sua distribuição amostral (distribuição desconhecida), dessa forma, cada reamostragem é realizada com a reposição dos dados originais (CHERNICK; LABUDDE, 2011; HOROWITZ, 2019). As principais vantagens do método *bootstrap* são: possibilidade de uso em amostras de tamanho reduzido; simplicidade da análise, dispensando os pressupostos exigidos na estatística clássica para a determinação dos parâmetros da distribuição de interesse; fornece estimativas mais confiáveis, pois considera a amostra como a população de origem (PUTH; NEUHAÜSER; RUXTON, 2015). Diante desses aspectos, acredita-se que o uso do *bootstrap* na modelagem florestal, possa ser uma alternativa eficiente no desenvolvimento de modelos volumétricos a nível de espécie, uma vez que árvores-amostra de uma mesma espécie estão em menor quantidade.

O *bootstrap* geralmente é aplicado seguindo os passos: 1) determinar a dimensão dos dados originais (n), ou seja, o tamanho da amostra; 2) realizar a reamostragem aleatoriamente, também de tamanho n ; 3) aplicar as estatísticas de interesse e armazenar os valores observados na amostra *bootstrap*; 4) repetir esse processo por B vezes; 5) utilizar os valores armazenados

para a realização das inferências sobre a distribuição *bootstrap*, sendo possível testar as hipóteses levantadas (CHERNICK, 2008).

Ainda não existe um número ideal para reamostragem, devido à variação da natureza dos dados. Todavia, recomenda-se que o número mínimo de reamostragem não deva ser inferior a mil. Ressalta-se que a distribuição *bootstrap* tende a aproximar-se da verdadeira distribuição à medida que o número de reamostragem aumenta (CHERNICK, 2008).

Devido à incerteza quanto ao número ideal de simulações, acredita-se que por meio da avaliação do desvio padrão obtido para cada simulação *bootstrap*, é possível estimar o valor adequado. Dessa forma, faz-se uma análise gráfica dos desvios e avalia-se o momento em que esse desvio apresenta estabilidade em seus valores, sendo o ponto de estabilidade o número ideal de reamostragem (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

2 QUESTÃO CIENTÍFICA, HIPÓTESE E OBJETIVO DA PESQUISA

2.1 Questões científicas

Q1: Como equações alométricas podem contribuir para o manejo específico por espécie?

Q2: Existe diferença entre modelos genéricos e específicos, ajustados com e sem a aplicação do método *bootstrap*?

H1: Equações específicas por espécie apresentam melhor desempenho do que equações genéricas na estimativa do volume do fuste.

H2: Equações volumétricas específicas e genéricas ajustadas com *bootstrap* estimam com maior acurácia e precisão do que aquelas ajustadas pelo método clássico.

2.2 Objetivo geral

Esta pesquisa tem por objetivo: (i) mensurar o ganho em acurácia e precisão nas estimativas de volume, quando se utiliza equações específicas por espécie ao invés de equações genéricas; (ii) comparar o desempenho de equações volumétricas, ajustadas com e sem uso de *bootstrap*.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. R. D.; SILVA, J. N. M.; BARROS, P. L. C.; ALMEIDA, E. S.; SILVA, D. A. S.; SOUSA, C. S. C. Ajuste e seleção de modelos volumétricos de espécies comerciais no município de Ipixuna (Pa). **Rev. Agro. Amb.**, v. 13, n.1, p. 259-278, jan./mar. 2020. DOI:10.17765/2176-9168.2020v13n1p259-278
- ANDRADE, V. H. F.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; BOTOSSO, P. C.; MIRANDA, B. P.; SCHÖNGART, J. Growth models for two commercial tree species in upland forests of the Southern Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 438, p. 215-223, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.030>
- AZEVEDO, G. B.; SOUSA, G. T. O.; BARRETO, P. A. B.; CONCEIÇÃO JÚNIOR, V. Estimativas volumétricas em povoamentos de eucalipto sob regime de alto fuste e talhadia no sudoeste da Bahia. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 309-318, out./dez. 2011. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.68.309
- BARBOSA, G. P.; NOGUEIRA, G. S.; OLIVEIRA, M. L. R.; MACHADO, E. L. M.; CASTRO, R. V. O.; DUTRA, G. C. Pós-estratificação em inventário florestal da vegetação arbórea-arbustiva. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 45, n. 115, p. 445-453, set. 2017. DOI: [dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n115.03](https://doi.org/10.18671/scifor.v45n115.03)
- BLAZATTI, S. C.; SCCOTI, M. S. V.; BRITO JÚNIOR, J. F.; MÔRA, R.; CARDOZO, G. H. Eficiência de métodos para estimativa volumétrica de espécies nativas na Amazônia. Ocidental. **Nativa**, Sinop, v. 8, n. 2, p. 253-259, mar./abr. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v8i2.8081>
- BRASIL. Instrução Normativa nº 05 de 11 de dezembro de 2006. Dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável-PMFSs nas florestas primitivas e suas formas de sucessão na Amazônia Legal. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, treze de dezembro de 2006.
- BRASIL. Lei nº 12.727, de 17 de outubro de 2012. Altera a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; e revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001, o item 22 do inciso II do art. 167 da Lei nº 6.015, de 31 de dezembro de 1973, e o § 2º do art. 4º da Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, 17 de outubro de 2012.
- BRASIL. Norma de Execução nº 01, de 24 de abril de 2007. Institui, no âmbito desta Autarquia, as Diretrizes Técnicas para Elaboração dos Planos de Manejo Florestal Sustentável - PMFS de que trata o art. 19 da Lei 4.771, de 15 de setembro de 1965. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, trinta de abril de 2007.
- BRASIL. Resolução Conama nº 406, de 02 de fevereiro de 2009. Estabelece parâmetros técnicos a serem adotados na elaboração, apresentação, avaliação técnica e execução de Plano de Manejo Florestal Sustentável-PMFS com fins madeireiros, para florestas nativas e suas formas de sucessão no bioma Amazônia. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, seis de fevereiro de 2009.

BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling Forest Trees and Stands**. E-book, Springer, 2012, 460 p. DOI: DOI 10.1007/978-90-481-3170-9

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: Perguntas e respostas**. 4. ed., Viçosa: Editora UFV, 2013, 605 p.

CASTRO, T. C.; CARVALHO, J. O. P. Dinâmica da população de *Manilkara huberi* (DUCKE) A. CHEV. durante 26 anos após a exploração florestal em uma área de terra firme na Amazônia brasileira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 1, p. 161-169, jan.-mar., 2014. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509813333>

CASTRO, T. C.; RUSCHEL, A. R.; CARVALHO, J. O. P.; RAMOS, E. M. L. S.; GOMES, J. M. Representatividade e precisão na estimativa da densidade e área basal na floresta nacional do Tapajós. **Nativa**, Sinop, v. 7, n. 3, p. 312-316, mai/jun. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v7i3.6921>

CHERNICK, M. R. **Bootstrap Methods: a guide practitioners e researchers**. 2. ed, Newtown: Wiley interscience, 2008, 369 p.

CHERNICK, M. R.; LABUDDE, R. A. **An introduction to bootstrap methods with applications to R**, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

COUTINHO, V. M.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, C. R.; RODRIGUES, A. L.; SANQUETTA, M. N. I. Modelagem do crescimento de *Cryptomeria japonica* por análise de tronco parcial. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 37, n. 90, p. 93-98, abr./jun. 2017. DOI: 10.4336/2017.pfb.37.90.1371

CUNHA, T. A.; FINGER, C. A. G.; HASENAUER, H. Tree basal area increment models for *Cedrela*, *Amburana*, *Copaifera* and *Swietenia* growing in the Amazon rain forests. **Forest Ecology and Management**, v. 365, p. 174-183, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.12.031>

DAVID, H. C.; CARVALHO, J. O. P.; PIRES, I. P.; SANTOS, L. S.; BARBOSA, E. S.; BRAGA, N. S. A 20-year tree liberation experiment in the Amazon: Highlights for diameter growth rates and species-specific management. **Forest Ecology and Management**, v. 453 p. 117584, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117584>

EBLING, A. A.; ABRÃO, S. F.; PELISSARI, A. L.; BAMBERG, R.; BEHLING, A. Análise de agrupamento aplicado no crescimento diamétrico de florestas. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 16; p. 125-131, 2013.

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. **An Introduction to the bootstrap**. Chapman and Hall, New York, 1983

FERNANDES, A. M. V.; GAMA, J. R. V.; RODE, R. MELO, L. O. Equações volumétricas para *Carapa guianensis* Aubl. e *Swietenia macrophylla* King em sistema silvipastoril na Amazônia. **Nativa**, Sinop, v.5, n.1, p.73-77, jan./fev. 2017. DOI: 10.5935/2318-7670.v05n01a12

FERREIRA, L. V.; VENTICINQUE, E.; ALMEIDA, S. O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. **Estudos avançados**, v. 19, n. 53, p. 157-166, 2005.

FERREIRA, R. L. A.; CERQUEIRA, R. M.; CARDOSO JUNIOR, R. C. Análise da identificação botânica em inventários florestais de planos de manejo sustentáveis no oeste paraense. **Nature and Conservation**, v.13, n.3, p.136-145, 2020. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2020.003.0014>

GAMA, J. R. V.; SOUZA, A. L.; VIEIRA, D. S.; LEITE, H. G. Equações de volume para uma floresta ombrófila aberta, município de Codó, Estado do Maranhão. **Rev. Bras. Cienc. Agrar.**, Recife, v.12, n.4, p.535-542, 2017. DOI: 10.5039/agraria.v12i4a5489

GATTO, A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; LEITE, H. G.; VILLANI, E. M. A. Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na região centro-leste do Estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n.4, p.895-905, 2011

GOMES, K. M. A.; SILVA-RIBEIRO, R. B.; GAMA, J. R. V.; ANDRADE, D. F. C. Eficiência na estimativa volumétrica de madeira na Floresta Nacional do Tapajós. **Nativa**, Sinop, v. 6, n. 2, p. 170-176, mar./abr. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v6i2.5237>

HESS, A. F.; BRAZ, E. M.; THAINES, F.; MATTOS, P. P. Ajuste de relação hipsométrica para espécies da Floresta Amazônica. **Ambiência**, Guarapuava-PR, v. 10 n. 1 p. 21-29, jan./abr. 2014. DOI:10.5935/ambiencia.2014.01.02

HOROWITZ, J. L. Bootstrap Methods in Econometrics. **Annual Review of Economics**, v. 11, p. 193-224, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-economics-080218-025651>

LAAR, A.; AKÇA, a. **Forest Mensuration**. E-book, v. 13, Springer, 2007, 389 p.

LIMA, B. A.; ALMEIDA, B. R. S.; SOUSA, E. A. B.; CRUZ, G. S.; MELO, M. B.; MELO, L. O.; COSTA, D. L.; SANTOS, M. F. Estrutura e dinâmica florestal sob efeito do manejo madeireiro na FLONA Tapajós. **Adv. For. Sci.**, Cuiabá, v.5, n.4, p.437-443, 2018. DOI: <https://doi.org/10.34062/afs.v5i4.5984>

LIMA, J. P. C.; LEÃO, J. R. A. Dinâmica de crescimento e distribuição diamétrica de fragmentos de florestas nativa e plantada na Amazônia sul ocidental. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 1, p.70-79, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2012.065>

LIMA, R. C.; SOTTA, E. D.; RAMOS, M. B. B.; SILVA, B. M. S.; APARÍCIO, P. S.; SANTOS, Y. H. S. Equações para estimativa de volume, biomassa e carbono para três espécies nativas da Amazônia, cupiúba (*Goupia glabra* Aubl), angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) e mandioqueira escamosa (*Qualea paraensis* Ducke). **Revista Arquivos Científicos** (IMMES). Macapá, AP, v. 2, n. 2, p. 74-82, 2019.

LÓPEZ, L.; VILLALBA, R.; BRAVO, F. Cumulative diameter growth and biological rotation age for seven tree species in the Cerrado biogeographical province of Bolivia. **Forest Ecology and Management**, v. 292, p. 49-55, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.011>

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, S. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava: UNICENTRO, 2014. 316 p.

MACHADO, S. A.; SOUZA, R. F.; APARECIDO, L. M. T.; RIBEIRO, A.; CZELUSNIAK, B. H. Evolução das variáveis dendrométricas da bracatinga por classe de sítio. **CERNE**, v. 21, n. 2, p. 199-207, 2015. DOI: 10.1590/01047760201521021222

MARTINS, W. B. R.; PINTO, A. R. G.; COSTA, J. S.; CARVALHO, J. O. P.; CASTRO, T. C.; RUSCHE, A. R. Dinâmica da população de *Lecythis idatimon* Aubl. no período de trinta anos em uma floresta de terra firme manejada na Amazônia brasileira. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 46, n. 120, p. 690-700, dez. 2018. DOI: [dx.doi.org/10.18671/scifor.v46n120.17](https://doi.org/10.18671/scifor.v46n120.17)

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

MOTA, C. G.; PONTE, M. X.; PAULETTO, D. Modelos alométricos para estimativa da biomassa de fustes de árvores em floresta ombrófila densa no município de Portel no Estado do Pará-Brasil. **Rev. Espacios**, v. 39, n. 6, p. 17, 2018.

NASCIMENTO, R. G. M.; VANCLAY, J. K.; FIGUEIREDO FILHO, A; MACHADO, S. A.; RUSCHEL, A. R.; HIRAMATSU, N. A.; FREITAS, L. J. M. 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, p.100028, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2020.100028>

OLIVEIRA, L. C. L. Q.; JARDIM, F. C. S.; GOMES, J. M. Predição do ciclo de corte de espécies arbóreas comerciais por grupos ecológicos em uma floresta na Amazônia brasileira. **Rev. Bras. Biom.**, Lavras, v. 38, n. 1, p. 18-34, 2020. DOI: [10.28951/rbb.v38i1.412](https://doi.org/10.28951/rbb.v38i1.412)

OLIVEIRA, R. L. C.; FARIAS, H. L. S.; SILVA, W. R.; BARBOSA, R. I. Padrão alométrico de duas espécies do gênero *Byrsonima* (Malpighiaceae) em uma área de savana no norte da Amazônia brasileira. **Ambiente: Gestão e Desenvolvimento**, v. 13, n. 2, mai/ago 2020. DOI: <https://doi.org/10.24979/ambiente.v13i2.807>

PINHEIRO, K. A. O.; CARVALHO, J. O. P.; SCHWARTZ, G.; FRANCEZ, L. M. B.; QUANZ, B.; CARNEIRO, F. S. Estrutura de uma comunidade arbórea adulta na Amazônia e o desafio de uso sustentável de espécies florestais comerciais. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.11, n.5, p.63-73, 2020. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.005.0007>

PUTH, M.; NEUHAUSER, M.; RUXTON, G. D. On the variety of methods for calculating confidence intervals by bootstrapping. **Journal of Animal Ecology**, v. 84, p. 892-897, 2015. DOI: [10.1111/1365-2656.12382](https://doi.org/10.1111/1365-2656.12382)

QUEIROZ, W. T. **Amostragem em inventário florestal**. Ed. UFRA. Belém: Universidade Federal Rural da Amazônia, 2012. 441 p.

REGO, A. M.; SILVA, M. D. M.; LOPES SOBRINHO, O. P.; FERREIRA, J. C. S. Modelos de equações volumétricas para um povoamento de eucalipto situado em Codó (MA). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.10, n.4, p.1-8, 2019. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.004.0001>

RIBEIRO, L. O. M. M.; SILVA, J. N. M.; PÉLLICO NETO, S; QUEIROZ, W. T. Q. Avaliação da amostragem com substituição parcial com duas medições sucessivas em floresta manejada no município de Paragominas, Pará. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 47, n. 124, p. 778-790, 2019. DOI: doi.org/10.18671/scifor.v47n124.19

RIBEIRO, R. B. S.; GAMA, J. R. V.; MELO, L. O. Seccionamento para cubagem e escolha de equações de volume para a Floresta Nacional do Tapajós. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 605-612, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/01047760201420041400>.

ROSA, S. A.; BARBOSA, A. C. M. C.; JUNK, W. J.; CUNHA, C. N.; PIEDADE, M. T. F.; SCABIN, A. B.; CECCANTINI, G. C. T.; SCHÖNGART, J. Growth models based on tree-ring data for the Neotropical tree species *Calophyllum brasiliense* across different Brazilian wetlands: implications for conservation and management. **Trees**, n. 31, p. 729-742, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1503-5>

SALES, F. C. V.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, L. R. C.; GADELHA, F. H. M. Ajustes de modelos volumétricos para o clone *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* cultivados no agreste de Pernambuco. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 45, n. 4, p. 663-670, out. / dez. 2015. DOI: 10.5380/rf.v45i4.37594

SANTOS, A. C. A.; SILVA, S.; LEITE, H. G.; CRUZ, J. P. Influência da variabilidade edafoclimática no crescimento de clones de eucalipto no Nordeste baiano. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 37, n. 91, p. 259-268, jul./set. 2017. DOI: 10.4336/2017.pfb.37.91.1207

SANTOS, M. F.; COSTA, D. L.; MELO, L. O.; GAMA, J. R. V. Estrutura, distribuição espacial e dinâmica florestal de duas espécies nativas após extração manejada de madeira na Flona do Tapajós. **Adv. For. Sci.**, Cuiabá, v.5, n.2, p.351-356, 2018. DOI: <https://doi.org/10.34062/afs.v5i2.5921>

SCHÖNGART, J. Growth-Oriented Logging (GOL): A new concept towards sustainable forest management in Central Amazonian várzea floodplains. **Forest Ecology and Management**, n. 256, p. 46-58, 2008. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.03.037

SILVA, L. B. D.; MORAIS, V. A.; CAETANO, M. G.; BERNARDES, L. F. G. M. Equações para estimativa volumétrica de espécies arbóreas da Amazônia. **Rev. Ciênc. Agroamb.** v. 18, n. 1, 2020. DOI: 10.30681/rcaa.v18i1.4046

SILVA, M. L. M.; BINOTI, D. H. B.; GLERIANI, J. M.; LEITE, H. G. Ajuste do modelo de Schumacher e Hall e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.33, n. 6, p. 1133-1139, 2009.

SOARES, C. P. B.; MARTINS, F. B.; LEITE JUNIOR, H. U.; SILVA, G. F.; FIGUEIREDO, L. T. M. Equações hipsométricas, volumétricas e de taper para onze espécies nativas. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n5, p.1039-1051, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000600010>

THAINES, F.; BRAZ, E. M.; MATTOS, P. P.; THAINES, A. A. R. Equações para estimativa de volume de madeira para a região da bacia do Rio Ituxi, Lábrea, AM. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 64, p. 283-289, nov./dez. 2010. DOI: 10.4336/2010.pfb.30.64.283

VERÍSSIMO, A.; PEREIRA, D. Produção na Amazônia Florestal: características, desafios e oportunidades. **Revista Parcerias Estratégicas**, Maranhão, v.19, n.38, p. 13-44, 2014.

3 COMPARAÇÃO ENTRE EQUAÇÕES DE VOLUME DE FUSTE GENÉRICA E ESPECÍFICAS POR ESPÉCIE AJUSTADAS COM USO DO *BOOTSTRAP*

RESUMO

Esta pesquisa tem por objetivo mensurar o ganho em acurácia e precisão nas estimativas de volume, quando se utiliza equações específicas por espécie ao invés de equações genéricas. Dados de 789 indivíduos de treze espécies florestais de alto valor comercial na Amazônia foram utilizados. Os modelos de Husch (simples entrada) e Schumacher & Hall (dupla entrada) foram ajustados para 14 conjuntos de dados, sendo um conjunto incluindo todas as espécies, e mais treze conjuntos correspondentes a cada espécie. Modelos foram ajustados por meio do método dos mínimos quadrados em uma abordagem de inferência pelo método *bootstrap* (número de replicações, $n_{rep} = 5.000$), gerando assim 5.000 vetores de coeficientes para cada modelo e conjunto de dados. O intervalo de confiança *bootstrap* (IC, $\alpha = 0,05$) dos coeficientes angulares foram calculados para o ajuste global. A comparação das equações específicas com a equação global obedeceu ao seguinte critério: se 95% dos coeficientes angulares de uma equação específica estiveram dentro do IC *bootstrap* da equação global, então ambas equações não diferem estatisticamente. Também foi determinado as medidas de acurácia, precisão e desvios das estimativas. Os resultados indicaram que nenhuma equação específica por espécie foi estatisticamente igual à equação global. Além disso, foi observado que as equações globais foram, de modo geral, menos acuradas e precisas que as equações específicas. Com isso, conclui-se que esta pesquisa se alinha às recomendações de que o manejo na Amazônia deveria ter uma abordagem específica por espécie.

Palavras Chave: Volumetria; modelagem florestal; Intervalo de confiança *bootstrap*; Manejo específico por espécie.

COMPARISON BETWEEN GENERIC AND SPECIES-SPECIFIC STEM VOLUME EQUATIONS

ABSTRACT

This research aims to measure the gain in accuracy and precision in volume estimates, when using species-specific equations instead of generic equations. Data from 789 individuals of thirteen forest species of high commercial value in the Amazon were used. The Husch (single-entry) and Schumacher & Hall (double-entry) models were fitted to 14 datasets, one including all species, plus thirteen datasets corresponding to each species. Models were fitted using the least squares method in a bootstrap inference approach (number of replications, $n_{rep} = 5,000$), thus generating 5,000 vectors of coefficients for each model and dataset. The bootstrap confidence interval (CI, $\alpha=0.05$) of the angular coefficients were calculated for the global fitting. The comparison of the specific equations with the global equation obeyed the following criterion: if 95% of the angular coefficients of a specific equation fitted into the bootstrap IC of the global equation, then both equations do not differ statistically. Accuracy, precision and deviations of estimates were also determined. The results indicated that no species-specific equation was statistically equal to the global equation. Also, it was observed that the global equations were, in general, less accurate and precise than the specific equations. As a conclusion, this research is in line with the recommendations that management in the Amazon should have a specific approach by species.

Keywords: Volumetry; Bootstrap; Confidence interval of coefficients; Species-specific management.

3.1 Introdução

O volume é uma das variáveis de maior interesse para os planos de manejo florestal (AZEVEDO et al., 2011). O estoque de volume de madeira remete ao potencial produtivo da floresta e de seu potencial econômico (GOMES et al., 2018). Essa informação é fundamental para o planejamento do manejo florestal sustentável, o que consequentemente estimula o uso racional e econômico dos recursos madeireiros (FERREIRA et al., 2020; LASSANOVA et al., 2018). Devido à importância do volume de madeira no manejo florestal, boa parte das pesquisas florestais tem por finalidade melhorar as previsões dessa variável (BIAZATTI et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2014).

Nas florestas brasileiras destinadas ao manejo florestal, as estimativas volumétricas realizadas no primeiro ano de exploração, são baseadas no volume do cilindro corrigidas por meio do fator de forma ($f = 0,70$), proposta por Heinsdijk e Bastos em 1963 (GAMA et al., 2017; LIMA et al., 2021). Porém, o uso do fator de forma nem sempre proporciona estimativas precisas, sobretudo por não levar em consideração os fatores intrínsecos as espécies florestais (ALMEIDA et al., 2021; MOTA; PONTE; PAULETO, 2018). Na Amazônia, dezenas de espécies são exploradas, onde cada espécie apresenta funções morfológicas e fisiológicas distintas (LASSANOVA et al., 2013). Deixar de considerar fatores específicos de cada espécie na determinação do volume pode reduzir a acurácia e a precisão das estimativas (CYSNEIROS et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2021; VATRAZ et al., 2016). Esses fatores poderiam ser controlados mediante a individualização de espécies ou através da inserção de novas observações (LEÃO et al., 2020). No entanto, o custo de uma coleta de dados com elevado nível de detalhamento é considerado uma barreira pelos responsáveis do manejo florestal (SILVA et al., 2020). Com isso, a busca por ferramentas alternativas, principalmente aquelas que possam subsidiar as estimativas com acurácia e precisão tornam-se cada vez mais indispensáveis (CRUZ et al., 2019; THAINES et al., 2010; TONINI; BORGES, 2015).

Dentre as ferramentas capazes de servir como suporte para as análises florestais, a utilização do método de reamostragem *bootstrap* pode ser uma alternativa viável e eficiente. Os resultados obtidos quando aplicado o método *bootstrap*, tendem a apresentar distribuição próxima aos esperados para o parâmetro populacional, à medida que se aumenta o número de reamostragens (CHERNICK; LABUDDE, 2011; CHERNICK, 2008; EFRON; TIBSHIRANI, 1983). Entre as principais vantagens do método *bootstrap*, citam-se a utilização de amostra de tamanhos reduzidos; simplicidade da análise, dispensando os pressupostos exigidos pela estatística tradicional para a determinação dos parâmetros da distribuição de interesse; e fornece

estimativas mais confiáveis, pois considera a amostra como a população de origem (PUTH; NEUHAÜSER; RUXTON, 2015).

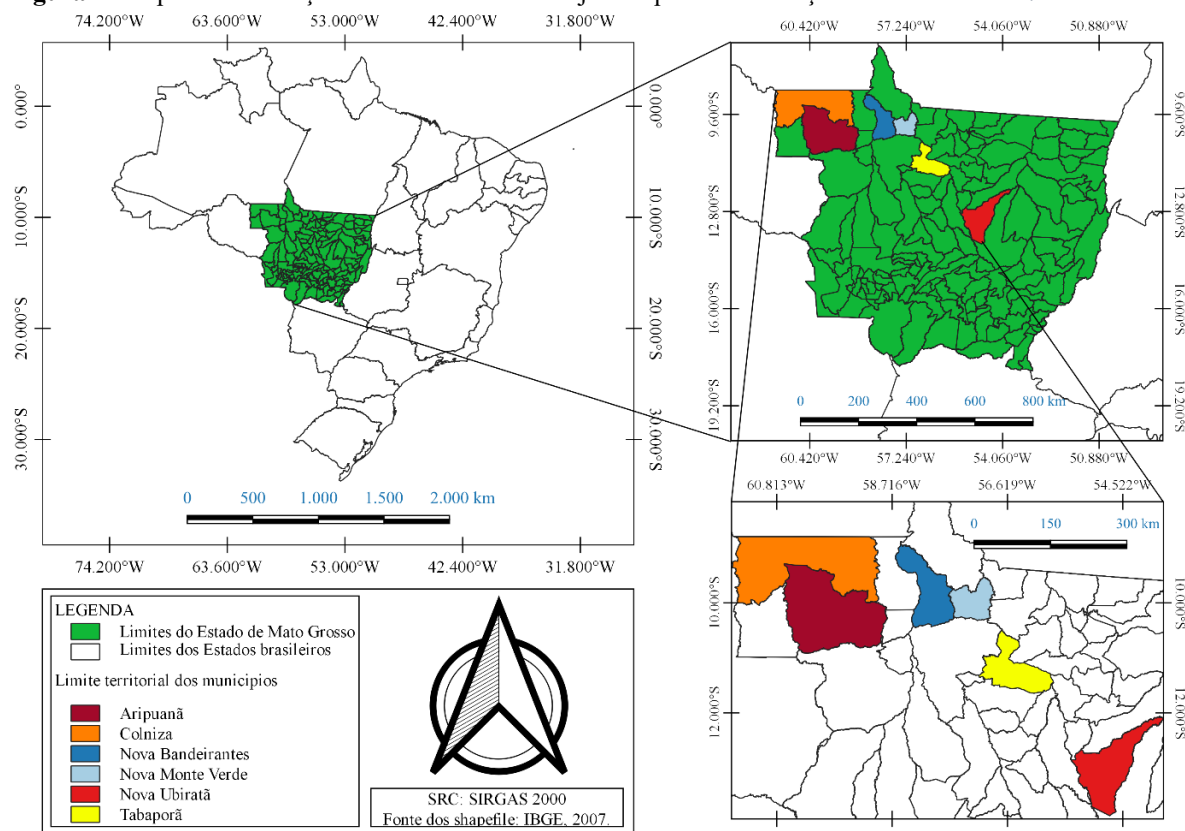
Esta pesquisa busca responder à seguinte questão científica: como equações alométricas podem contribuir para o manejo específico por espécie? Para isso, testou-se a hipótese de que as equações específicas por espécie apresentam melhor desempenho do que equações genéricas na estimativa do volume do fuste. O objetivo foi mensurar o ganho em acurácia e precisão nas estimativas de volume, quando se utilizam equações específicas por espécie ao invés de equações genéricas.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Área do estudo

Os dados desta pesquisa foram coletados em áreas de manejo florestal sustentável, realizado no estado de Mato Grosso. As unidades de manejos estão distribuídas em seis municípios do estado, sendo eles: Aripuanã, Colniza, Nova Bandeirantes, Nova Monte Verde, Nova Ubiratã e Tabaporã (Figura 1).

Figura 1- Mapa de localização das unidades de manejo em que as informações foram coletadas.



Fonte: Autor (2022)

De acordo com a classificação climática de Köppen, o estado de Mato Grosso apresenta basicamente dois tipos de clima, distribuídos em duas zonas. São eles: (a) clima tropical úmido

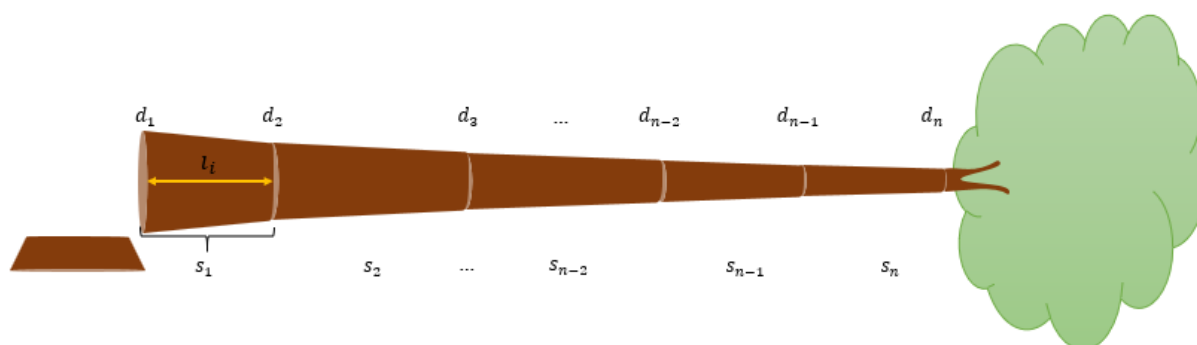
ou sub-úmido (Am) típico da parte norte do estado, e (b) clima tropical, com inverno seco (Aw), encontrado na região central do estado, assim como também no Pantanal Mato-Grossense (ALVARES et al., 2013). A precipitação média anual do estado varia de 1.200 a 2.200 mm, sendo que a maior taxa pluviométrica é atingida nos meses compreendido entre outubro a abril. O período de menor intensidade pluviométrica está entre os meses que vão de maio a setembro. A temperatura média anual do estado varia de 22 a 27,6 °C, sendo que as menores temperaturas são de regiões próximas ao sudeste do estado (RAMOS et al., 2017).

3.2.2 Dados

Treze espécies florestais de alto valor comercial na Amazônia foram selecionadas para este estudo: (1) *Vatairea macrocarpa* (Benth.) Ducke (angelim amargoso); (2) *Hymenolobium excelsum* Ducke (angelim pedra); (3) *Qualea albiflora* Warm. (cambará); (4) *Ocotea corymbosa* (Meissn.) Mez (canelão); (5) *Erisma uncinatum* Warm. (cedrinho); (6) *Dipteryx odorata* (Aubl.) Forsyth f. (cumarú); (7) *Goupia glabra* Aubl (cupiúba); (8) *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J. F. Macbr (garapeira); (9) *Handroanthus* spp (ipê); (10) *Mezilaurus itauba* (Meisn.) Taub. ex Mez. (itaúba); (11) *Hymenaea courbaril* L.(jatobá); (12) *Simarouba versicolor* A.St.-Hil. (morcegueira); e (13) *Aspidosperma macrocarpon* Mart. & Zucc. (peroba mica).

Foram amostrados um total de 789 indivíduos com diâmetro à altura de 1,30 m acima do solo (D) ≥ 45 cm. Além do D , mediu-se também a altura comercial (h_m), que corresponde à altura do fuste até o início da primeira bifurcação. Após a seleção e mensuração dos fustes, determinou-se o volume comercial de madeira com casca (v) utilizando o método de cubagem de Smalian (Eq. 1). Os fustes foram medidos em secções menores (Figura 2), com o primeiro diâmetro (d_1) medido na altura do corte, o segundo (d_2) situado a 3,0 m após o d_1 , e os demais a cada 2,0 m, até atingir a altura comercial.

Figura 2- Esquema ilustrativo dos diâmetros e secções para cubagem utilizando o método de Smalian



Fonte: Autor (2022)

$$v = \sum_i \left(\frac{a_{(i)} + a_{(i+1)}}{2} \right) l_i \quad (1)$$

Em que:

$a_{(i)}$ e $a_{(i+1)}$: área transversal das extremidades da secção s_i ;

l_i : comprimento da secção s_i .

v : volume comercial observado, em m³;

Para cada espécie e para o conjunto, foram calculadas estatísticas descritivas do volume, diâmetro e altura comercial, incluindo: valor mínimo, mediana, média, valor máximo e desvio padrão (Tabelas 7-9 do apêndice). Gráficos de violino ilustram, por espécie, os quartis e frequência de dados para as três variáveis deste estudo (volume, diâmetro e altura do fuste).

3.2.3 Ajuste de modelos usando *bootstrap*

Os dados foram separados em 13 conjuntos por espécie para as análises específicas, além do conjunto de dados contemplando todas as espécies para análise global. Os modelos de volume de Husch linearizado (Eq. 2) e Schumacher & Hall linearizado (Eq. 3) foram ajustados aos 14 conjuntos de dados. A preferência por esses dois modelos se deu em razão da (i) vasta aplicação na modelagem de espécies amazônicas exploradas comercialmente, (ii) apresentarem bons ajustes, e (iii) possuírem variáveis independentes de fácil obtenção (ALMEIDA et al., 2020; LASSANOVA et al., 2018).

Modelos foram ajustados por meio do método dos mínimos quadrados em uma abordagem de inferência pelo método *bootstrap* seguindo seis passos:

- (i) Para a j -ésima espécie, foi selecionado aleatoriamente com reposição $n_{\text{árv},j}$ árvores, sendo $n_{\text{árv},j}$ o número de árvores da espécie.
- (ii) As equações (2)-(3) foram ajustadas com o subconjunto de dados criado no passo (i), e armazenados os coeficientes de cada modelo.

$$\ln(\hat{v}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(D) + \varepsilon_i \quad (2)$$

$$\ln(\hat{v}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(D) + \beta_2 \ln(h_m) + \varepsilon_i \quad (3)$$

Em que:

$\hat{v}$: volume comercial estimado, em m³;

D : diâmetro à altura do peito, em cm;

h_m : altura comercial, em m.

ε_i : erro da estimativa

- (iii) Replicação dos passos (i)-(ii) 5.000 vezes.

- (iv) Obtenção média dos coeficientes angulares gerados nas replicações.
- (v) Repetição dos passos (i)-(iv) para o conjunto com todas as espécies.
- (vi) Para o conjunto com todas as espécies, foi obtido o intervalo de confiança *bootstrap* ($\alpha=0,05$) dos coeficientes angulares.

Note que o passo (iii) gera 5.000 vetores de coeficientes para cada modelo (Husch e Schumacher & Hall) e cada base de calibração do modelo (por espécie, e global). Note também que o passo (vi) gera intervalos de confiança *bootstrap* (IC) para a equação global, i.e., incluindo todas as espécies. Com esses passos, os coeficientes angulares da equação global foram comparados com os coeficientes angulares por espécies através do IC, por meio do seguinte critério: se 95% (i.e., 4.750 de 5.000) dos coeficientes angulares (da equação específica) estiveram dentro do IC dos coeficientes da equação global, então ambas equações não diferem estatisticamente.

3.2.4. Acurácia e precisão das equações

Além da avaliação do intervalo de confiança, determinou-se também medidas de ajuste do volume para as equações globais e específicas, sendo; média do erro relativo percentual $\bar{\varepsilon}_i\%$ (Eq. 4), erro padrão da estimativa percentual, $S_{yx}\%$ (Eq. 5), bem como análise gráfica dos desvios das estimativas do volume em relação ao volume observado.

$$\bar{\varepsilon}_i\% = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\hat{v}_i - v_i}{v_i} \right) \cdot 100 \right]}{n_i} \quad (4)$$

$$S_{yx}\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_i)^2}{n_i - p}}}{\bar{v}} \cdot 100 \quad (5)$$

Em que,

$\hat{v}_i$: volume estimado i -ésima espécie, em m³;

v_i : volume observado i -ésima espécie, em m³;

$\bar{\varepsilon}_i\%$: erro médio das estimativas (resíduo);

n_i : número de observações da i -ésima espécie;

p : número de coeficientes do modelo adotado;

$\bar{v}$: média do volume observado;

$S_{yx}\%$: Erro padrão da estimativa em percentual.

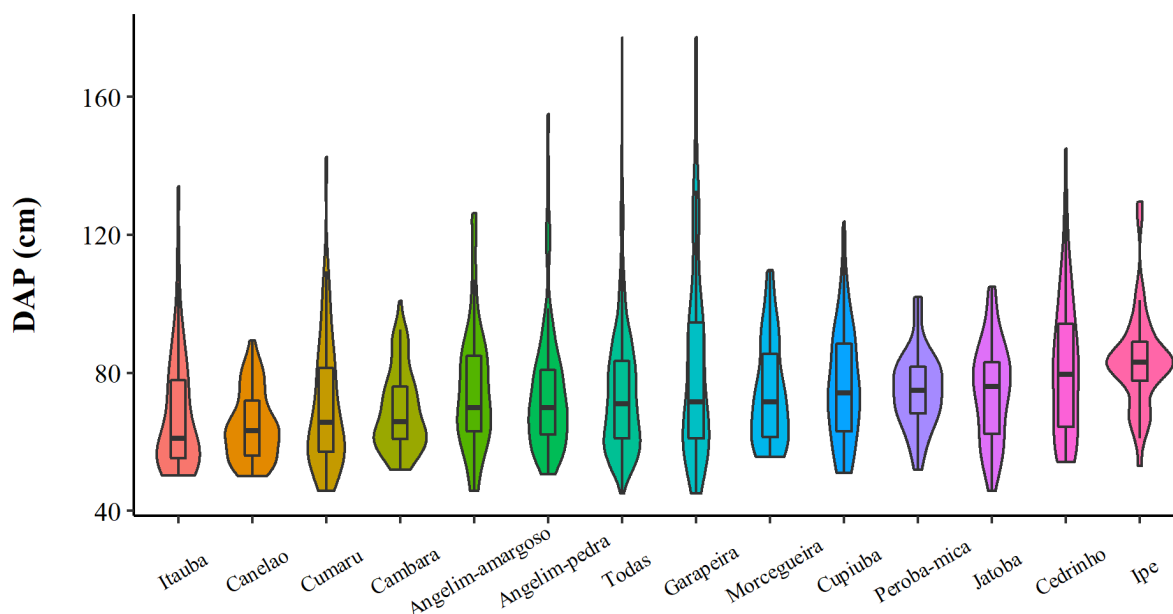
O *software* computacional R (R CORE TEAM, 2022) foi utilizado nas análises estatísticas. Os pacotes do R *boot*, *forcats* e *tidyverse* foram usados como ferramentas auxiliares.

3.3 Resultados

3.3.1 Variabilidade entre espécies

Os gráficos de violino mostraram expressivas variações de volume, dap e altura entre as espécies. As menores amplitudes de diâmetro foram constatadas no canelão, cambará e peroba mica (Figura 3). Em relação as maiores aplitudes, estas foram verificadas na garapeira, angelim amargoso e cumarú. De forma geral, a maioria dos diâmetros apresentaram frequência de valores abaixo de suas medianas, com exceção do jatobá, que teve a concentração dos valores dos diâmetros acima da mediana e a peroba mica com ipê, que obtiveram seus daps distribuídos ao redor da mediana (Figura 3).

Figura 3- Gráfico de violino para as espécies individualizadas e para o conjunto de espécies utilizadas na pesquisa, baseado na variável diâmetro a altura do peito (dap).

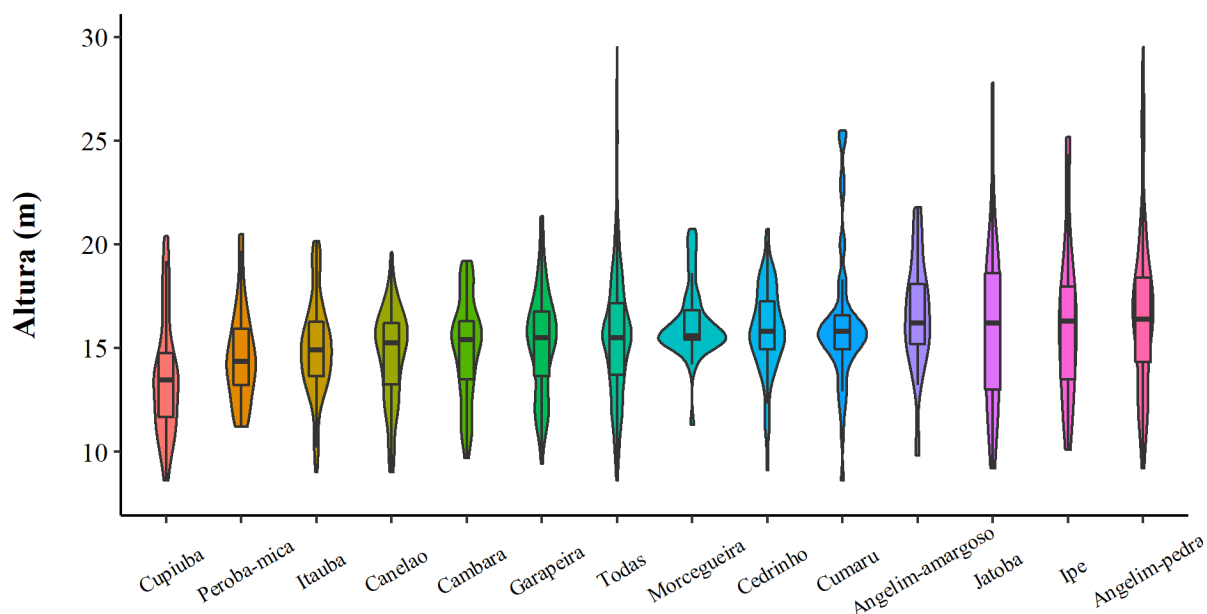


Fonte: autor (2022).

Ao traçar o perfil descritivo com base no gráfico de violino para a variável altura comercial, notou-se que as maiores amplitudes de variação para essa variável foram encontradas no cumarú, jatobá, ipê e angelim pedra, além da elasticidade da distribuição dessa informação, essas mesmas espécies apresentaram valores de mediana acima de 15 m, com grande dispersão dessa variável ao longo de sua amplitude, excetuando-se o cumarú que teve sua distribuição concentrada na mediana (Figura 4). As demais espécies apresentaram

amplitude de altura reduzida, e dessa forma, as alturas tenderam a concentrar em torno de suas respectivas medianas (Figura 4).

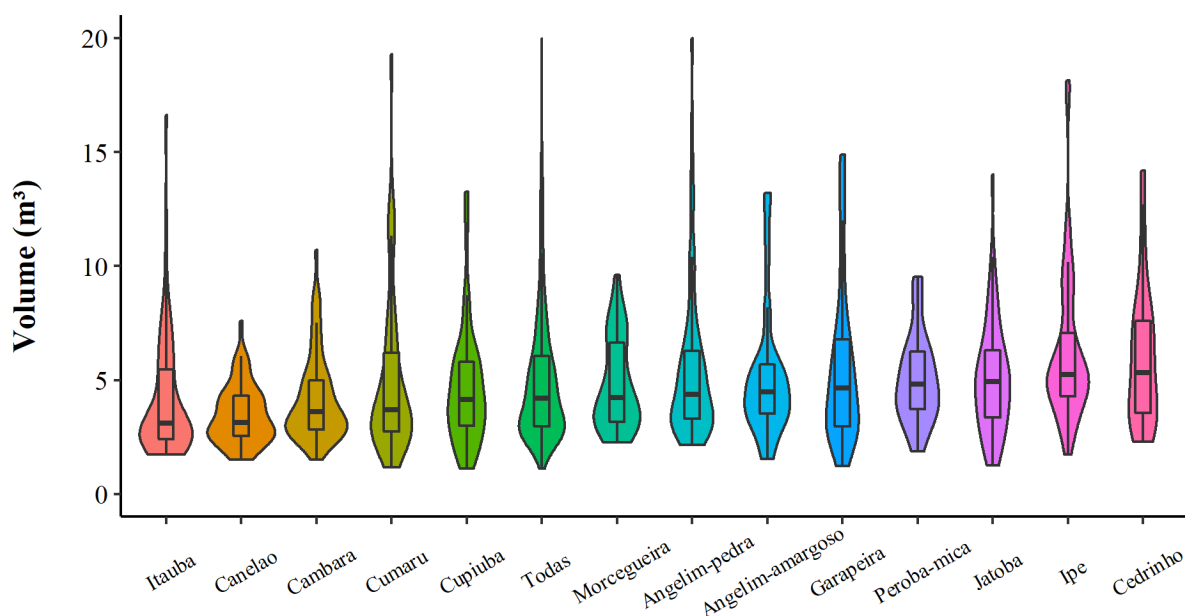
Figura 4- Gráfico de violino para as espécies individualizadas e para o conjunto de espécies utilizadas na pesquisa, baseada na variável altura comercial



Fonte: autor (2022).

Em relação ao volume, pela análise gráfica foi possível perceber de uma maneira geral, que para todas as espécies a amplitude de dispersão foi baixa, com o volume mediano inferior a 5 m^3 , além disso, a densidade do volume concentrou-se ao redor de suas respectivas medianas, com tendência em alguns casos a concentrar-se em torno do primeiro quartil (Figura 5).

Figura 5- Gráfico de violino para as espécies individualizadas e para o conjunto de espécies utilizadas na pesquisa, baseado na variável volume (m^3).



Fonte: autor (2022).

3.3.2 Coeficientes de equações específicas vs. equação global

Abaixo, são apresentados a média dos coeficientes ($n_{rep}=5000$) obtidos para cada espécie (Tabela 1). Esses valores médios definem as equações finais que poderão ser utilizadas na estimativa do volume de espécies florestais utilizadas nesta pesquisa.

Tabela 1- Média ($n_{rep}=5.000$) dos coeficientes das equações específicas por espécie.

Nome popular	Husch		Schumacher & Hall		
	$\bar{\beta}_0$	$\bar{\beta}_1$	$\bar{\beta}_0$	$\bar{\beta}_1$	$\bar{\beta}_2$
Angelim amargoso	-7,56	2,11	-8,17	1,79	0,71
Angelim pedra	-7,47	2,11	-8,39	1,83	0,75
Cambará	-8,09	2,23	-8,66	1,88	0,77
Canelão	-8,23	2,26	-8,58	1,98	0,57
Cedrinho	-6,90	1,96	-8,80	1,97	0,67
Cumarú	-8,42	2,33	-9,14	2,01	0,75
Cupiúba	-8,16	2,22	-8,29	1,78	0,80
Garapeira	-7,00	1,97	-8,17	1,81	0,69
Ipê	-9,95	2,65	-9,57	2,13	0,68
Itaúba	-7,81	2,17	-8,77	2,03	0,58
Jatobá	-8,57	2,35	-8,55	1,82	0,81
Morcegueira	-6,83	1,94	-7,55	1,84	0,42
Peroba Mica	-9,30	2,52	-9,85	2,22	0,69

Fonte: autor (2022).

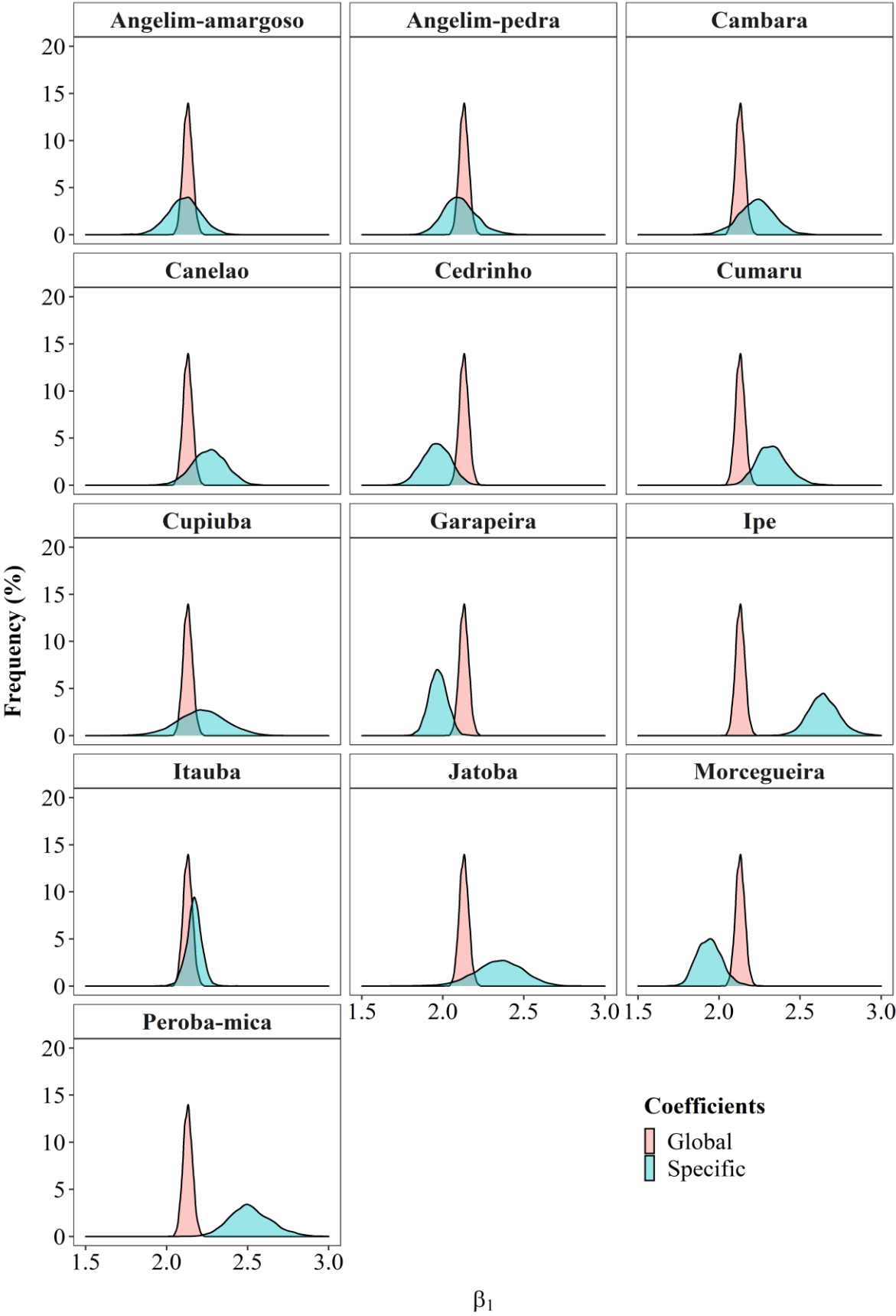
Após a análise de regressão com uso do *bootstrap*, foi possível observar que os valores dos coeficientes angulares individuais (β_1) das espécies obtidos pelo modelo de Husch, de modo geral, variou de 1,50 à 3,33 (Figura 6). Na medida que os números de simulações aumentaram, os coeficientes angulares se aproximaram de uma distribuição normal, para todas as espécies, diferenciando-se uns dos outros apenas pelos intervalos de valores de seus coeficientes (Figura 6). Foi observado que a distribuição *bootstrap* do coeficiente β_1 de Husch, para o conjunto de espécies, itaúba, garapeira, morcegueira, cedrinho, cumarú, angelim pedra, canelão, angelim amargoso, ipê e peroba mica apresentaram amplitudes menores que um (Figura 6). Apenas três espécies apresentaram os valores da amplitude da distribuição *bootstrap* maior que uma unidade (cambará, cupiúba e jatobá). Cabe ressaltar que a média das 5.000 simulações realizadas, apresentou o desvio padrão dos coeficientes angulares individuais e do conjunto de espécies inferiores a 0,12 (Tabela 14 do apêndice).

Em relação aos coeficientes angulares obtidos pelo modelo de Schumacher & Hall, notou-se que o coeficiente (β_1) do conjunto de espécies, concentrou-se com frequência em torno da média (Figura 7). Os valores dos coeficientes β_1 de maneira geral variou de 1,13 a 2,22 (Figura 7). Dos ajustes feitos, observou-se que o conjunto de espécies apresentou a menor

amplitude da distribuição *bootstrap* (0,15). Além disso, verificou-se que os ajustes individuais também apresentaram amplitude da distribuição *bootstrap* inferior a uma unidade, com exceção do ipê (Figura 7). O desvio padrão para os todos coeficientes (β_1) obtidos foram abaixo de 0,40 (Tabela 15 do apêndice). Para os coeficientes angulares β_2 , notou-se que sua variação ocorreu no intervalo de -1,01 a 1,28 (Figura 8). As amplitudes da distribuição *bootstrap* foram menores que um, para o conjunto de espécies e para espécies individualizadas, com exceção da morcegueira. O desvio padrão para os coeficientes angulares destas espécies variaram de 0,02 (conjunto de espécies) a 0,23 (morcegueira), os resultados obtidos demostram a variabilidade desse coeficiente quando utilizado a variável altura comercial (h_m) (Tabela 15 do apêndice).

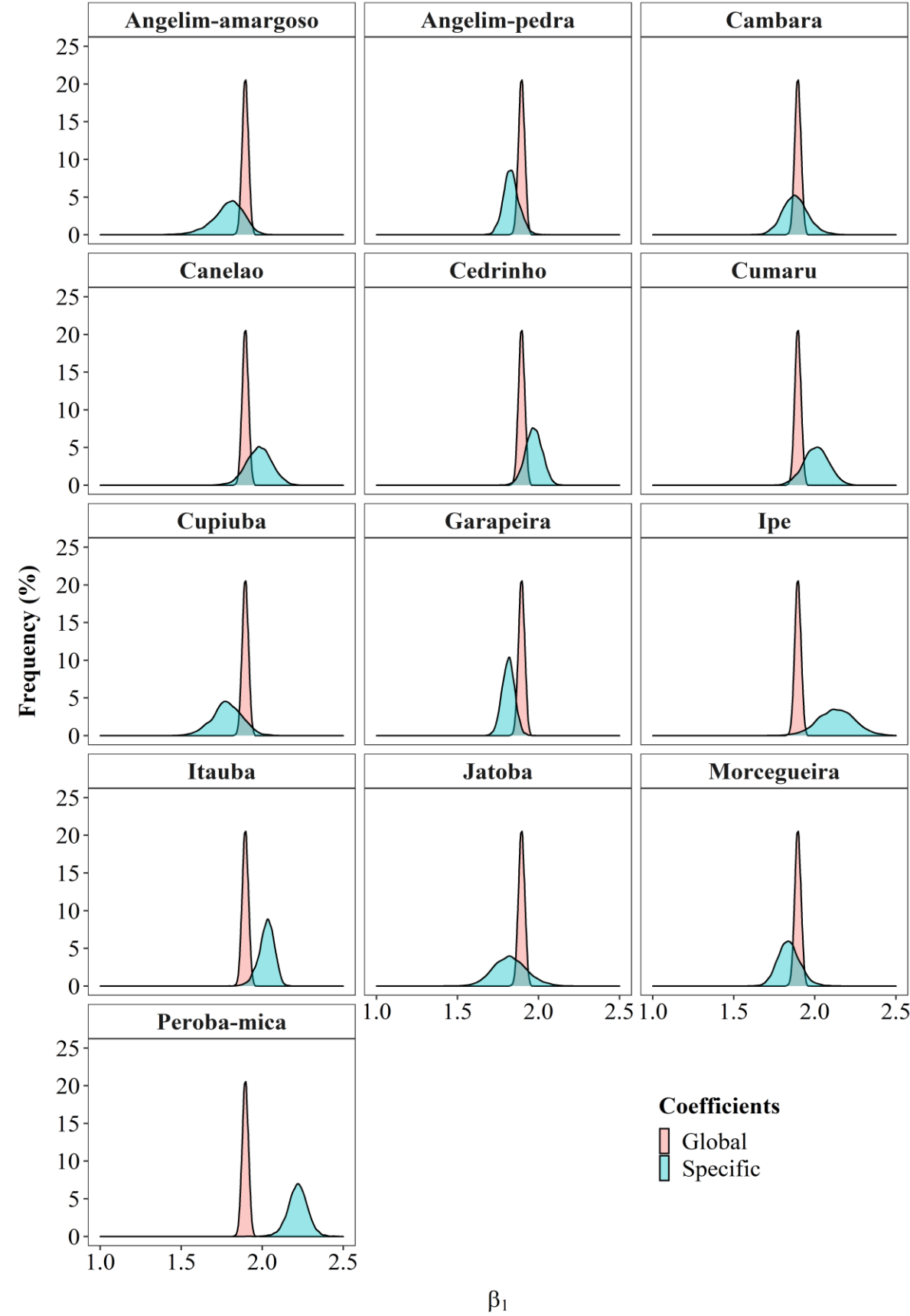
Pela análise gráfica dos coeficientes angulares do modelo de Husch e Schumacher & Hall (Figura 6, 7, 8), foi possível observar que grande parte dos coeficientes obtidos pelos ajustes individuais tiveram seus valores distantes daqueles observados para o ajuste global, com exceção de poucas espécies.

Figura 6- Frequência relativa da distribuição *bootstrap* para os coeficientes β_1 obtidos, utilizando o modelo de Husch, aplicado as espécies e ao conjunto de espécies.



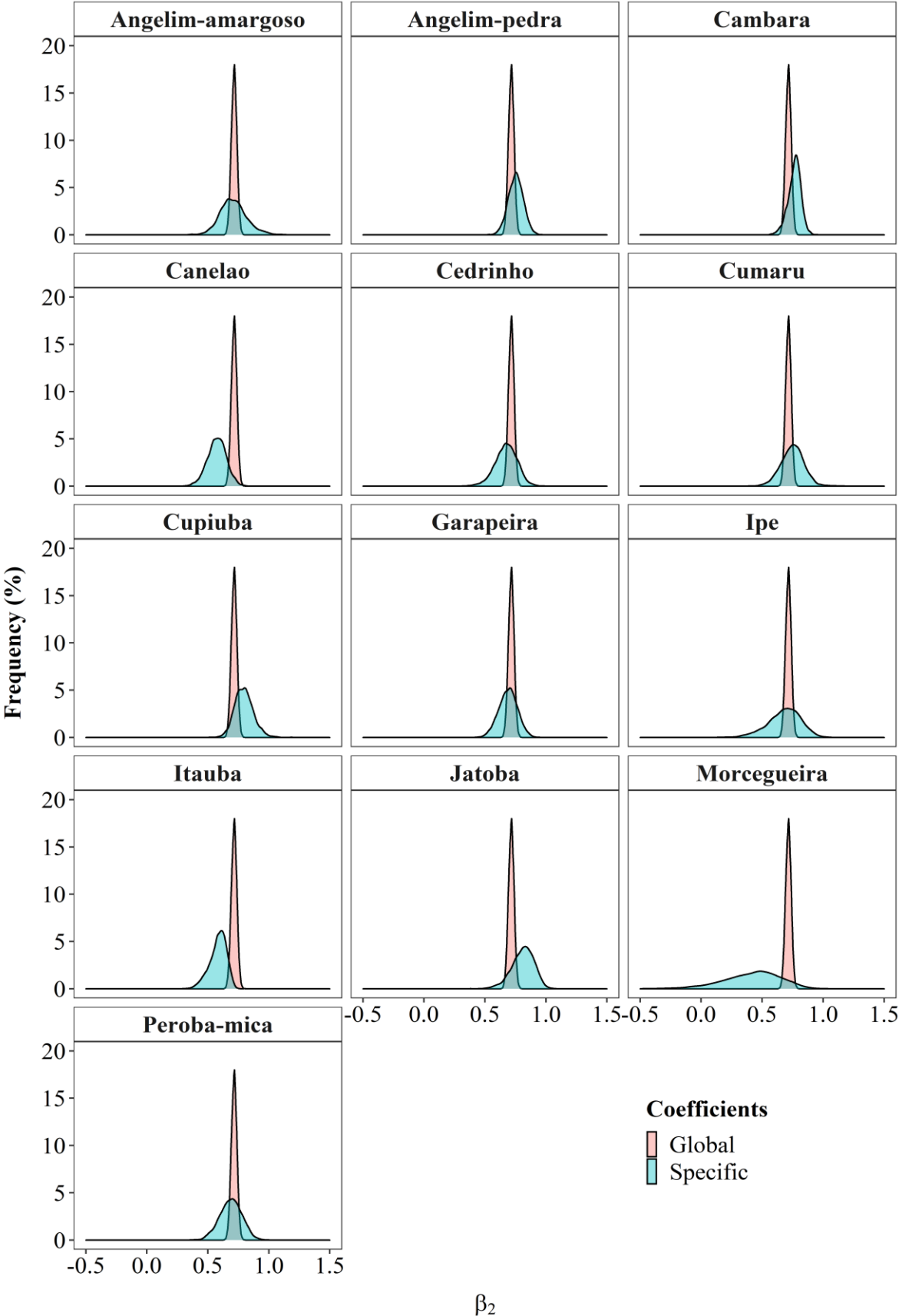
Fonte: autor (2022).

Figura 7- Frequência relativa da distribuição *bootstrap* para os coeficientes β_1 obtidos, utilizando o modelo de Schumacher & Hall, aplicado as espécies e ao conjunto de espécies.



Fonte: autor (2022).

Figura 8- Frequência relativa da distribuição *bootstrap* para os coeficientes β_2 obtidos, utilizando o modelo de Schumacher & Hall, aplicado as espécies e ao conjunto de espécies.



Fonte: autor (2022).

Quando comparado o IC dos coeficientes da equação global, com os coeficientes angulares individuais, notou-se que todos os ajustes específicos apresentaram maior parte dos coeficientes angulares individuais fora do IC (Tabela 2).

Tabela 2- Percentagem de coeficientes angulares (modelo de Husch e Schumacher & Hall) que estão dentro do intervalo de confiança *bootstrap* obtido para o ajuste global (todas as espécies).

Nome popular	Husch	Schumacher & hall	
	β_1^*	β_1^*	β_2^*
Angelim amargoso	43,22%	19,76%	31,86%
Angelim pedra	40,88%	25,10%	45,36%
Cambará	26,26%	36,68%	36,92%
Canelão	20,32%	20,02%	8,56%
Cedrinho	9,36%	20,52%	34,62%
Cumarú	5,90%	12,82%	33,88%
Cupiúba	25,64%	15,88%	29,46%
Garapeira	3,38%	12,52%	41,66%
Ipê	0,00%	2,78%	26,50%
Itaúba	64,20%	3,30%	7,28%
Jatobá	10,44%	21,54%	20,50%
Morcegueira	5,12%	29,24%	7,62%
Peroba Mica	0,14%	0,04%	36,22%

*Valores percentuais são baseados de amostras com 5000 coeficientes.

Fonte: autor (2022).

3.3.3 Medidas de ajuste das equações volumétricas

Quando avaliado a acurácia das estimativas, através do erro médio do volume ($\bar{\varepsilon}_i\%$), determinado para as equações de simples e dupla entrada, aplicadas individualmente e ao conjunto de espécies, foi notado que os ajustes individuais tendem a apresentar menores erros relativos do volume para maioria das espécies selecionadas para esta pesquisa (Tabela 3), exceto para: cedrinho, itaúba, jatobá e morcegueira, quando aplicado o modelo de Husch, e o cambará, cedrinho e cupiúba, para modelo de Schumacher & Hall (Tabela 3). Já em relação a avaliação da precisão entre os ajustes, pelo erro padrão da estimativa percentual ($S_{yx}\%$), foi observado que o volume estimado especificamente, tende a apresentar o menor erro padrão para a maioria das espécies, com exceção do angelim amargoso, cedrinho e morcegueira no modelo de Husch e ipê com o jatobá no modelo de Schumacher & Hall (Tabela 4).

Em relação aos desvios das estimativas, quando comparado as estimativas realizadas pelo modelo ajustado de Husch (Figura 9) e Schumacher & Hall (Figura 10), com o volume observado, foi notado que as equações específicas apresentam menor desvio em relação ao volume observado, para a maioria das espécies, sugerindo que a equação global, apresenta

precisão inferior aquelas ajustada especificamente. Para ambas as equações ajustadas, foi observado a tendência de subestimativa para indivíduos com o volume maior que cinco m³, sendo levemente pronunciada no modelo de Husch.

Tabela 3- Média do erro relativo ($\bar{\varepsilon}_i\%$) obtidos para estimativas específicas por espécie e globais, seguindo o modelo de Husch e Schumacher & Hall.

Espécie	Husch		Schumacher & Hall	
	Por espécie	Global	Por espécie	Global
Angelim amargoso	0,9037	0,9576	0,4345	5,9710
Angelim pedra	1,8947	-6,0973	0,4843	-2,5248
Cambará	1,6635	2,1426	0,7563	0,3698
Canelão	0,7855	3,4683	0,4385	2,6520
Cedrinho	1,1444	0,2374	0,6220	0,1506
Cumarú	1,1941	-5,7963	0,4591	-1,7476
Cupiúba	2,9982	17,2181	1,0847	-0,3019
Grapeira	1,1763	5,6603	0,5237	1,9821
Ipê	1,7146	4,0006	0,7127	3,7287
Itaúba	0,8243	0,2055	0,3286	-0,4575
Jatobá	2,2302	1,6232	0,8394	1,7448
Morcegueira	0,9408	-0,2839	0,9093	4,2177
Peroba Mica	0,6031	-1,1871	0,0896	-5,4855

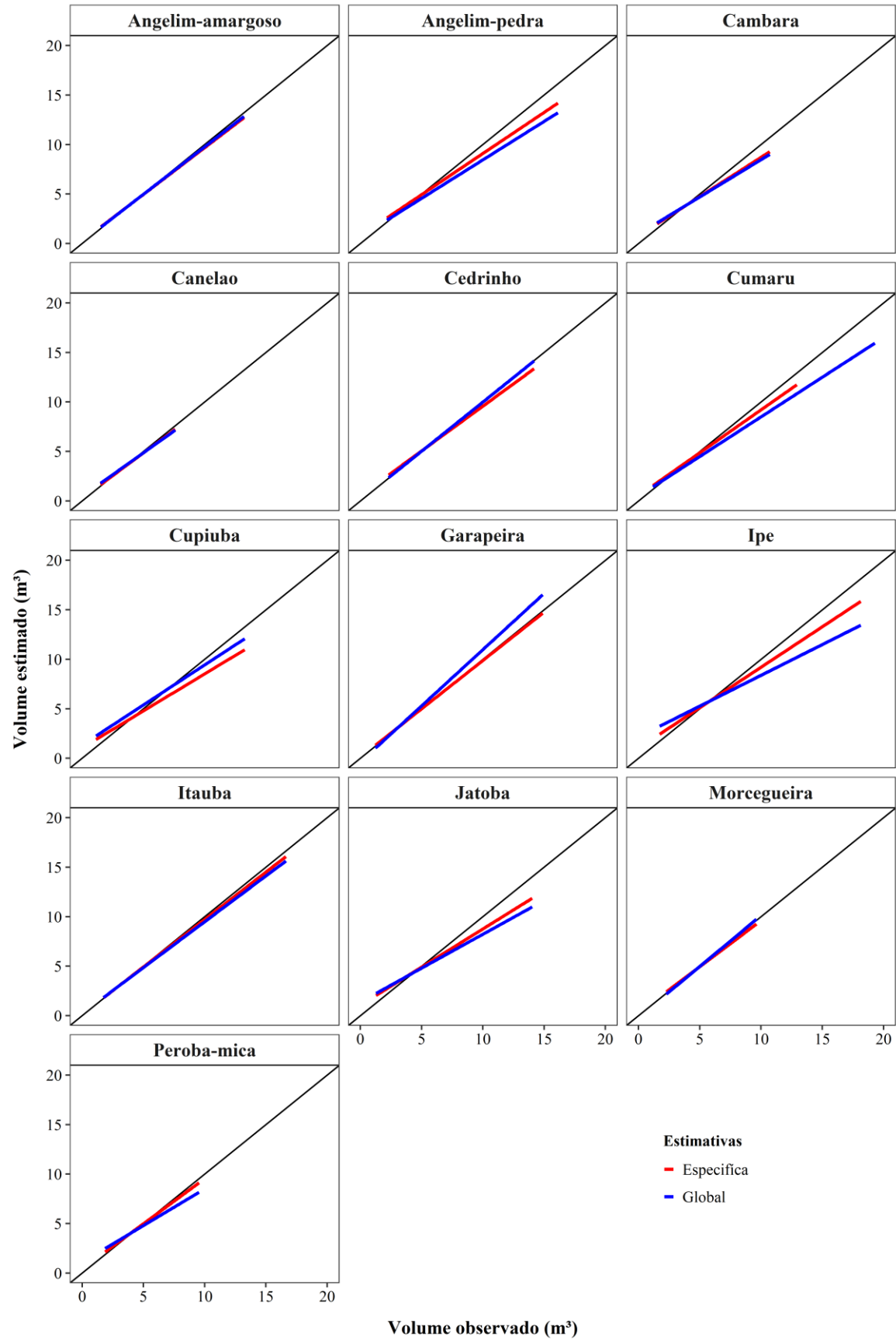
Fonte: autor (2022).

Tabela 4- Erro padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) calculados para estimativas específicas por espécie e globais, seguindo o modelo de Husch e Schumacher & Hall.

Espécie	Husch		Schumacher & Hall	
	Por espécie	Global	Por espécie	Global
Angelim amargoso	4,8614	2,9706	4,3046	38,7471
Angelim pedra	11,2675	82,9498	4,8324	28,9402
Cambará	16,7144	18,0356	6,6152	11,6390
Canelão	4,7892	11,3257	3,9462	14,5924
Cedrinho	6,0647	2,3151	6,6297	17,1525
Cumarú	3,5449	75,6832	8,2464	24,7632
Cupiúba	21,3915	74,5179	5,5379	13,8361
Grapeira	7,6753	64,2299	2,8410	34,3398
Ipê	13,5254	24,0340	12,5450	1,6219
Itaúba	7,2938	16,7405	4,0252	19,8046
Jatobá	16,4680	34,8630	6,7104	1,3125
Morcegueira	4,4279	2,8835	4,1840	25,1333
Peroba Mica	2,5856	24,5017	1,4475	43,2901

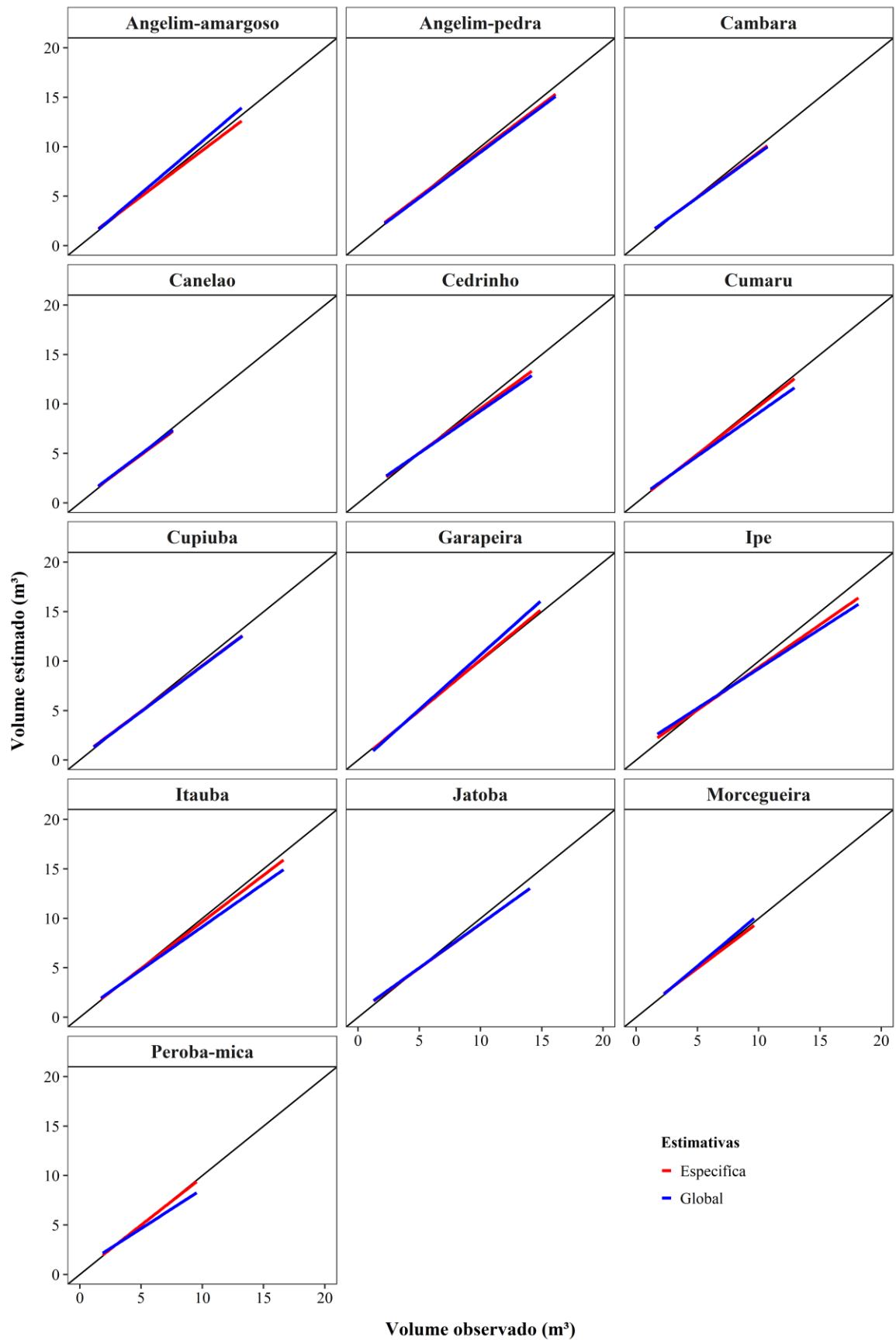
Fonte: autor (2022).

Figura 9- Desvios dos volumes estimados em relação ao volume observado para todas as espécies utilizadas no estudo, calculado com base no modelo de Hush ajustado a nível específico e global.



Fonte: autor (2022).

Figura 10-Desvios dos volumes estimados em relação ao volume observado de todas as espécies utilizadas no estudo, calculado com base no modelo de Schumacher & Hall ajustado a nível específico e global.



Fonte: autor (2022).

3.4 Discussão

3.4.1 Variabilidade das variáveis e dos coeficientes angulares

Foi observado ampla variação do diâmetro, altura e volume, o que pode ser considerado comum para as espécies florestais da Amazônia. Os valores obtidos para essas variáveis são próximos daqueles observados por Cruz et al., (2019) e Thaines et al., (2010) que trabalharam com ajustes de modelos volumétricos de espécies florestais submetidas ao regime de manejo na região amazônica. A ampla variação dessas variáveis, pode estar relacionada a fatores como: o ambiente, a idade do indivíduo, a forma de vida e ausência de práticas silviculturais (CYSNEIROS et al., 2017; JARDIM; SERRÃO; NEMER, 2007; REGO et al., 2019). Além disso, entre os motivos que podem explicar a variação das principais variáveis coletadas no inventário estão as irregularidades do fuste, como: a presença de sapopemas, reentrâncias no tronco, nós, bifurcações, entre outros fatores inerentes a baixa capacidade produtiva do sítio florestal (FIGUEIREDO FILHO et al., 2014; HESS et al., 2014; LANSSANOVA et al., 2013).

Diante dos fatores mencionados anteriormente, é comum observar a baixa correlação entre as variáveis amostradas, o que poderia ser uma limitação na utilização dessas variáveis em modelos alométricos, sobretudo por reduzir a precisão dessas estimativas (SAQUETTA et al., 2017). Contudo, a baixa correlação entre variáveis preditoras reduz o efeito de multicolinearidade, o que permite determinar com maior precisão o erro padrão da estimativa, variável indispensável para seleção de modelos de regressão de múltiplas entradas (GIMENEZ et al., 2015).

3.4.2 Coeficientes dos modelos específicos

Em relação aos coeficientes médios dos modelos volumétricos obtidos após as simulações *bootstrap*, foi observado que os valores encontrados são diferentes daqueles observados por Silva et al., (2020), que também vem trabalhando com ajustes de modelos volumétricos de espécies amazônicas, utilizando a mesma base de dados deste estudo. Apesar disso, a diferença entre os valores observados pode estar diretamente relacionada a metodologia utilizada nos ajustes das equações, sendo seus modelos ajustados por meio da regressão linear clássica. Além da metodologia, o número de simulações realizadas ($n=5.000$), também pode ter influenciado nos resultados, uma vez que as combinações tendem a contornar a variação existente dentro da amostra e os valores dos parâmetros amostrais obtidos tendem a se aproximar daquele esperado para o parâmetro populacional.

Diante da comparação entre os coeficientes angulares, pode-se assumir que grande parte das equações específicas apresenta acuracidade do volume superior, principalmente quando

comparada com aquelas ajustadas a um conjunto de espécies, ou seja, os ajustes individuais corroboram para a realização de estimativas volumétricas mais precisas.

3.4.3 Parâmetros de ajuste

Por meio dos parâmetros de ajuste utilizados nesta pesquisa, obtidos após a aplicação do método *bootstrap* na análise de regressão, foi possível notar que independente do modelo adotado (Husch ou Schumacher & Hall) o erro médio ($\bar{\varepsilon}_i\%$) foi baixo, mesmo para os modelos globais. Isso demonstra que, através da união dessas duas técnicas, é possível obter resultados não tendenciosos, parâmetro esse que serve de indicador para a acurácia das estimativas realizadas. Além disso, através da análise do erro padrão da estimativa em percentual ($S_{yx}\%$) específico, também foi possível constatar que os valores encontrados nesta pesquisa foram menores do que aqueles observados por Biazatti et al., (2020), Cysneiros et al., (2017), que também elaboram estudos relacionados a ajuste de equações específicas e genéricas, reforçando a confiabilidade dos resultados obtidos por essa pesquisa.

Por meio dos desvios das estimativas, também é possível observar que as equações ajustadas individualmente estimam o volume do fuste com maior acurácia. Mas não se pode deixar de mencionar a ocorrência de subestimativas volumétricas para espécies de grande porte, principalmente quando empregado o modelo de Husch. Fernandes et al., (2017), trabalhando com ajuste de modelos volumétricos para duas espécies amazônicas, notou-se leve tendência em subestimar essa variável, porém, afetando levemente sua precisão. De acordo com Rolim et al., (2006), a ocorrência de subestimativas em modelos volumétricos pode estar relacionada ao número de variável preditora existente no modelo, sugerido que seu uso deve ser feito de maneira cautelosa, sobretudo em espécies com alta heterogeneidade.

Entretanto, apesar das ocorrências de subestimativas dos modelos testados, ainda sim é recomendado seu uso para determinar o estoque madeireiro de várias espécies florestais da Amazônia exploradas comercialmente, haja vista que outros parâmetros de ajustamentos também foram menores em relação aos observados na literatura.

Diante do exposto, é possível afirmar que a definição correta do modelo com base nos parâmetros de ajuste pode melhorar a predição da resposta e, consequentemente, a precisão das estimativas. Com base nisso, as equações específicas obtidas por este estudo tendem a realizar predições volumétricas com elevada acuracidade e boa precisão. Segundo Miranda et al. (2014), a precisão das equações ajustadas individualmente ocorre, principalmente, porque os coeficientes são mais sensíveis à variação da população amostrada o que, consequentemente, eleva sua acurácia. De acordo com Barros e Silva Junior (2009), o uso de equações ajustadas,

permite utilizar os recursos florestais disponíveis de maneira ainda mais racional, contribuindo com desenvolvimento ambiental e econômico da Amazônia, e isso justifica a necessidade de constante aperfeiçoamento dos métodos de mensuração e quantificação florestal.

3.4.4 Manejo específico

É possível compreender que o manejo florestal por espécie é uma alternativa que possibilita a exploração racional e equilibrada dos recursos florestais, isso porque a adoção de práticas de manejo específico contribui para uma rápida recuperação florestal, tanto a curto quanto a longo prazo (LOPEZ; VILLALBA; BRAVO, 2013, SANTOS et al., 2018;). Além disso, o manejo específico é indispensável no desenvolvimento de novos modelos de manejo, pois leva em consideração as particularidades das espécies e toda sua dinâmica e isso implica na melhoria das práticas comumente usadas, modernizando o manejo florestal sustentável (COUTINHO et al., 2017; LIMA; LEÃO, 2013; SANTOS et al., 2017; SCHÖNGART, 2008).

Ademais, as equações ajustadas especificamente permitem uma maior acurácia e precisão, como pode ser observado nos resultados encontrados, tornando-se a forma mais econômica e adequada de se estimar com precisão o estoque florestal, permitindo o aproveitamento e valorização dos recursos florestais disponíveis (BARROS; SILVA JÚNIOR, 2009; BIAZATTI et al., 2020; EBLING et al., 2013).

Entretanto, a maioria dos responsáveis pelo manejo florestal ainda utiliza como justificativa para a utilização de uma equação única à todas as espécies, os custos do inventário e a escassez de mão-de-obra qualificada. Diante disso e dos resultados encontrados nesta pesquisa, fica evidente que a utilização do método *bootstrap* na análise de regressão auxilia no desenvolvimento de equações quando a amostra é pequena e isso facilita o desenvolvimento de equações por espécie.

3.5 Conclusão

As equações globais ajustadas (Husch e Schumacher & Hall) foram, de modo geral, menos acuradas e precisas que as equações específicas. Isso significa que o uso de equações globais, e até mesmo um fator de forma genérico para várias espécies, afeta a qualidade das estimativas do volume de fuste de espécies amazônicas. Assim sendo, este trabalho alinha-se com as pesquisas que sugerem o manejo específico por espécie é uma necessidade ao manejo florestal na Amazônia.

3.6 Referências

- ALMEIDA, B. R. S.; CRUZ, G. S.; NICOLETTI, M. F.; GAMA, J. R. V.; LIMA, B. A.; PECH, T. M. Eficiência de equações volumétricas para *Couratari guianensis* Aubl. em diferentes cenários na Floresta Nacional do Tapajós. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 130, p. e3503, 2021. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n130.11>
- ALMEIDA, M. R. D.; SILVA, J. N. M.; BARROS, P. L. C.; ALMEIDA, E. S.; SILVA, D. A. S.; SOUSA, C. S. C. Ajuste e seleção de modelos volumétricos de espécies comerciais no município de Ipixuna (Pa). **Rev. Agro. Amb.**, v. 13, n.1, p. 259-278, jan./mar., 2020. DOI:10.17765/2176-9168.2020v13n1p259-278
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941- 2948/2013/0507
- AZEVEDO, G. B.; SOUSA, G. T. O.; BARRETO, P. A. B.; CONCEIÇÃO JÚNIOR, V. Estimativas volumétricas em povoamentos de eucalipto sob regime de alto fuste e talhadia no sudoeste da Bahia. **Pesq. flor. Bras.**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 309-318, out./dez., 2011. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.68.309
- BARROS, P. L. C.; SILVA JUNIOR, A. T. Equação de volume para árvores de uma floresta tropical densa no município de Anapú, oeste do estado do Pará, Amazônia oriental. **Rev. ciênc. agrár.**, Belém, n. 51, p.115-126, jan./jun., 2009
- BLAZATTI, S. C.; SCCOTI, M. S. V.; BRITO JÚNIOR, J. F.; MÔRA, R.; CARDOZO, G. H. Eficiência de métodos para estimativa volumétrica de espécies nativas na Amazônia. Ocidental. **Nativa**, Sinop, v. 8, n. 2, p. 253-259, mar./abr., 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v8i2.8081>
- CHERNICK, M. R. **Bootstrap Methods: a guide practitioners e researchers**. 2. ed, Newtown: Wiley interscience, 2008, 369 p.
- CHERNICK, M. R.; LABUDDE, R. A. **An introduction to bootstrap methods with applications to R.**, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- COUTINHO, V. M.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, C. R.; RODRIGUES, A. L.; SANQUETTA, M. N. I. Modelagem do crescimento de *Cryptomeria japonica* por análise de tronco parcial. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 37, n. 90, p. 93-98, abr./jun. 2017. DOI: 10.4336/2017.pfb.37.90.1371
- CRUZ, G. S.; RIBEIRO, R. B. S.; GAMA, J. R. V.; ALMEIDA, B. R. S.; XIMENES, L. C.; GOMES, K. M. A.; BEZERRA, T. G. Ajuste e avaliação na estimativa volumétrica para *Lecythis lurida* (Miers) S.A. Mori em uma área de manejo florestal. **Adv. For. Sci.**, Cuiabá, v.6, n.1, p.549-554, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.34062/afs.v6i1.7247>
- 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. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 45, n. 114, p. 295-304, jun., 2017. DOI: dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n114.06

EBLING, A. A.; ABRÃO, S. F.; PELISSARI, A. L.; BAMBERG, R.; BEHLING, A. Análise de agrupamento aplicado no crescimento diamétrico de florestas. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 16; p. 125-131, 2013.

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. **An Introduction to the bootstrap**. Chapman and Hall, New York, 1983.

FERNANDES, A. M. V.; GAMA, J. R. V.; RODE, R.; MELO, L. O. Equações volumétricas para *Carapa guianensis* Aubl. e *Swietenia macrophylla* Kingem sistema silvipastoril na Amazônia. **Nativa**, Sinop, v. 5, n. 1, p.73-77, jan./fev. 2017. DOI: 10.5935/2318-7670.v05n01a12

FERREIRA, R. L. A.; CERQUEIRA, R. M.; CARDOSO JUNIOR, R. C. Análise da identificação Botânica em inventários florestais de planos de manejo sustentáveis no oeste paraense. **Nature and Conservation**, v. 13, n. 3, p. 136-145, 2020. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2020.003.0014>

FIGUEIREDO FILHO, A.; KOHLER, S. V.; FELDE, J. L.; DIAS, A. N. Dinâmica do afilamento do tronco e da produção de madeira em plantios de *Araucaria angustifolia*. **CERNE**, v. 20 n. 4, p. 595-603, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/01047760201420041386>

GAMA, J. R. V.; SOUZA, A. L.; VIEIRA, D. S.; LEITE, H. G. Equações de volume para uma floresta ombrófila aberta, município de Codó, Estado do Maranhão. **Rev. Bras. Cienc. Agrar.**, Recife, v.12, n.4, p.535-542, 2017. DOI: 10.5039/agraria.v12i4a5489

GIMENEZ, B. O.; DANIELLI, F. E.; OLIVEIRA, C. K. A.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Equações volumétricas para espécies comerciais madeireiras do sul do estado de Roraima. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 43, n. 106, p. 291-301, jun., 2015.

GOMES, K. M. A.; SILVA-RIBEIRO, R. B.; GAMA, J. R. V.; ANDRADE, D. F. C. Eficiência na estimativa volumétrica de madeira na Floresta Nacional do Tapajós. **Nativa**, Sinop, v. 6, n. 2, p. 170-176, mar./abr., 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v6i2.5237>

HESS, A. F.; BRAZ, E. M.; THAINES, F.; MATTOS, P. P. Ajuste de relação hipsométrica para espécies da Floresta Amazônica. **Ambiência**, Guarapuava-PR, v. 10 n. 1 p. 21-29, jan./abr., 2014. DOI:10.5935/ambiencia.2014.01.02

JARDIM, F. C. S.; SERRÃO, D. R.; NEMER, T. C. Efeito de diferentes tamanhos de clareiras, sobre o crescimento e a mortalidade de espécies arbóreas, em Moju-PA. **Acta Amazônica**, v. 37, n. 1, p. 37-48, 2007

LANSSANOVA, L. R.; SILVA, F. A.; SCHONS, C. T.; PEREIRA, A. C. S. Comparação entre diferentes métodos para estimativa volumétrica de espécies comerciais da Amazônia. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 3, n. 1, p. 109-115, 2018. DOI: <dx.doi.org/10.5380/Biofix.v3i1.57489>

LANSSANOVA, L.R.; UBIALLI, J. A.; ARCE, J. E.; PELISSARI, A. L.; FAVALESSA, C. M.C.; DRESCHER, R. Avaliação de funções de afilamento para a estimativa de diâmetro de espécies florestais comerciais do Bioma amazônico mato-grossense. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 43, n. 2, p. 215-224, abr. / jun., 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v43i2.26518>

LEAO, F. M.; MIRANDA, I. S.; SANTOS, G. G. A.; EMMERT, F.; NASCIMENTO, R. G. M. COMPARISON OF Different methods of measuring tree volumes in the municipality of

Anapú, Pará, Brazil. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 50, n. 3, p. 1457 - 1466, jul/set, 2020. DOI: 10.5380/rf.v50 i3. 61393

LIMA, R. B.; RUTISHAUSER, E.; SILVA, J. A. A.; GUEDES, M. C.; HERAULT, B.; OLIVEIRA, C. P.; APARÍCIO, P. S.; SOTTA, E. D.; SILVA, D. A. S.; FERREIRA, R. L. C. Accurate estimation of commercial volume in tropical forests. **For. Sci.**, v. 67, n. 1, p. 14-21, 2021. DOI:10.1093/forsci/fxaa032

LIMA, J. P. C.; LEÃO, J. R. A. Dinâmica de crescimento e distribuição diamétrica de fragmentos de florestas nativa e plantada na Amazônia sul ocidental. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 1, p.70-79, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/foram.2012.065>

LÓPEZ, L.; VILLALBA, R.; BRAVO, F. Cumulative diameter growth and biological rotation age for seven tree species in the Cerrado biogeographical province of Bolivia. **Forest Ecology and Management**, v. 292, p. 49-55, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.011>

MIRANDA, D. L. C.; PARO, B. A. V.; COSTA, G. R. Estimativa do volume em árvores de *Hymenaea coubaril* L. e *Trattinnickia burserifolia* Mart. no norte de Mato Grosso. **Nativa**, Sinop, v. 2, n. 4, p. 219-223, out./dez., 2014. DOI: 10.14583/2318-7670.v02n04a06

MOTA, C. G.; PONTE, M. X.; PAULETTO, D. Modelos alométricos para estimativa da Biomassa de fustes de árvores em floresta ombrófila densa no município de Portel no Estado do Pará-Brasil. **Rev. Espacios**, v. 39, n. 6, p. 17, 2018.

OLIVEIRA, M. F.; MATTOS, P. P.; GARRASTAZU, M. C.; BRAZ, E. M.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ROSOT, N. C. Análise da estrutura horizontal por densidade de Kernel como subsídio ao manejo florestal na Amazônia. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 41, e202002098, p. 1-14, 2021. DOI: 10.4336/2021.pfb.41e202002098

OLIVEIRA, M. M.; HIGUCHI, N.; CELES, C. H.; HIGUCHI, F. G. Tamanho e formas de parcelas para inventários florestais de espécies arbóreas na Amazônia central. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 645-653, jul.-set., 2014.

PUTH, M.; NEUHAUSER, M.; RUXTON, G. D. On the variety of methods for calculating confidence intervals By Bootstrapping. **Journal of Animal Ecology**, v. 84, p. 892-897, 2015. DOI: 10.1111/1365-2656.12382

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Áustria. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.2022.

RAMOS, H. C.; DALLACORT, R.; NEVES, S. M. A. S.; DALCHIAVON, F. C.; SANTI, A.; VIEIRA, F. F. Precipitação e temperatura do ar para o estado de Mato Grosso utilizando krigagem ordinária. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, jan/jul., 2017. DOI: 10.5380/aBclima.v20i0.43762

REGO, A. M.; SILVA, M. D. M.; LOPES SOBRINHO, O. P.; FERREIRA, J. C. S. Modelos de equações volumétricas para um povoamento de eucalipto situado em Codó (MA). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.10, n.4, p.1-8, 2019. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.004.0001>

ROLIM, S. G.; COUTO, H. T. Z.; JESUS, R. M.; FRANÇA, J. T. Modelos volumétricos para a Floresta Nacional do Tapirapé-Aquirí, Serra dos Carajás (PA). **Acta Amazonia**, v. 36, n. 1, p. 107-114, 2006.

SANQUETTA, C. R.; SANQUETTA, M. N. I.; BASTOS, A.; QUEIROZ, A.; DALLA CORTE, A. P. Estimativa da altura e do volume em povoamentos jovens de restauração florestal em Rondônia. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 2 n. 2 p. 23-31, 2017. DOI: [dx.doi.org/10.5380/biofix.v2i2.54124](https://doi.org/10.5380/biofix.v2i2.54124)

SANTOS, A. C. A.; SILVA, S.; LEITE, H. G.; CRUZ, J. P. Influência da variabilidade edafoclimática no crescimento de clones de eucalipto no Nordeste baiano. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 37, n. 91, p. 259-268, jul./set. 2017. DOI: [10.4336/2017.pfb.37.91.1207](https://doi.org/10.4336/2017.pfb.37.91.1207)

SANTOS, M. F.; COSTA, D. L.; MELO, L. O.; GAMA, J. R. V. Estrutura, distribuição espacial e dinâmica florestal de duas espécies nativas após extração manejada de madeira na Flona do Tapajós. **Adv. For. Sci.**, Cuiabá, v.5, n.2, p.351-356, 2018. DOI: <https://doi.org/10.34062/afs.v5i2.5921>

SCHÖNGART, J. Growth-Oriented Logging (GOL): A new concept towards sustainable forest management in Central Amazonian várzea floodplains. **Forest Ecology and Management**, n. 256, p. 46-58, 2008. DOI: [10.1016/j.foreco.2008.03.037](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.03.037)

SILVA, L. B. D.; MORAIS, V. A.; CAETANO, M. G.; BERNARDES, L. F. G. M. Equações para estimativa volumétrica de espécies arbóreas da Amazônia. **Rev. Ciênc. Agroamb.** v. 18, n. 1, 2020. DOI: [10.30681/rcaa.v18i1.4046](https://doi.org/10.30681/rcaa.v18i1.4046)

THAINES, F.; BRAZ, E. M.; MATTOS, P. P.; THAINES, A. A. R. Equações para a estimativa de volume de madeira para a região da Bacia do Rio Ituxi, Lábrea, AM. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 64, p. 283-289, 2010. DOI: [10.4336/2010.pfb.30.64.283](https://doi.org/10.4336/2010.pfb.30.64.283)

TONINI, H.; BORGES, R. A. Equação de volume para espécies comerciais em Floresta Ombrófila Densa no sul de Roraima. **Pesq. flor. Bras.**, Colombo, v. 35, n. 82, p. 111-117, abr./jun., 2015. DOI: [10.4336/2015.pfb.35.82.738](https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.82.738)

VATRAZ, S.; CARVALHO, J. O. P.; SILVA, J. N. M.; CASTRO, T. C. Efeito da exploração de impacto reduzido na dinâmica do crescimento de uma floresta natural. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 44, n. 109, p. 261-271, mar., 2016. DOI: [dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n109.25](https://doi.org/10.18671/scifor.v44n109.25)

4 DESEMPENHO DE EQUAÇÕES VOLUMÉTRICAS ESPECÍFICA E GENÉRICA AJUSTADAS POR DOIS DIFERENTES MÉTODOS

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é comparar o desempenho de equações volumétricas, ajustadas com e sem *bootstrap*. Os dados foram coletados em áreas de manejo florestal no estado de Mato Grosso, onde 789 indivíduos de 13 espécies florestais foram amostrados. O modelo de Schumacher-Hall foi ajustado para 14 conjuntos de dados, sendo um conjunto incluindo todas as espécies, e mais treze conjuntos correspondentes a cada espécie. O método *bootstrap* foi aplicado na análise de regressão ($n_{rep}=5.000$), gerando 5.000 vetores de coeficientes para cada base de ajuste (individual e genérico), do qual determinou-se o intervalo de confiança *bootstrap* (IC, $\alpha=0,05$). O modelo de regressão linear clássico, foi ajustado pelo Método dos Mínimos Quadrados Ordinários. Comparou-se os coeficientes angulares da regressão clássica, com IC determinado após a aplicação do *bootstrap*, pelo critério: se os coeficientes angulares (regressão clássica) estiverem dentro do IC dos coeficientes da equação específica e global (regressão *bootstrap*), então ambas equações não diferem estatisticamente. Também foi determinado a acurácia, precisão e os desvios das estimativas para avaliar os ajustes. Foi notado que ambos os métodos são estatisticamente iguais. Diante disso, conclui-se que o uso do método *bootstrap* no ajuste de modelos não proporcionam ganho em precisão e acurácia nas estimativas volumétricas, em relação ao modelo clássico de regressão linear, pois as duas abordagens não diferem estatisticamente.

Palavras Chave: Regressão clássica; *Bootstrap*; Manejo específico por espécie; Precisão.

PERFORMANCE OF SPECIFIC AND GENERIC VOLUME EQUATIONS FITTED THROUGH TWO DIFFERENT METHODS

ABSTRACT

The aim of this research was to compare the performance of wood volume equations, fitted with and without bootstrap. Data were collected in forest management areas in the state of Mato Grosso, where 789 individuals of 13 forest species were sampled. The Schumacher-Hall model was fitted to 14 datasets, one including all species, plus thirteen datasets corresponding to each species. The bootstrap method was applied in the regression analysis ($n_{rep}=5,000$), generating 5,000 coefficient vectors for each calibration dataset (individual and generic), by which the bootstrap confidence interval (CI, $\alpha=0.05$) was determined. The classical linear regression model was adjusted by the Ordinary Least Squares Method. The angular coefficients of the classical regression were compared to the CI determined after the bootstrap application, obeying the criterion: if the angular coefficients obtained with classical regression fitted into the CI of the coefficients obtained with the regression via bootstrap, then both equations are not differ statistically. The accuracy, precision and deviations of the estimates were also determined to evaluate the model fittings. It was noted that both methods are statistically equal. It was concluded that the use of the bootstrap method in the adjustment of models does not provide a gain in precision and accuracy in the wood volume estimates, in relation to the classical linear regression model, since the two approaches do not differ statistically.

Keywords: Classical regression; Bootstrap; Species-specific management; Precision

4.1 Introdução

Em áreas de manejo florestal, o volume torna-se o produto de maior interesse dentro do setor florestal, sendo que através dessa variável é possível quantificar o estoque madeireiro disponível, indicando o seu potencial produtivo e econômico (AZEVEDO et al., 2011; GOMES et al., 2018, THOMAS et al., 2006). Além disso, a quantificação do estoque florestal, possibilita a realização de um planejamento de exploração adequado, estimulando o uso racional e econômico dos recursos florestais madeireiro e não madeireiro (FERREIRA et al., 2020; LASSANOVA et al., 2018). Diante disso, grande parte das pesquisas florestais desenvolvidas, tem entre seus principais objetivos, a criação de novas metodologias ou aperfeiçoamento das técnicas empregadas, sobretudo aquelas relacionadas a estimativa volumétrica (BIAZATTI et al., 2020; MOTA; PONTE; PAULETO, 2018; OLIVEIRA et al., 2014).

As técnicas atualmente utilizadas para quantificar o volume de madeira disponível, são bastantes generalista, desconsiderando aspectos intrínsecos as espécies exploradas (e.g., as suas funções morfológicas, aspectos fisiológicos, ecológico entre outros), e esses fatores quando deixados de lado, podem reduzir a eficiência das estimativas (CYSNEIROS et al., 2017; LASSANOVA et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2021; VATRAZ et al., 2016). Porém, se realizado de maneira mais homogênea entre as espécies (i.e., individualização das espécies, ou por meio do agrupamento de indivíduos com características semelhantes) as estimativas tendem a ser mais precisas. No entanto, a falta de mão de obra qualificada, o tempo necessário para a coletas de amostras específicas e os custos para execução da atividade, impossibilitam sua realização (LEÃO et al., 2020; SILVA et al., 2020). Diante disso, a busca por ferramentas alternativas é de fundamental importância para o manejo florestal sustentável, sobretudo aquelas que possa facilitar a realização de estimativas, de elevada confiabilidade e com o menor custo operacional possível (THAINES et al., 2010; TONINI; BORGES, 2015).

Dentre os meios alternativos, e que podem servir de suporte as análises florestais, podemos apontar o método de reamostragem *bootstrap*, em que seu princípio está preconizado na técnica de reamostragem realizada computacionalmente (CHERNICK; LABUDDE, 2011; CHERNICK, 2008). Entre suas principais vantagens estão: a utilização de pequenas amostras; simplicidade da análise; dispensa os pressupostos exigidos pela estatística clássica para a determinação dos parâmetros de interesse; fornece estimativas mais confiáveis, pois considera a amostra como a população de origem (PUTH; NEUHAÜSER; RUXTON, 2015).

Nesse sentido, pesquisas relacionadas a aplicação de métodos alternativos com o objetivo de aprimorar as análises dos dados provenientes de áreas de manejo florestal, podem

contribuir diretamente para estimativas mais confiáveis (CRUZ et al., 2019; CYSNEIROS et al., 2017). Entretanto, o uso de novas ferramentas ou metodologias, deve ser feito com bastante cautela, necessitando de ampla testagem e comparação com os tradicionais meios utilizados, a fim de conhecer sua eficiência, precisão e praticidade (ANDRADE, 2017).

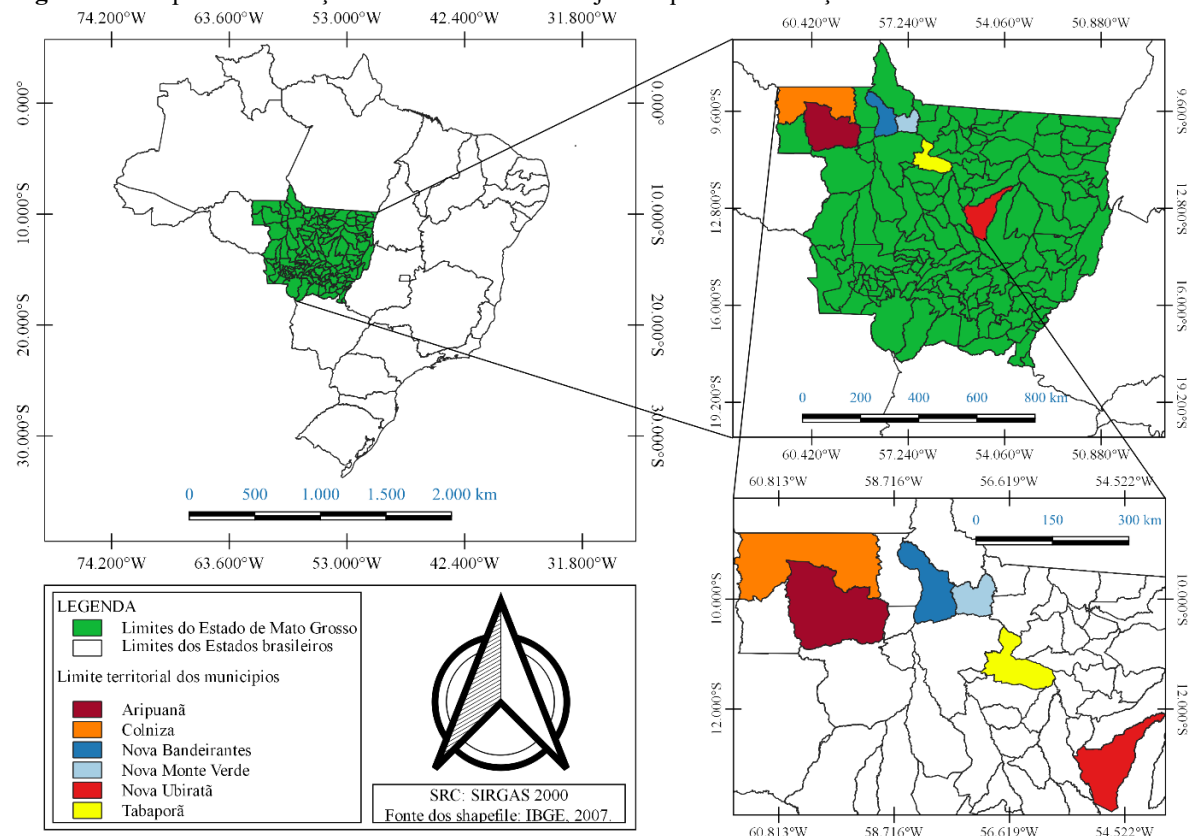
Diante disso, este trabalho visa responder a seguinte questão científica: existe diferença entre modelos genéricos e específicos, ajustados com e sem a aplicação do método *bootstrap*? Para isso a seguinte hipótese será testada: equações volumétricas específicas e genéricas ajustadas com *bootstrap* estimam com maior acurácia e precisão do que aquelas ajustadas pelo método clássico. O objetivo é comparar o desempenho de equações volumétricas, ajustadas com e sem *bootstrap*.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Área do estudo

Os dados desta pesquisa foram coletados em áreas de manejo florestal sustentável realizadas no estado de Mato Grosso. As unidades de manejos estão distribuídas em seis municípios do estado, sendo eles: Aripuanã, Colniza, Nova Bandeirantes, Nova Monte Verde, Nova Uiratã e Tabaporã (Figura 11).

Figura 11- Mapa de localização das unidades de manejo em que as informações foram coletadas.



Fonte: Autor (2022)

De acordo com a classificação climática de Köppen, o estado de Mato Grosso apresenta basicamente dois tipos de clima, distribuídos em duas zonas. São eles: (a) clima tropical úmido ou sub-úmido (Am) típico da parte norte do estado, e (b) clima tropical, com inverno seco (Aw), encontrado na região central do estado, assim como também no Pantanal Mato-Grossense (ALVARES et al., 2013). A precipitação média anual do estado varia de 1.200 a 2.200 mm, sendo que a maior taxa pluviométrica é atingida nos meses compreendido entre outubro a abril. O período de menor intensidade pluviométrica é observada no período que vai de maio a setembro. A temperatura média anual do estado varia de 22 a 27,6 °C, sendo que as menores temperaturas estão nas regiões próximas ao sudeste do estado (RAMOS et al., 2017).

4.2.2 Dados

Treze espécies florestais de alto valor comercial na Amazônia foram selecionadas para este estudo: (1) *Vatairea macrocarpa* (Benth.) Ducke (angelim amargoso); (2) *Hymenolobium excelsum* Ducke (angelim pedra); (3) *Qualea albiflora* Warm. (cambará); (4) *Ocotea corymbosa* (Meissn.) Mez (canelão); (5) *Erisma uncinatum* Warm. (cedrinho); (6) *Dipteryx odorata* (Aubl.) Forsyth f. (cumarú); (7) *Goupia glabra* Aubl (cupiúba); (8) *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J. F. Macbr (garapeira); (9) *Handroanthus* spp (ipê); (10) *Mezilaurus itauba* (Meisn.) Taub. ex Mez. (itaúba); (11) *Hymenaea courbaril* L.(jatobá); (12) *Simarouba versicolor* A.St.-Hil. (morcegueira); e (13) *Aspidosperma macrocarpon* Mart. & Zucc. (peroba mica).

Foram amostrados um total de 789 indivíduos com diâmetro à altura de 1,30 m acima do solo (D) ≥ 45 cm. Além do D , mediu-se também a altura comercial (h_m), que corresponde à altura do fuste até o início da primeira bifurcação. Após a seleção e mensuração dos fustes, determinou-se o volume comercial de madeira com casca (v) utilizando o método de cubagem de Smalian (Eq. 6).

$$v = \sum_i \left(\frac{a_{(i)} + a_{(i+1)}}{2} \right) l_i \quad (6)$$

Em que:

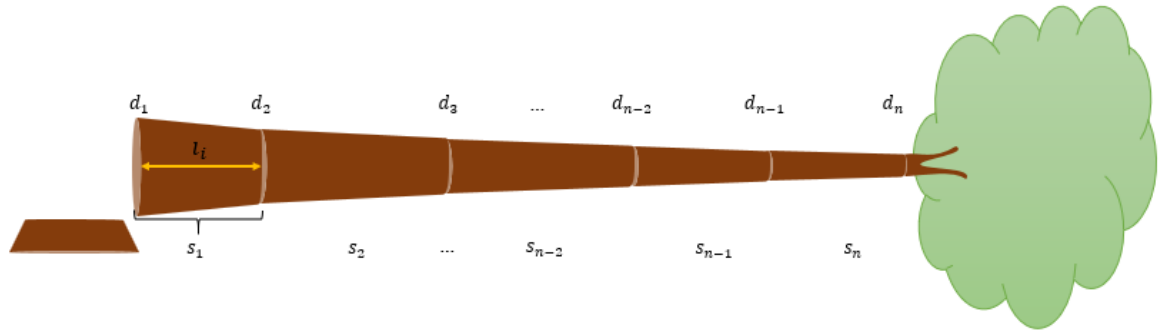
$a_{(i)}$ e $a_{(i+1)}$: área transversal das extremidades da secção s_i ;

l_i : comprimento da secção s_i .

v : volume comercial observado, em m³;

Os fustes foram medidos em secções menores (Figura 12), com o primeiro diâmetro (d_1) medido na altura do corte, o segundo (d_2) situado a 3,0 m após o d_1 , e os demais a cada 2,0 m, até atingir a altura comercial.

Figura 12- Esquema ilustrativo dos diâmetros e secções para cubagem utilizando o método de Smalian



Fonte: Autor (2022)

4.2.3 Ajuste de modelos usando as diferentes abordagens

Os dados foram separados em 13 conjuntos por espécie para as análises específicas, além do conjunto de dados contemplando todas as espécies. O modelo linearizado de Schumacher & Hall (Eq. 7) foi ajustado de forma individual e global para todos indivíduos do conjunto de dados. A preferência pelo modelo de Schumacher & Hall se deu em razão da (i) vasta aplicação na modelagem de espécies amazônicas exploradas comercialmente, (ii) por apresentar bons ajustes, e (iii) além de possuir variáveis preditoras de fácil obtenção (ALMEIDA et al., 2020; LASSANOVA et al., 2018).

4.2.3.1 Regressão com *bootstrap*

Modelos foram ajustados por meio do método dos mínimos quadrados em uma abordagem de inferência pelo método *bootstrap* seguindo seis passos:

- (i) Para a j -ésima espécie, foi selecionado aleatoriamente com reposição $n_{\text{árv},j}$ árvores, sendo $n_{\text{árv}}$ o número de árvores da espécie.
- (ii) Ajustar Eq. (7) com o subconjunto de dados criado no passo (i), e armazenando os coeficientes do modelo.

$$\ln(\hat{v}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(D) + \beta_2 \ln(h_m) + \varepsilon_i \quad (7)$$

Em que:

$\hat{v}$: volume comercial estimado, em m^3 ;

D : diâmetro à altura do peito, em cm;

h_m : altura comercial, em m.

ε_i : erro da estimativa

- (iii) Replicação passos (i)-(ii) 5.000 vezes.
- (iv) Obter os coeficientes angulares gerados nas replicações.
- (v) Repetir passos (i)-(iv) para o conjunto com todas as espécies.

- (vi) Após o passo (iv–v) determinar o intervalo de confiança *bootstrap* (IC, $\alpha=0,05$) para cada base de calibração

Note que o passo (iii) gera 5.000 vetores de coeficientes para o modelo em cada base de calibração (por espécie, e global com todas as espécies).

4.2.3.2 Regressão clássica

Os modelos de regressão linear de Schumacher & Hall (clássico) foi ajustado pelo Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MMQO).

4.2.4 Comparação dos coeficientes angulares ajustados nos diferentes métodos

Com esses passos, os coeficientes angulares das equações específicas e global foram comparados com os coeficientes angulares obtidos pela regressão *bootstrap* (específica e global), através do IC, por meio do seguinte critério: se os coeficientes angulares (regressão clássica) estiverem dentro do IC *bootstrap* dos coeficientes da equação específica e global (regressão *bootstrap*), então ambas equações não diferem estatisticamente.

4.2.5 Acurácia e precisão das equações

Além da comparação das equações através do IC, para ambas abordagens, determinou-se também a acurácia do modelo ajustado, através da média do erro relativo percentual $\bar{\varepsilon}_i\%$ (Eq. 8), e a precisão pelo erro padrão da estimativa percentual, $S_{yx}\%$ (Eq. 9), além da análise gráfica dos desvios das estimativas do volume em relação ao volume observado.

$$\bar{\varepsilon}_i\% = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\hat{v}_i - v_i}{v_i} \right) \cdot 100 \right]}{n_i} \quad (4)$$

$$S_{yx}\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_i)^2}{n_i - p}}}{\bar{v}} \cdot 100 \quad (5)$$

Em que,

$\hat{v}_i$: volume estimado i -ésima espécie, em m³;

v_i : volume observado i -ésima espécie, em m³;

$\bar{\varepsilon}_i\%$: erro médio das estimativas (resíduo);

n_i : número de observações da i -ésima espécie;

p : número de coeficientes do modelo adotado;

$\bar{v}$: média do volume observado;

$S_{yx}\%$: Erro padrão da estimativa em percentual.

O *software* computacional R (R CORE TEAM, 2022) foi utilizado nas análises estatísticas. Os pacotes do R *boot*, *forcats* e *tidyverse* foram usados como ferramentas auxiliares.

4.3 Resultados

4.3.1 Coeficientes ajustados pelos diferentes métodos

Ao comparar os coeficientes angulares específicos, obtidos pela regressão clássica, com o intervalo de confiança *bootstrap* dos coeficientes angulares, foi notado que não existe diferença entre os modelos ajustados nas diferentes abordagens, podendo ser empregado qualquer um dos modelos específicos para estimar o volume das espécies elencadas nesse estudo (Tabela 5). Assim como nos modelos específicos, também não houve diferença entre as equações globais ajustadas, sendo os valores observados para os coeficientes próximo e idênticos para algumas espécies como por exemplo o angelim pedra e o cambará (Tabela 5).

Tabela 5-Coeficientes das equações específicas ajustadas nas diferentes abordagens.

Nome popular	Regressão <i>bootstrap</i>			Regressão clássica		
	$\bar{\beta}_0$	$\bar{\beta}_1$	$\bar{\beta}_2$	β_0	β_1	β_2
Angelim amargoso	-8,17	1,79	0,71	-8,20	1,80	0,70
Angelim pedra	-8,39	1,83	0,75	-8,39	1,83	0,75
Cambará	-8,66	1,88	0,77	-8,66	1,88	0,77
Canelão	-8,58	1,98	0,57	-8,60	1,98	0,58
Cedrinho	-8,80	1,97	0,67	-8,81	1,97	0,68
Cumarú	-9,14	2,01	0,75	-9,11	2,00	0,75
Cupiúba	-8,29	1,78	0,80	-8,31	1,79	0,79
Garapeira	-8,17	1,81	0,69	-8,19	1,81	0,69
Ipê	-9,57	2,13	0,68	-9,56	2,13	0,69
Itaúba	-8,77	2,03	0,58	-8,80	2,02	0,60
Jatobá	-8,55	1,82	0,81	-8,56	1,82	0,82
Morcegueira	-7,55	1,84	0,42	-7,65	1,84	0,46
Peroba Mica	-9,85	2,22	0,69	-9,85	2,22	0,70
Global	-8,59	1,90	0,72	-8,59	1,89	0,72

Fonte: Autor (2022)

4.3.2 Parâmetros de ajuste

Quando avaliado a média do erro relativo em percentual ($\bar{\epsilon}_i\%$) por espécie, foi notado que nas diferentes abordagens, os valores obtidos foram baixos (Tabela 6). Para a regressão com *bootstrap*, o maior valor foi observado na cupiúba (1,08) e menor valor foi obtido na peroba mica (0,89), e para regressão tradicional, os valores variaram de 1,04 a 0,13 para cupiúba e peroba mica respectivamente (Tabela 6).

Em relação ao $S_{yx}\%$ específicos, foi notado que na regressão com uso do *bootstrap* os valores obtidos foram pouco maiores que aqueles obtidos pela regressão clássica, com exceção do cedrinho, cupiúba, itaúba e morcegueira (Tabela 6). Os valores encontrados na regressão com aplicação do *bootstrap* ficaram compreendidos entre 12,54 a 1,44 para o ipê e peroba mica, respectivamente (Tabela 6). E para regressão clássica (Tabela 6), os valores tiveram uma amplitude menor, sendo observados valores no intervalo de 10,70 (ipê) a 1,12 (peroba mica). Nas duas abordagens, foi observado que o modelo ajustado para o ipê apresentou baixa precisão. De maneira geral, foi notado que nos parâmetros de ajuste ($\bar{\varepsilon}_i\%$ e $S_{yx}\%$), não houve diferença significativa entre as abordagens.

Em relação aos ajustes globais, foi observado também, que não houve diferença significativa entre o erro relativo médio nas diferentes abordagens, sendo o valor observado igual a 0,66 (Tabela 6). Assim como no $\bar{\varepsilon}_i\%$ global, também não houve diferença entre o erro padrão da estimativa nos diferentes métodos, porém, o valor observado foi elevado (>13), (Tabela 6).

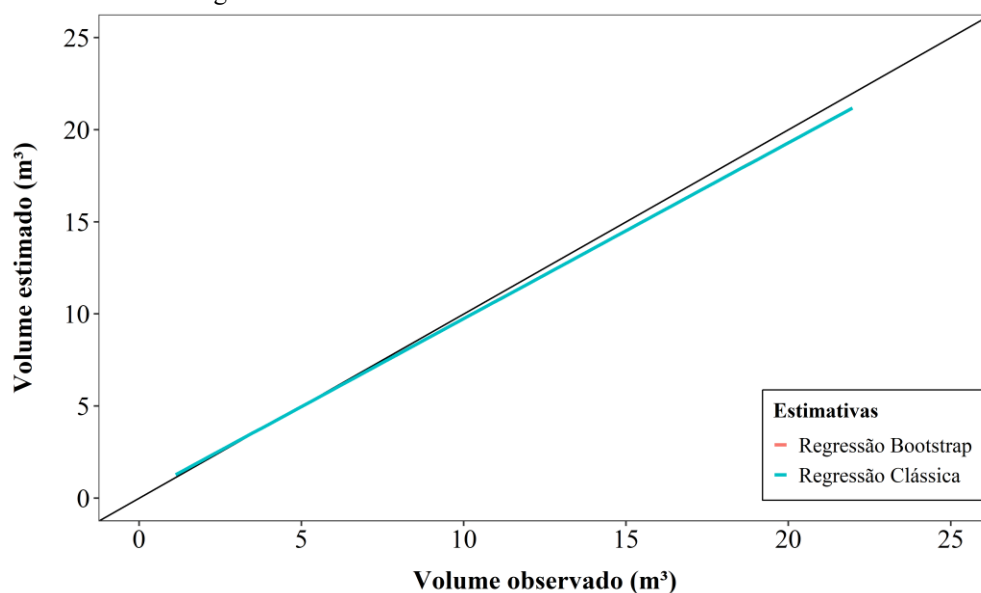
Tabela 6- Média do erro relativo ($\bar{\varepsilon}_i\%$) e erro padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) obtidos para estimativas específicas no modelo ajustado de Schumacher & Hall.

Espécie	$\bar{\varepsilon}_i\%$		$S_{yx}\%$	
	Regressão <i>bootstrap</i>	Regressão clássica	Regressão <i>bootstrap</i>	Regressão clássica
Angelim amargoso	0,4345	0,4244	4,3046	3,6759
Angelim pedra	0,4843	0,5042	4,8324	4,7263
Cambará	0,7563	0,7591	6,6152	6,4927
Canelão	0,4385	0,4461	3,9462	3,6857
Cedrinho	0,6220	0,5957	6,6297	6,9214
Cumarú	0,4591	0,3900	8,2464	6,7104
Cupiúba	1,0847	1,0465	5,5379	5,7960
Garapeira	0,5237	0,4546	2,8410	2,4830
Ipê	0,7127	0,9549	12,5450	10,7402
Itaúba	0,3286	0,2717	4,0252	4,2081
Jatobá	0,8394	0,9149	6,7104	5,6952
Morcegueira	0,9093	0,8292	4,1840	4,3841
Peroba Mica	0,0896	0,1373	1,4475	1,1275
Global	0,6624	0,6614	13,7454	13,7721

Fonte: Autor (2022)

Quando avaliado os desvios das estimativas para os ajustes global, foi observado que nas duas abordagens não existiu diferença nas estimativas, porém notou-se leve tendência em subestimar indivíduos com volume maior que 10 m³ (Figura 13).

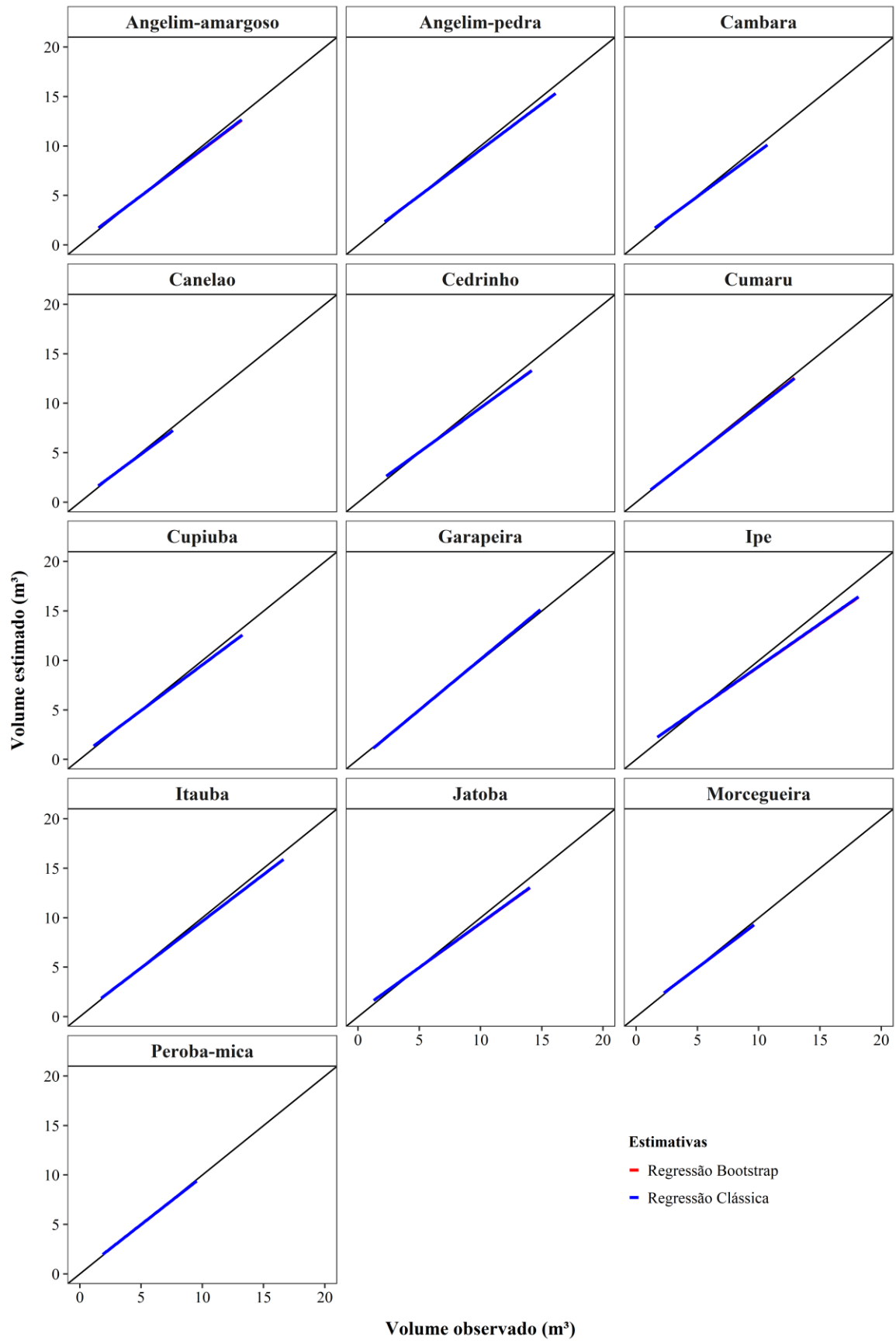
Figura 13- Desvios dos volumes estimados em relação ao volume observado, para o conjunto de espécies, seguindo as diferentes abordagens de estimativas.



Fonte: Autor (2022)

Com relação aos ajustes específicos, foi observado entre as duas abordagens, também não houve diferença nas estimativas para todas as espécies, (Figura 14). Foi notado também, que para a maior parte dos modelos ajustados, a estimativa é realizada com acurácia (Figura 14).

Figura 14- Desvios dos volumes estimados em relação ao volume observado, por espécie, seguindo as diferentes abordagens de estimativas.



Fonte: Autor (2022)

4.4 Discussão

4.4.1 Coeficientes ajustado

Por meio dos coeficientes do modelo de Schumacher & Hall ajustado a nível específico, seguindo as diferentes abordagens, foi possível observar a influência do diâmetro e da altura nos coeficientes angulares (β_1 e β_2 , respectivamente). Nesse sentido, quando estratificado os ajustes por espécie, os valores dos coeficientes obtidos tendem a ser mais amplo ou mais restrito do que aquele ajustado para um conjunto de espécie, e isso permite a realização de estimativas com maior acurácia e precisão. Esse resultado corrobora com Binoti et al., (2014), de que as equações ajustadas são compatíveis com a variação da população amostrada.

Em relação aos coeficientes ajustados ao conjunto de espécies (ajuste global), foi observado que os valores estão próximos daqueles obtidos por Cysneiros et al., (2017) e Gimenez et al., (2015), que também desenvolvem pesquisas relacionadas ao ajuste de equações volumétricas genéricas para indivíduos florestais manejado na Amazônia brasileira. Entretanto, cabe ressaltar que o ajuste de equações genéricas, é diretamente influenciada por fatores como a heterogeneidade das variáveis dendrométricas e pela diversidade de espécies, o que consequentemente poderá comprometer os principais parâmetros de ajustamento do modelo, como por exemplo o R^2 ajustado, $S_{yx}\%$, resíduos, entre outros (OLIVEIRA et al., 2017; SANTOS et al., 2019).

4.4.2 Parâmetros de ajustamento do modelo

Por meio da média do erro relativo, foi possível avaliar que entre as duas abordagens não existe diferença na acurácia do modelo, tanto para os ajustes específicos quanto para os ajustes globais. Esses resultados estão de acordo com o observado por Almeida et al., (2020); Biazatti et al., (2020); Ribeiro et al., (2014) e Tonini; Borges (2015), de que o modelo de Schumacher & Hall quando ajustado, torna-se uma das equações mais apropriadas para estimar o volume do fuste de espécies florestais. De acordo com Barreto et al., (2014); Rolim et al., (2006) e Tonini; Borges (2015), os modelos de dupla entrada são mais eficientes para estimar o volume de espécies florestais nativas, pois além do diâmetro, também considera a altura das árvores.

A tendência geral dos erros padrão das estimativas revelou que as equações ajustadas por espécie são mais precisas, corroborando com Barros; Silva Júnior (2009); Soares et al., (2011), onde os autores afirmam que as equações ajustadas especificamente (por área ou por espécie ou conjunto de espécie), é a forma mais econômica e adequada de se estimar com precisão o estoque florestal. Porém, cabe ressaltar que há a possibilidade de ocorrer nos ajustes

específicos, baixa acurácia ou baixa precisão do modelo, que por vez pode estar diretamente ligada heterogeneidade das variáveis dendrométricas existente dentro da espécie (SANTOS et al., 2019; SANTOS et al., 2012). Para Almeida et al., (2021) e Thomas et al., (2006) quando os parâmetros de ajustamento de uma modelo não apresentarem precisão satisfatória, é aconselhável a utilização de outros modelos ou de novas metodologias, afim de melhorar o seu desempenho.

Em relação ao $S_{yx}\%$ global, mesmo com um valor pouco maior que obtido nas equações específicas (13,74-13,77) levando em consideração as duas abordagens, ainda é um modelo com precisão aceitável (SAQUETTA et al., 2017).

Porém, cabe ressaltar que além dos parâmetros de ajuste de um modelo, ainda é necessário considerar o desempenho das equações e seus benefícios nos aspectos econômicos e ambientais como variável adicional para sua seleção

4.5 Conclusão

O uso do método *bootstrap* para ajustar modelos não proporcionam ganho em precisão e acurácia nas estimativas de volume de fuste, em relação ao modelo clássico de regressão linear, pois não houve as duas abordagens não diferem estatisticamente. Porém, tal conclusão tem validade para amplitudes e tamanhos amostrais desta pesquisa, uma vez que as características da amostra afetam a qualidade do *bootstrap*. Com o *bootstrap*, um ganho na precisão é alcançado no que condiz ao intervalo de confiança dos coeficientes.

4.6 Referências

- ALMEIDA, B. R. S.; CRUZ, G. S.; NICOLETTI, M. F.; GAMA, J. R. V.; LIMA, B. A.; PECH, T. M. Eficiência de equações volumétricas para *Couratari guianensis* Aubl. em diferentes cenários na Floresta Nacional do Tapajós. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 130, p. e3503, 2021. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n130.11>
- ALMEIDA, M. R. D.; SILVA, J. N. M.; BARROS, P. L. C.; ALMEIDA, E. S.; SILVA, D. A. S.; SOUSA, C. S. C. Ajuste e seleção de modelos volumétricos de espécies comerciais no município de Ipixuna (Pa). **Rev. Agro. Ambu.**, v. 13, n. 1, p. 259-278, jan./mar. 2020. DOI:10.17765/2176-9168.2020v13n1p259-278
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Kappen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711 – 728, 2013. DOI: 10.1127/0941- 2948/2013/0507
- ANDRADE, V. C. L. Modelos volumétricos de dupla entrada para aplicar em povoamentos florestais brasileiros. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, p. e00135415, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.135415>

AZEVEDO, G. B.; SOUSA, G. T. O.; BARRETO, P. A. B.; CONCEIÇÃO JÚNIOR, V. Estimativas volumétricas em povoamentos de eucalipto sob regime de alto fuste e talhadia no sudoeste da Bahia. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 309-318, out./dez. 2011. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.68.309

BARRETO, W. F.; LEÃO, F. M.; MENEZES, M. C.; SOUZA, D. V. Equação de volume para apoio ao manejo comunitário de empreendimento florestal em Anapú, Pará. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 34, n. 80, p. 321-329, out./dez. 2014. DOI: 10.4336/2014.pfb.34.80.721

BARROS, P. L. C.; SILVA JUNIOR, A. T. Equação de volume para árvores de uma floresta tropical densa no município de Anapú, oeste do estado do Pará, Amazônia Oriental. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 51, n. 1, p. 115-126, 2009.

BIAZATTI, S. C.; SCCOTI, M. S. V.; BRITO JÚNIOR, J. F.; MÔRA, R.; CARDOZO, G. H. Eficiência de métodos para estimativa volumétrica de espécies nativas na Amazônia. **Ocidental Nativa**, Sinop, v. 8, n. 2, p. 253-259, mar./abr. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v8i2.8081>

BINOTI, M. L. M. S.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G.; GARCIA, S. L. R.; FERREIRA, M. Z.; RODE, R.; SILVA, A. A. L. Redes neurais artificiais para estimação do volume de árvores. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 38, n. 2, p. 283-288, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200008>

CHERNICK, M. R. **Bootstrap Methods: a guide practitioners e researchers**. 2. ed, Newtown: Wiley interscience, 2008, 369 p.

CHERNICK, M. R.; LABUDDE, R. A. **An introduction to bootstrap methods with applications to R.**, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

CRUZ, G. S.; RIBEIRO, R. B. S.; GAMA, J. R. V.; ALMEIDA, B. R. S.; XIMENES, L. C.; GOMES, K. M. A.; BEZERRA, T. G. Ajuste e avaliação na estimativa volumétrica para *Lecythis lurida* (Miers) S.A. Mori em uma área de manejo florestal. **Adv. For. Sci.**, Cuiabá, v. 6, n. 1, p. 549-554, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.34062/afs.v6i1.7247>

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. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 45, n. 114, p. 295-304, jun. 2017. DOI: dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n114.06

FERREIRA, R. L. A.; CERQUEIRA, R. M.; CARDOSO JUNIOR, R. C. Análise da identificação Botânica em inventários florestais de planos de manejo sustentáveis no oeste paraense. **Nature and Conservation**, v. 13, n. 3, p. 136-145, 2020. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2020.003.0014>

GIMENEZ, B. O.; DANIELLI, F. E.; OLIVEIRA, C. K. A.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Equações volumétricas para espécies comerciais madeireiras do sul do estado de Roraima. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 43, n. 106, p. 291-301, jun., 2015.

GOMES, K. M. A.; RIBEIRO, R. B. S.; GAMA, J. R. V.; ANDRADE, D. F. C. Eficiência na estimativa volumétrica de madeira na Floresta Nacional do Tapajós. **Nativa**, Sinop, v. 6, n. 2, p. 170-176, mar./abr. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v6i2.5237>

LANSSANOVA, L. R.; SILVA, F. A.; SCHONS, C. T.; PEREIRA, A. C. S. Comparação entre diferentes métodos para estimativa volumétrica de espécies comerciais da Amazônia. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 3, n. 1, p. 109-115, 2018. DOI: [dx.doi.org/10.5380/biofix.v3i1.57489](https://doi.org/10.5380/biofix.v3i1.57489)

MOTA, C. G.; PONTE, M. X.; PAULETTO, D. Modelos alométricos para estimativa da biomassa de fustes de árvores em floresta ombrófila densa no município de Portel no Estado do Pará-Brasil. **Rev. Espacios**, v. 39, n. 6, p. 17, 2018.

OLIVEIRA, M. F.; MATTOS, P. P.; GARRASTAZU, M. C.; BRAZ, E. M.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ROSOT, N. C. Análise da estrutura horizontal por densidade de Kernel como subsídio ao manejo florestal na Amazônia. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 41, n. e202002098, p. 1-14, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.4336/2021.pfb.41e202002098>

OLIVEIRA, M. M.; HIGUCHI, N.; CELES, C. H.; HIGUCHI, F. G. Tamanho e formas de parcelas para inventários florestais de espécies arbóreas na Amazônia central. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 645-653, jul.-set., 2014.

OLIVEIRA, R. C. A.; RODE, R.; GAMA, J. R. V.; ALMEIDA, E. C. Equações volumétricas para *Couratari stellata* A.C Smith (Tauari) na Floresta Nacional do Tapajós. **Nativa**, Sinop, v. 5, n. 2, p. 138-144, mar./abr. 2017. DOI: [10.5935/2318-7670.v05n02a10](https://doi.org/10.5935/2318-7670.v05n02a10)

PUTH, M.; NEUHAUSER, M.; RUXTON, G. D. On the variety of methods for calculating confidence intervals By Bootstrapping. **Journal of Animal Ecology**, v. 84, p. 892-897, 2015. DOI: [10.1111/1365-2656.12382](https://doi.org/10.1111/1365-2656.12382)

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Áustria. Disponível em: URL <https://www.R-project.org/>.2021

RAMOS, H. C.; DALLACORT, R.; NEVES, S. M. A. S.; DALCHIAVON, F. C.; SANTI, A.; VIEIRA, F. F. Precipitação e temperatura do ar para o estado de Mato Grosso utilizando krigagem ordinária. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, jan/jul, 2017. DOI: [10.5380/abclima.v20i0.43762](https://doi.org/10.5380/abclima.v20i0.43762)

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. DOI: [http://dx.doi.org/10.1590/01047760201420041400](https://doi.org/10.1590/01047760201420041400)

ROLIM, S. G.; COUTO, H. T. Z.; JESUS, R. M.; FRANÇA, J. T. Modelos volumétricos para a Floresta Nacional do Taipé-Aquirí, Serra dos Carajás. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 36, n. 1, p. 106-114, 2006. DOI: [10.1590/S0044-59672006000100013](https://doi.org/10.1590/S0044-59672006000100013)

SANQUETTA, C. R.; SANQUETTA, M. N. I.; BASTOS, A.; QUEIROZ, A.; DALLA CORTE, A. P. Estimativa da altura e do volume em povoamentos jovens de restauração florestal em Rondônia. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 2 n. 2 p. 23-31, 2017. DOI: [dx.doi.org/10.5380/biofix.v2i2.54124](https://doi.org/10.5380/biofix.v2i2.54124)

SANTOS, A. T.; MATTOS, P. P.; BRAZ, E. M.; ROSOT, N. C. Equação de volume e relação hipsométrica em plantio de *Ocotea porosa*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 69, p. 13-21, 2012. DOI: [http://dx.doi.org/10.4336/2012.pfb.32.69.13](https://doi.org/10.4336/2012.pfb.32.69.13)

SANTOS, M. F.; FIGUEIREDO FILHO, A.; GAMA, J. R. V.; RETSLAFF, F. A. S.; COSTA, D. L.; GOMES, K. M. A.; CRUZ, G. S.; ALMEIDA, B. R. S. Eficiência de equações

volumétricas para *Manilkara* spp. em floresta manejada na Amazônia Oriental. **Nativa**, Sinop, v. 7, n. 5, p. 621-628, set./out. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v7i5.7804>

SILVA, L. B. D.; MORAIS, V. A.; CAETANO, M. G.; BERNARDES, L. F. G. M. Equações para estimativa volumétrica de espécies arbóreas da Amazônia. **Rev. Ciênc. Agroamb.** v. 18, n. 1, 2020. DOI: 10.30681/rcaa.v18i1.4046

SOARES, C. P. B.; MARTINS, F. B.; LEITE JUNIOR, H. U.; SILVA, G. F.; FIGUEIREDO, L. T. M. Equações hipsométricas, volumétricas e de taper para onze espécies nativas. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n5, p.1039-1051, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000600010>

THAINES, F.; BRAZ, E. M.; MATTOS, P. P.; THAINES, A. A. R. Equações para a estimativa de volume de madeira para a região da bacia do Rio Ituxi, Lábrea, AM. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 64, p. 283-289, 2010. DOI: 10.4336/2010.pfb.30.64.283

THOMAS, C.; ANDRADE, C. M.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Comparação de equações volumétricas ajustadas com dados de cubagem e análise de tronco. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 3, p. 319-327, 2006. <http://dx.doi.org/10.5902/198050981911>

TONINI, H.; BORGES, R. A. Equação de volume para espécies comerciais em Floresta Ombrófila Densa no sul de Roraima. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 35, n. 82, p. 111-117, abr./jun. 2015. DOI: 10.4336/2015.pfb.35.82.738

VATRAZ, S.; CARVALHO, J. O. P.; SILVA, J. N. M.; CASTRO, T. C. Efeito da exploração de impacto reduzido na dinâmica do crescimento de uma floresta natural. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 44, n. 109, p. 261-271, mar., 2016. DOI: dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n109.25

APÊNDICE

Tabela 7- Valor mínimo (Min), mediana, média, valor máximo (Max), desvio padrão (s) e número de observações (n) específico e global, baseados na variável diâmetro a altura do peito (*D*).

Nome popular	<i>D</i> (cm)					n
	Min	Mediana	Média	Max	s	
Angelim amargoso	45,89	70,00	75,62	126,37	18,23	37
Angelim pedra	50,61	70,00	74,57	155,02	18,71	90
Cambará	51,88	65,92	69,14	100,90	11,56	80
Canelão	50,00	63,34	64,64	89,45	9,97	67
Cedrinho	54,11	79,58	81,58	145,06	20,04	71
Cumarú	45,83	65,64	70,72	142,60	19,15	52
Cupiúba	51,00	74,22	76,24	123,94	16,40	57
Garapeira	45,11	71,56	81,96	177,30	27,85	79
Ipê	53,00	83,00	83,35	129,55	14,01	49
Itaúba	50,29	61,11	67,87	134,00	17,02	71
Jatobá	45,89	76,00	74,71	105,04	14,23	61
Morcegueira	55,70	71,62	74,02	109,82	15,05	43
Peroba mica	52,00	74,89	75,02	102,00	11,14	32
Todas	45,11	71,00	74,40	177,30	18,23	789

Fonte: autor (2022)

Tabela 8- Valor mínimo (Min), mediana, média, valor máximo (Max), desvio padrão (s) e número de observações (n) específico e global, baseados na variável altura comercial (*hm*).

Nome popular	<i>hm</i> (m)					n
	Min	Mediana	Média	Max	s	
Angelim amargoso	9,80	16,20	16,64	21,80	2,75	37
Angelim pedra	9,20	16,40	16,70	29,54	3,91	90
Cambará	6,60	15,35	14,94	19,20	2,58	80
Canelão	9,00	15,26	14,63	19,62	2,21	67
Cedrinho	9,10	15,80	15,87	20,74	2,12	71
Cumarú	8,60	15,80	16,26	25,48	3,31	52
Cupiúba	6,00	13,30	12,97	20,40	3,31	57
Garapeira	7,50	15,40	15,17	21,37	2,60	79
Ipê	10,10	16,30	16,37	25,20	3,83	49
Itaúba	7,10	14,90	14,90	20,14	2,49	71
Jatobá	9,20	16,20	15,98	27,80	3,86	61
Morcegueira	11,30	15,60	16,24	20,74	1,76	43
Peroba mica	11,20	14,35	14,61	20,50	2,27	32
Todas	6,00	15,50	15,47	29,54	3,11	789

Fonte: autor (2022).

Tabela 9- Valor mínimo (Min), mediana, média, valor máximo (Max), desvio padrão (s) e número de observações (n) específico e global, baseados na variável volume de madeira em toras (v).

Nome popular	v (m ³)					n
	Min	Mediana	Média	Max	s	
Angelim amargoso	1,53	4,49	5,13	13,21	2,85	37
Angelim pedra	2,17	4,38	5,47	19,99	3,34	90
Cambará	1,51	3,62	4,17	10,71	1,86	80
Canelão	1,50	3,15	3,47	7,60	1,27	67
Cedrinho	2,30	5,32	6,01	14,18	3,00	71
Cumarú	1,17	3,70	5,03	19,30	3,56	52
Cupiúba	1,13	4,15	4,68	13,27	2,60	57
Garapeira	1,23	4,75	6,03	26,36	4,53	79
Ipê	1,73	5,25	6,29	18,13	3,36	49
Itaúba	1,74	3,10	4,17	16,63	2,64	71
Jatobá	1,27	4,93	5,08	14,03	2,46	61
Morcegueira	2,26	4,23	4,81	9,63	1,99	43
Peroba mica	1,87	4,82	5,03	9,53	1,94	32
Todas	1,13	4,20	5,02	26,36	3,01	789

Fonte: autor (2022).

Tabela 10- Correlações entre as variáveis: diâmetro a altura do peito (dap), altura comercial (hc) e volume de madeira (Vol), para cada espécie e também para o conjunto das espécies avaliadas na pesquisa.

Nome popular	Correlações		
	dap x hc	dap x vol	hc x vol
Angelim amargoso	0,57	0,96	0,64
Angelim pedra	0,33	0,91	0,59
Cambará	0,48	0,91	0,68
Canelão	0,42	0,94	0,54
Cedrinho	-0,05	0,93	0,14
Cumarú	0,61	0,96	0,77
Cupiúba	0,49	0,86	0,73
Garapeira	0,45	0,96	0,56
Ipê	0,48	0,88	0,68
Itaúba	0,33	0,97	0,41
Jatobá	0,50	0,87	0,72
Morcegueira	0,40	0,96	0,47
Peroba mica	0,40	0,94	0,63
Todas	0,37	0,93	0,56

Fonte: autor (2022).

Tabela 11- Matriz de covariância para os coeficientes de regressão obtidos através dos modelos de Husch e Schumacher & Hall

Nome científico	Coeficientes	Husch		Schumacher-Hall		
		β_0	β_1	β_0	β_1	β_2
<i>Vatairea macrocarpa</i> (Benth.) Ducke	β_0	0,1989	-0,0458	0,0904	-0,0215	0,0006
	β_1	-0,0458	0,0106	-0,0215	0,0100	-0,0078
	β_2	-	-	0,0006	-0,0078	0,0119
<i>Hymenolobium excelsum</i> Ducke	β_0	0,1810	-0,0432	0,0521	-0,0077	-0,0071
	β_1	-0,0432	0,0103	-0,0077	0,0024	-0,0009
	β_2	-	-	-0,0071	-0,0009	0,0039
<i>Qualea albiflora</i> Warm.	β_0	0,2001	-0,0473	0,0989	-0,0219	-0,0021
	β_1	-0,0473	0,0112	-0,0219	0,0060	-0,0013
	β_2	-	-	-0,0021	-0,0013	0,0029
<i>Ocotea corymbosa</i> (Meissn.) Mez	β_0	0,1849	-0,0442	0,0756	-0,0169	-0,0022
	β_1	-0,0442	0,0106	-0,0169	0,0061	-0,0032
	β_2	-	-	-0,0022	-0,0032	0,0059
<i>Erismia uncinatum</i> Warm.	β_0	0,1394	-0,0327	0,1058	-0,0109	-0,0217
	β_1	-0,0327	0,0077	-0,0109	0,0027	-0,0002
	β_2	-	-	-0,0217	-0,0002	0,0082
<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Forsyth f.	β_0	0,1612	-0,0385	0,1619	-0,0229	-0,0241
	β_1	-0,0385	0,0092	-0,0229	0,0058	-0,0004
	β_2	-	-	-0,0241	-0,0004	0,0093
<i>Goupia glabra</i> Aubl	β_0	0,4188	-0,0971	0,1379	-0,0306	-0,0034
	β_1	-0,0971	0,0226	-0,0306	0,0088	-0,0028
	β_2	-	-	-0,0034	-0,0028	0,0061
<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J. F. Macbr.	β_0	0,0662	-0,0148	0,0412	-0,0030	-0,0104
	β_1	-0,0148	0,0033	-0,0030	0,0015	-0,0012
	β_2	-	-	-0,0104	-0,0012	0,0057
<i>Handroanthus</i> spp	β_0	0,1781	-0,0415	0,1163	-0,0272	0,0014
	β_1	-0,0415	0,0097	-0,0272	0,0133	-0,0116
	β_2	-	-	0,0014	-0,0116	0,0186
<i>Mezilaurus itauba</i> (Meisn.) Taub. ex Mez	β_0	0,0363	-0,0089	0,0350	-0,0044	-0,0062
	β_1	-0,0089	0,0022	-0,0044	0,0021	-0,0016
	β_2	-	-	-0,0062	-0,0016	0,0047
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	β_0	0,4371	-0,1003	0,1382	-0,0316	-0,0013
	β_1	-0,1003	0,0231	-0,0316	0,0103	-0,0046
	β_2	-	-	-0,0013	-0,0046	0,0078
<i>Simarouba versicolor</i> A.St.-Hil.	β_0	0,1053	-0,0246	0,2938	0,0035	-0,1119
	β_1	-0,0246	0,0057	0,0035	0,0047	-0,0085
	β_2	-	-	-0,1119	-0,0085	0,0537
<i>Aspidosperma macrocarpon</i> Mart. & Zucc.	β_0	0,2849	-0,0672	0,0697	-0,0097	-0,0104
	β_1	-0,0672	0,0159	-0,0097	0,0038	-0,0025
	β_2	-	-	-0,0104	-0,0025	0,0080
Todas	β_0	0,0151	-0,0035	0,0067	-0,0011	-0,0007
	β_1	-0,0035	0,0008	-0,0011	0,0004	-0,0001
	β_2	-	-	-0,000749856	-0,0001	0,0005

Fonte: autor (2022).

Tabela 12- Matriz de correlação para os coeficientes de regressão obtidos através do modelo de Husch.

Espécie	Correlações		
	-	β_0	β_1
Angelim-amargoso	β_0	1,0000	-0,9988
	β_1	-0,9988	1,0000
Angelim-pedra	β_0	1,0000	-0,9991
	β_1	-0,9991	1,0000
Cambara	β_0	1,0000	-0,9990
	β_1	-0,9990	1,0000
Canelão	β_0	1,0000	-0,9994
	β_1	-0,9994	1,0000
Cedrinho	β_0	1,0000	-0,9992
	β_1	-0,9992	1,0000
Cumarú	β_0	1,0000	-0,9987
	β_1	-0,9987	1,0000
Cupiúba	β_0	1,0000	-0,9988
	β_1	-0,9988	1,0000
Garapeira	β_0	1,0000	-0,9980
	β_1	-0,9980	1,0000
Ipê	β_0	1,0000	-0,9983
	β_1	-0,9983	1,0000
Itauba	β_0	1,0000	-0,9974
	β_1	-0,9974	1,0000
Jatobá	β_0	1,0000	-0,9992
	β_1	-0,9992	1,0000
Morcegueira	β_0	1,0000	-0,9980
	β_1	-0,9980	1,0000
Peroba-mica	β_0	1,0000	-0,9995
	β_1	-0,9995	1,0000
Todas	β_0	1,0000	-0,9987
	β_1	-0,9987	1,0000

Fonte: autor (2022).

Tabela 13- Matriz de correlação para os coeficientes de regressão obtidos através do modelo de Schumacher & Hall.

Espécie	Correlações			
	-	β_0	β_1	β_2
Angelim-amargoso	β_0	1,0000	-0,7150	0,0168
	β_1	-0,7150	1,0000	-0,7103
	β_2	0,0168	-0,7103	1,0000
Angelim-pedra	β_0	1,0000	-0,6842	-0,4966
	β_1	-0,6842	1,0000	-0,2918
	β_2	-0,4966	-0,2918	1,0000
Cambara	β_0	1,0000	-0,8999	-0,1246
	β_1	-0,8999	1,0000	-0,3187
	β_2	-0,1246	-0,3187	1,0000
Canelão	β_0	1,0000	-0,7837	-0,1056
	β_1	-0,7837	1,0000	-0,5340
	β_2	-0,1056	-0,5340	1,0000
Cedrinho	β_0	1,0000	-0,6427	-0,7353
	β_1	-0,6427	1,0000	-0,0454
	β_2	-0,7353	-0,0454	1,0000
Cumarú	β_0	1,0000	-0,7492	-0,6203
	β_1	-0,7492	1,0000	-0,0541
	β_2	-0,6203	-0,0541	1,0000
Cupiúba	β_0	1,0000	-0,8753	-0,1168
	β_1	-0,8753	1,0000	-0,3760
	β_2	-0,1168	-0,3760	1,0000
Garapeira	β_0	1,0000	-0,3782	-0,6796
	β_1	-0,3782	1,0000	-0,4209
	β_2	-0,6796	-0,4209	1,0000
Ipê	β_0	1,0000	-0,6921	0,0293
	β_1	-0,6921	1,0000	-0,7409
	β_2	0,0293	-0,7409	1,0000
Itauba	β_0	1,0000	-0,5120	-0,4798
	β_1	-0,5120	1,0000	-0,5072
	β_2	-0,4798	-0,5072	1,0000
Jatobá	β_0	1,0000	-0,8355	-0,0404
	β_1	-0,8355	1,0000	-0,5138
	β_2	-0,0404	-0,5138	1,0000
Morcegueira	β_0	1,0000	0,0943	-0,8910
	β_1	0,0943	1,0000	-0,5350
	β_2	-0,8910	-0,5350	1,0000
Peroba-mica	β_0	1,0000	-0,5993	-0,4411
	β_1	-0,5993	1,0000	-0,4533
	β_2	-0,4411	-0,4533	1,0000
Todas	β_0	1,0000	-0,7168	-0,4035
	β_1	-0,7168	1,0000	-0,3474
	β_2	-0,4035	-0,3474	1,0000

Fonte: autor (2022).

Tabela 14- Coeficientes médio ajustado e seus respectivos desvios padrão obtidos pelo modelo de Husch

Nome popular	Husch			
	$\bar{\beta}_0$	s	$\bar{\beta}_1$	s
Angelim amargoso	-7,5600	0,4454	2,1100	0,1026
Angelim pedra	-7,4700	0,4343	2,1100	0,1037
Cambará	-8,0900	0,4693	2,2300	0,1110
Canelão	-8,2300	0,4334	2,2600	0,1036
Cedrinho	-6,9000	0,3699	1,9600	0,0868
Cumarú	-8,4200	0,3989	2,3300	0,0954
Cupiúba	-8,1600	0,6454	2,2200	0,1497
Garapeira	-7,0000	0,2507	1,9700	0,0561
Ipê	-9,9500	0,4226	2,6500	0,0986
Itaúba	-7,8100	0,1930	2,1700	0,0474
Jatobá	-8,5700	0,6499	2,3500	0,1492
Morcegueira	-6,8300	0,3335	1,9400	0,0778
Peroba Mica	-9,3000	0,5381	2,5200	0,1270
Todas	-7,6500	0,1227	2,1300	0,0288

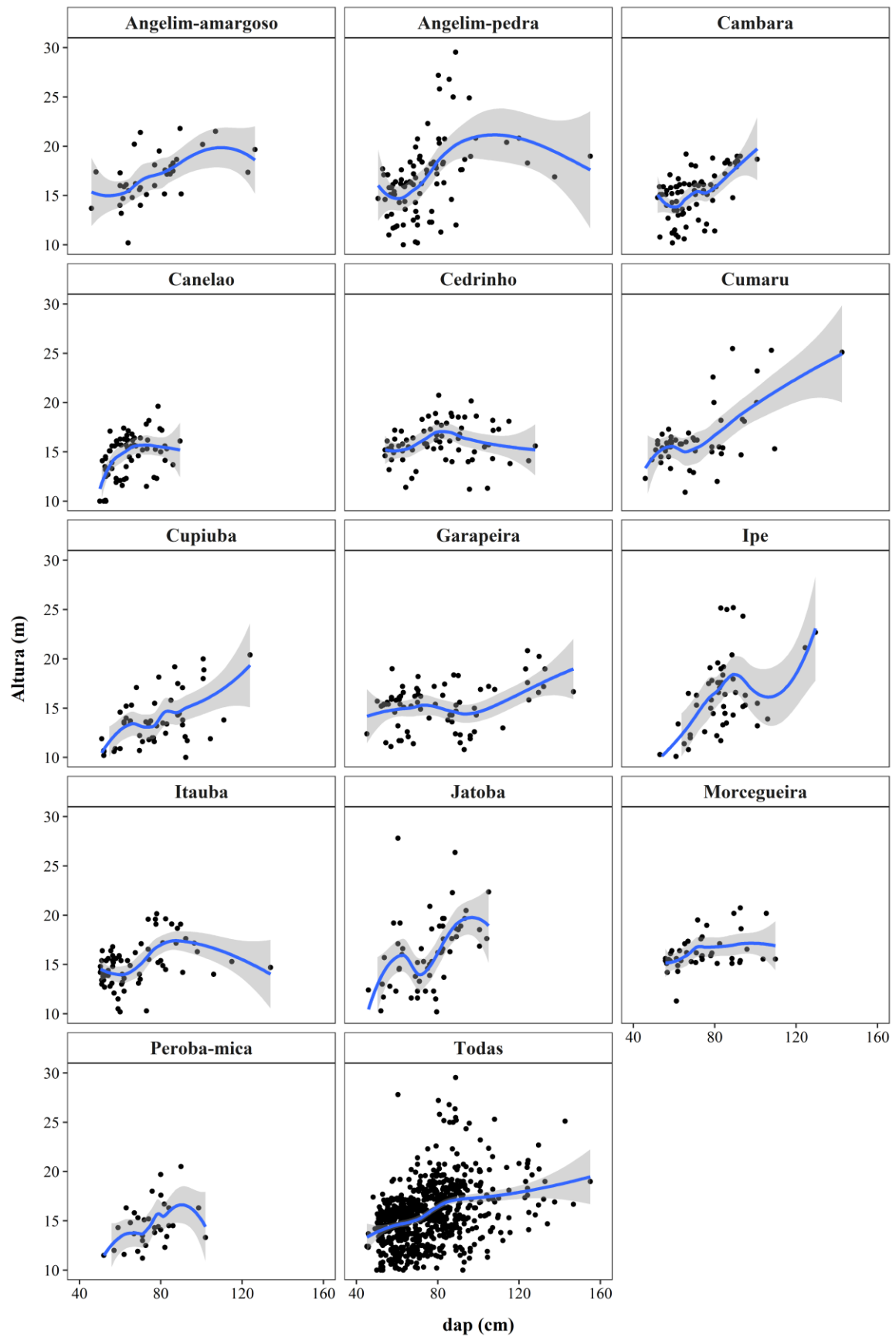
Fonte: autor (2022).

Tabela 15- Coeficientes médio ajustado e seus respectivos desvios padrão obtidos pelo modelo de Schumacher e Hall

Nome popular	Schumacher & Hall					
	$\bar{\beta}_0$	s	$\bar{\beta}_1$	s	$\bar{\beta}_2$	s
Angelim amargoso	-8,17	0,2897	0,7100	0,0976	0,7100	0,1110
Angelim pedra	-8,39	0,2263	0,7500	0,0488	0,7500	0,0619
Cambará	-8,66	0,3224	0,7700	0,0794	0,7700	0,0532
Canelão	-8,58	0,2787	0,5700	0,0787	0,5700	0,0769
Cedrinho	-8,8	0,3173	0,6700	0,0521	0,6700	0,0912
Cumarú	-9,14	0,3999	0,7500	0,0767	0,7500	0,0957
Cupiúba	-8,29	0,3676	0,8000	0,0930	0,8000	0,0769
Garapeira	-8,17	0,2009	0,6900	0,0390	0,6900	0,0765
Ipê	-9,57	0,3333	0,6800	0,1132	0,6800	0,1343
Itaúba	-8,77	0,1880	0,5800	0,0478	0,5800	0,0692
Jatobá	-8,55	0,3748	0,8100	0,1041	0,8100	0,0912
Morcegueira	-7,55	0,5544	0,4200	0,0690	0,4200	0,2355
Peroba Mica	-9,85	0,2627	0,6900	0,0610	0,6900	0,0896
Todas	-8,59	0,0828	0,7200	0,0189	0,7200	0,0224

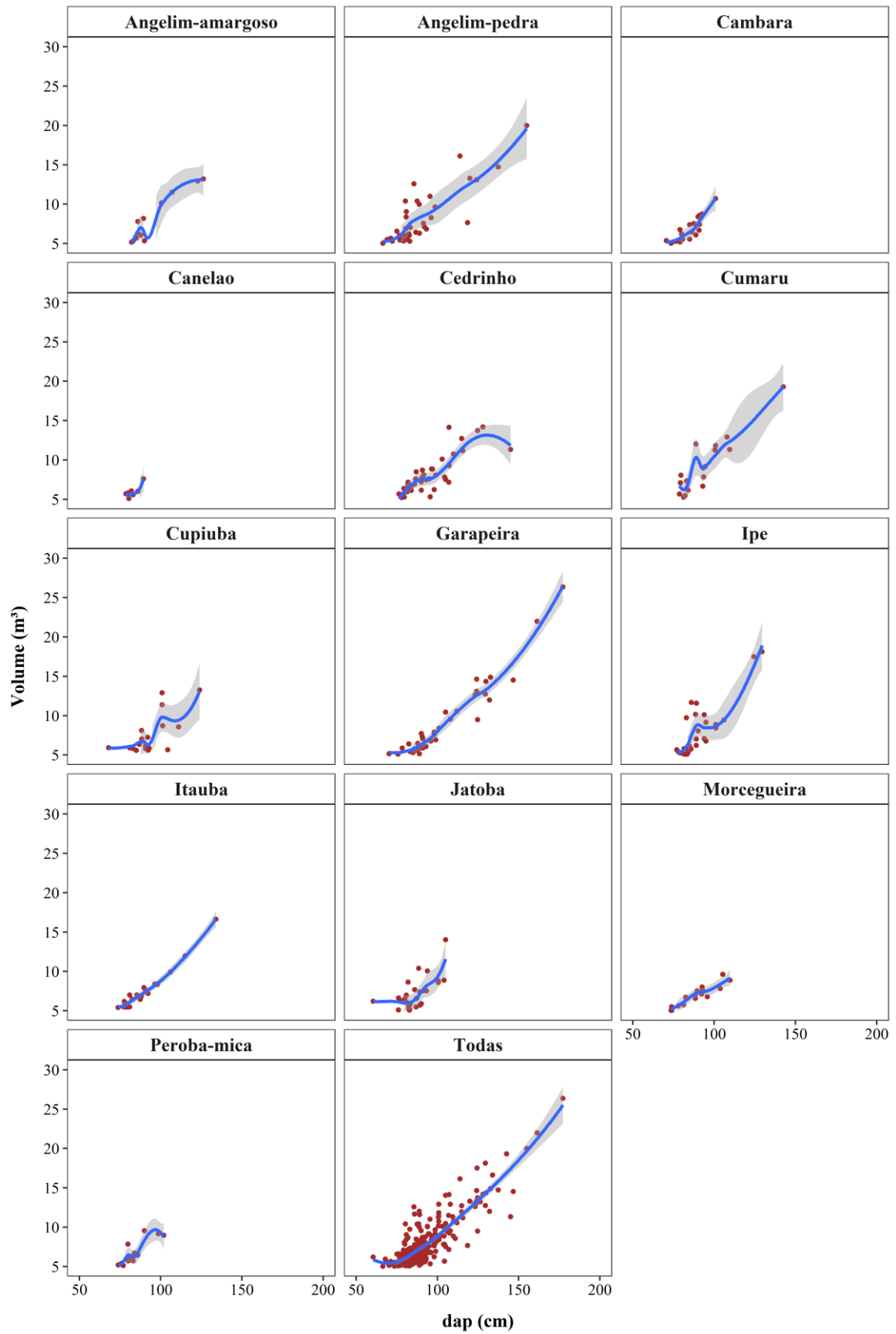
Fonte: autor (2022).

Figura 15- Gráfico de dispersão para as variáveis dap (cm) vs altura comercial (m).



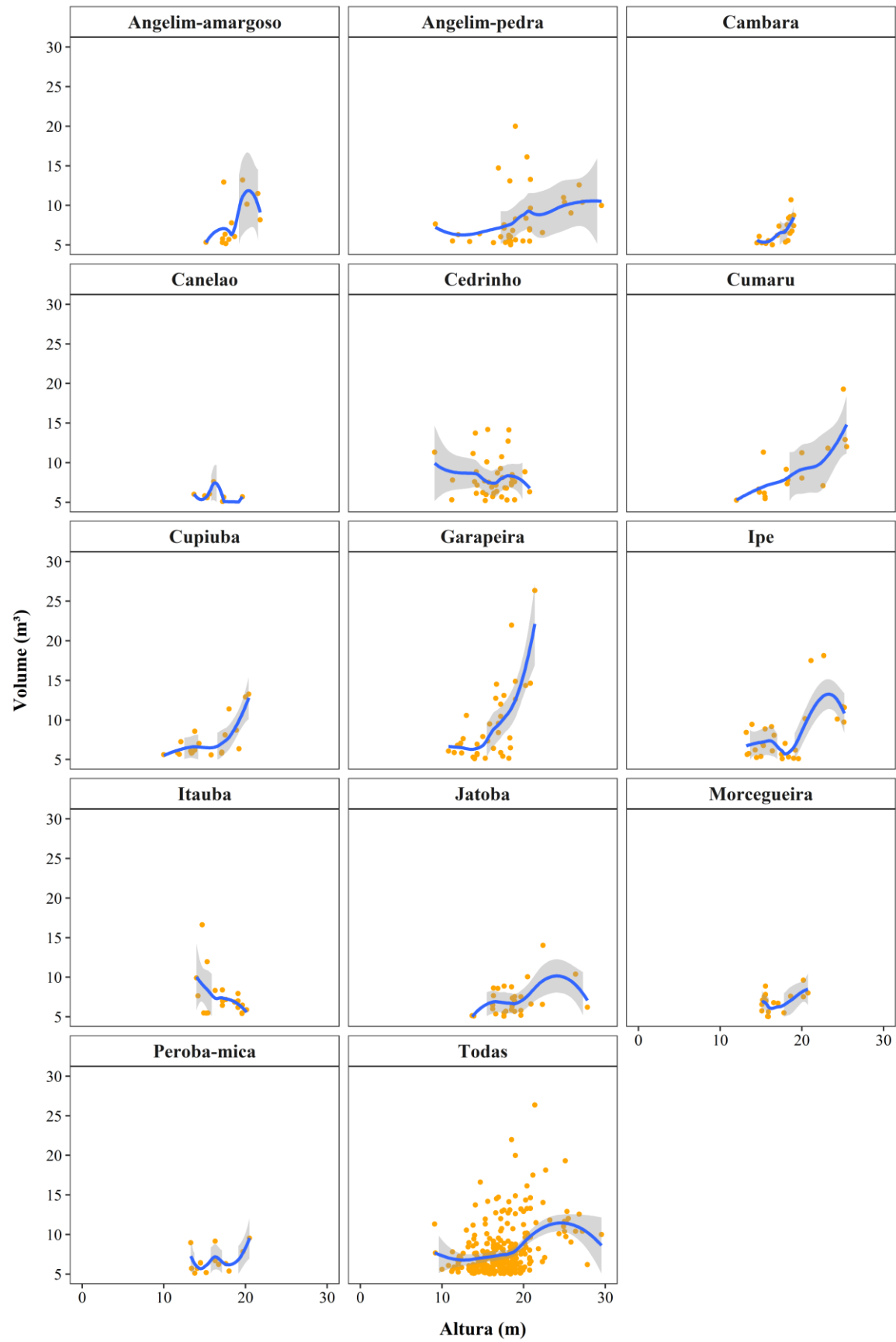
Fonte: autor (2022).

Figura 16- Gráfico de dispersão para as variáveis dap (cm) vs volume (m^3).



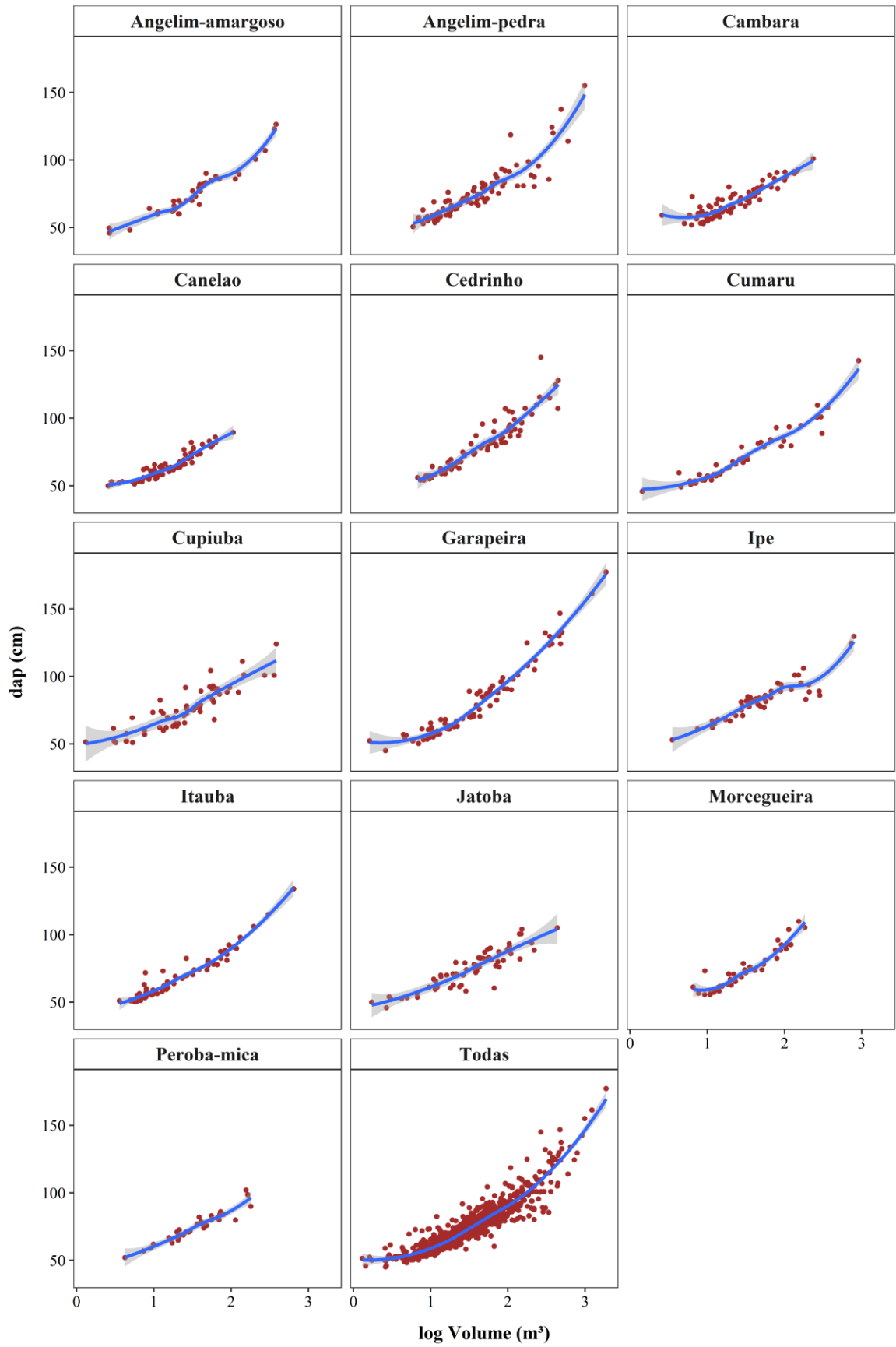
Fonte: autor (2022).

Figura 17- Gráfico de dispersão para as variáveis altura comercial (m) vs volume do fuste (m^3).



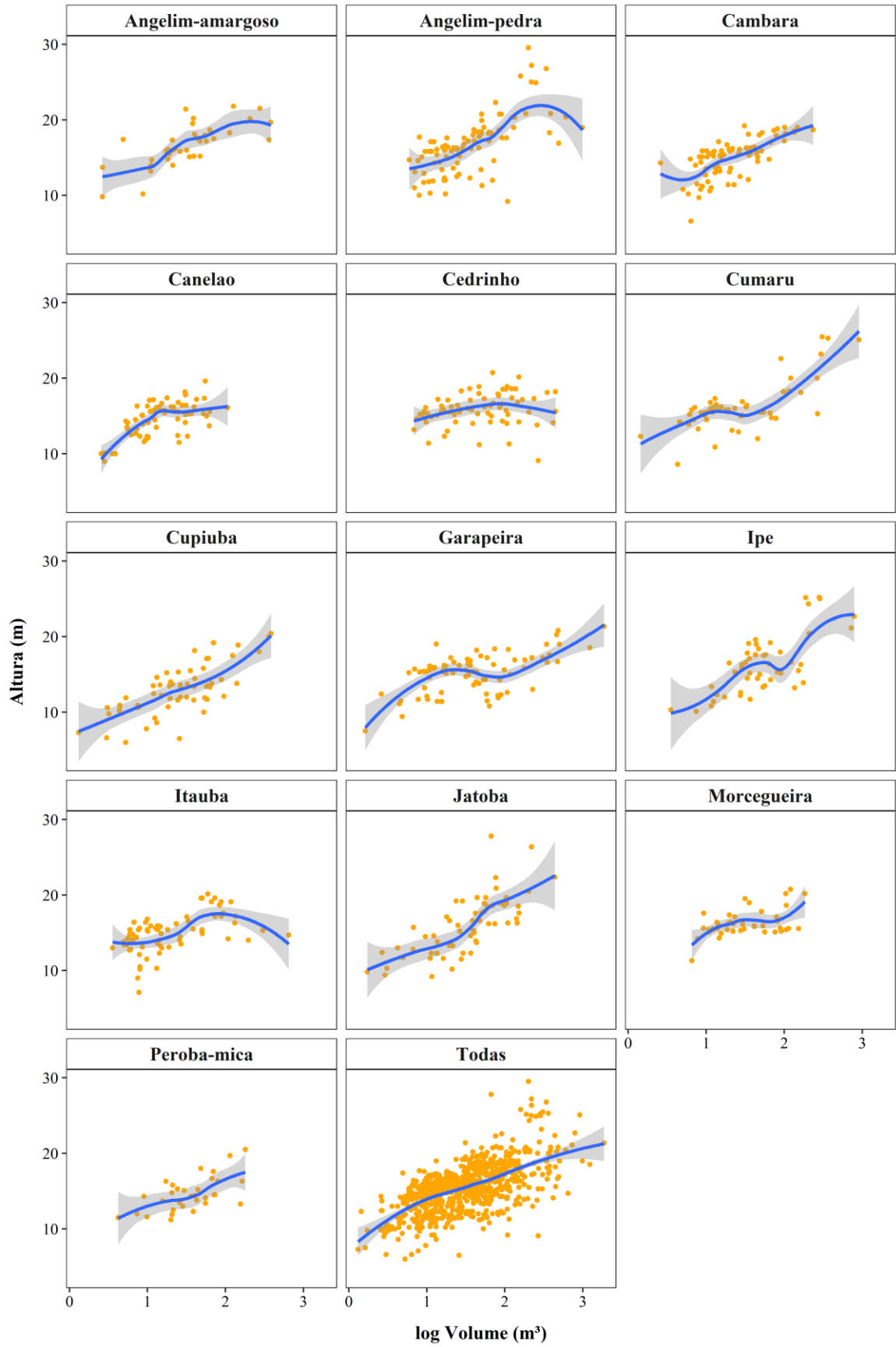
Fonte: autor (2022).

Figura 18- Gráfico de dispersão para as variáveis log do volume do fuste (m³) vs dap (cm).



Fonte: autor (2022).

Figura 19- Gráfico de dispersão para as variáveis log do volume do fuste (m³) vs altura comercial (m).



Fonte: autor (2022).