

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
MESTRADO EM ENGENHARIA FLORESTAL

BRUNO RAFAEL SILVA DE ALMEIDA

MODELOS TRADICIONAIS E DE EFEITO MISTO PARA PREDIÇÃO DO
VOLUME COMERCIAL DE MADEIRA EM ÁREA DE MANEJO FLORESTAL NA
AMAZÔNIA

LAGES

2020

BRUNO RAFAEL SILVA DE ALMEIDA

**MODELOS TRADICIONAIS E DE EFEITO MISTO PARA PREDIÇÃO DO
VOLUME COMERCIAL DE MADEIRA EM ÁREA DE MANEJO FLORESTAL NA
AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito para obtenção de título de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Felipe Nicoletti

Coorientador: Prof. Dr. João Ricardo Vasconcellos Gama

LAGES

2020

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Almeida, Bruno Rafael Silva de
MODELOS TRADICIONAIS E DE EFEITO MISTO PARA
PREDIÇÃO DO VOLUME COMERCIAL DE MADEIRA EM
ÁREA DE MANEJO FLORESTAL NA AMAZÔNIA / Bruno
Rafael Silva de Almeida. -- 2020.
128 p.

Orientador: Marcos Felipe Nicoletti
Coorientador: João Ricardo Vasconcellos Gama
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2020.

1. Floresta tropical. 2. Amazônia brasileira. 3. Equações de
volume. 4. Floresta Nacional do Tapajós. I. Nicoletti, Marcos Felipe.
II. Gama, João Ricardo Vasconcellos. III. Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Florestal. IV. Título.

BRUNO RAFAEL SILVA DE ALMEIDA

**MODELOS TRADICIONAIS E DE EFEITO MISTO PARA PREDIÇÃO DO
VOLUME COMERCIAL DE MADEIRA EM ÁREA DE MANEJO FLORESTAL NA
AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito para obtenção de título de Mestre em Engenharia Florestal.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Felipe Nicoletti

Universidade do Estado de Santa Catarina

Membros:

Prof. Dr. Samuel de Pádua Chaves e Carvalho

Universidade Federal de Mato Grosso

Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari

Universidade Federal do Paraná

Lages, 13 de outubro de 2020.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me fortalecer, guiar meus passos e possibilitar a conquista de mais um objetivo.

Aos meus Pais, José Maria Almeida e Sara Almeida, pelo exemplo, incentivo e por me fortalecerem a cada dia, obrigado pela educação que me proporcionaram. Vocês são incríveis e traduzem fielmente o significado da palavra amor.

Às minhas irmãs Jussara e Aline Almeida, por serem meu exemplo de dedicação. Amo vocês!!

Ao meu orientador, Professor Marcos Felipe Nicoletti, pelo apoio desde o início da construção desta dissertação e pela confiança no meu trabalho. Muito obrigado!

Ao meu coorientador, Professor João Ricardo e ao Professor Stepka pelas valiosas sugestões.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade e contribuição com este trabalho.

À minha querida Charline Zangalli, pelo companheirismo, incentivo, compreensão, por me fortalecer, alegrar e ser a paz dos meus dias. Você uma mulher incrível!

À minha grande amiga Girlene Cruz, pela amizade, por me encorajar sempre, por ter me ajudado do início ao fim desse processo. Serei sempre muito grato!

Ao meu amigo Bruno Lima pela amizade de anos e por estar à disposição para ajudar sempre que possível. Obrigado!

À cooperativa Mista da Floresta Nacional do Tapajós (COOMFLONA), pelo fornecimento da base de dados para o desenvolvimento deste estudo.

Ao grupo de pesquisa de Gestão de Recursos Florestais da Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), pelo apoio a pesquisa.

A todos os colegas do Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal e do Laboratório de dendrometria.

E finalmente, agradecer a todos que contribuíram de forma direta e indireta no desenvolvimento desse trabalho, muito obrigado a todos!

“Você ganha força, coragem e confiança
através de cada experiência em que você
realmente para e encara o medo de frente.”

(Eleanor Roosevelt)

RESUMO

As florestas tropicais possuem a maior biodiversidade do planeta, sua florística é composta de árvores de grande porte, o que lhe atribui um elevado potencial madeireiro. A grande quantidade de recurso madeireiro que compõe essas vastas florestas necessita ser melhor aproveitado. No entanto, é necessário aperfeiçoar as técnicas de estimativa para a correta predição do volume a ser explorada nos empreendimentos florestais, visto que estimar incorretamente pode resultar em danos financeiros para a empresa e um subaproveitamento da matéria prima. A dissertação teve o objetivo de avaliar cenários de modelagem, utilizando diferentes formas de estratificação de dados na modelagem tradicional, além de utilizar a modelagem de efeito misto para predição do volume comercial de espécies nativas da Amazônia, o estudo foi dividido em dois capítulos: o primeiro teve o objetivo de avaliar diferentes cenários para o ajuste de modelos volumétricos, a fim de identificar a estratégia que resulte em predições mais precisas do volume comercial das principais espécies exploradas na Floresta Nacional do Tapajós (FNT). O segundo objetivou ajustar modelos de efeito misto para as cinco principais espécies manejadas na FNT e comparar sua precisão na predição do volume comercial em relação a modelagem tradicional. O estudo foi realizado com dados coletados em uma Área de Manejo Florestal pertencente à Cooperativa Mista da Floresta Nacional do Tapajós - COOMFLONA, localizada na FNT, município de Belterra, Estado do Pará. Os dados referentes ao diâmetro à altura do peito (dap) e altura comercial (hc) utilizados nos ajustes foram provenientes de inventário florestal e cubagem rigorosa das árvores de dez Unidades de Produção Anual (UPAs), manejadas entre os anos de 2007 a 2016. Para a escolha do melhor modelo para cada um dos três cenários, I - ajuste para 44 espécies agrupadas, II – ajuste por espécie para as cinco principais espécies manejadas e III – ajuste para cinco espécies com estratificação por classe diamétrica, foram utilizados os seguintes critérios: Coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj} (\%)$), erro padrão da estimativa ($S_{yx} (\%)$), critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação Bayesiano (BIC), análise gráfica dos resíduos e de multicolinearidade. A precisão do modelo de efeito misto, aplicado apenas nos cenários I e II, foi avaliada pelo $S_{yx} (\%)$, AIC, BIC e análise gráfica dos resíduos. A equação genérica, com espécies agrupadas, foi superior quando comparado aos ajustes individuais e por classes diamétricas para todas as espécies. A equação genérica apresentou resultados superiores aos encontrados na estratificação por espécie e por classe diamétrica. De modo geral, o modelo de Schumacher e Hall não linear foi menos preciso

somente quando comparado com a sua versão com efeito misto, que resultou em melhores previsões para o volume individual nos dois cenários avaliados.

Palavras-Chave: Floresta tropical. Amazônia brasileira. Equações de volume. Floresta Nacional do Tapajós.

ABSTRACT

Tropical forests have the greatest biodiversity on the planet, their floristic is composed of large trees, which gives it a high logging potential. This large amount of timber resource that makes up these vast forests needs to be better used. However, it is important to improve the estimation techniques for the correct prediction of the volume to be exploited in forest enterprises, since incorrectly estimating can result in financial damage to the company and underutilization of the raw material. The dissertation aimed to evaluate modeling scenarios, using different forms of data stratification in traditional modeling, in addition to using mixed effect modeling to predict the commercial volume of native Amazonian species, the study was divided into two chapters: the first aimed to evaluate different scenarios for the fit of volumetric models, in order to identify the strategy that results in more accurate predictions of the commercial volume of the main species explored in the Tapajos National Forest (TNF). The second objective was to fit mixed-effect models for the five main species managed in TNF and compare their accuracy in predicting commercial volume in relation to traditional modeling. The study was carried out with data collected in a Forest Management Area belonging to the Tapajos National Forest Mixed Cooperative - COOMFLONA, located in TNF, Belterra municipality, Para State. Data on diameter at breast height (dbh) and commercial height (ch) used in fit come from forest inventory and packing data of the logs of ten Annual Production Units (APU), managed, respectively, from 2007 to 2016. For the choice of the best model for each of the three scenarios, I - fit for 44 species grouped, II - fit for the five species main managed species and III - fit for five species with stratification by diametric class, the following criteria were used: Adjusted Determination Coefficient ($R_{2aj} (\%)$), standard estimation error ($S_{yx} (\%)$), Akaike Information Criterion (AIC), Bayesian Information Criterion (BIC), graphic analysis of residuals and multicollinearity. The precision of the mixed effect model was applied only in scenarios I and II, and its precision was evaluated by $S_{yx} (\%)$, AIC, BIC and graphic analysis of residuals. The generic equation, with grouped species, was better when compared to individual fit and by diametric classes for all species. The generic equation presented results higher than those found in stratification by species and by diametric class. In general, the nonlinear Schumacher and Hall model was less accurate only when compared to its mixed-effect version, which resulted in better predictions for individual volume in the two scenarios evaluated.

Key-words: Rainforest. Brazilian Amazon. Volume equations. Tapajos National Forest.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Método de Huber.....	33
Equação 2 - Método de Smalian.....	33
Equação 3 - Método de Newton.....	33
Equação 4 - Modelo simples entrada.....	34
Equação 5 - Modelo dupla entrada.....	35
Equação 6 - Coeficiente de determinação.....	51
Equação 7 - Coeficiente de determinação ajustado.....	51
Equação 8 - Erro padrão da estimativa.....	52
Equação 9 - Erro padrão da estimativa em porcentagem.....	52
Equação 10 - Resíduo em porcentagem.....	52
Equação 11 - Fator correção de Meyer.....	53
Equação 12 - Critério de informação de Akaike (AIC).....	53
Equação 13 - Critério de Informação Bayesiano (BIC).....	53
Equação 14 - Estrutura do modelo de efeito misto.....	79
Equação 15 - Estrutura do modelo de Schumacher e Hall misto.....	79
Equação 16 - Raiz quadrada do erro médio (RMSE).....	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Localização das Unidades de Produção Anual (UPAs), na Floresta Nacional do Tapajós, Estado do Pará, Brasil.	38
Figura 2 -	Correlação entre as variáveis dap, hc e v, dos dados agrupados de dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	55
Figura 3 -	Gráficos da equação proveniente dos modelos de Spurr logaritmizado e Schumacher e Hall não linear, para os dados agrupados de dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	58
Figura 4 -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall não linear para as espécies mais exploradas, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	61
Figura 5 -	Boxplots do diâmetro à altura do peito para os dados agrupados e para as cinco espécies mais exploradas, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	82
Figura 6 -	Histograma de resíduos dos modelos SHT e SHM para os dados agrupados de dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	84
Figura 7 -	Histograma de resíduos dos modelos SHT e SHM para a espécie <i>C. guianensis</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	86
Figura 8 -	Histograma de resíduos dos modelos SHT e SHM para a espécie <i>H. courbaril</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	86
Figura 9 -	Histograma de resíduos dos modelos SHT e SHM para a espécie <i>L. lurida</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	87
Figura 10 -	Histograma de resíduos dos modelos SHT e SHM para a espécie <i>M. elata</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	87
Figura 11 -	Histograma de resíduos dos modelos SHT e SHM para a espécie <i>V. maxima</i> , em seis UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Espécies mais exploradas pela Cooperativa Mista da Flona do Tapajós, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	27
Tabela 2 -	Lista de espécies selecionadas para os ajustes específicos dos modelos matemático volumétricos de dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Pará.	50
Tabela 3 -	Modelos volumétricos testados para o ajuste das equações dos três cenários, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	50
Tabela 4 -	Estatística descritiva dos dados de volume comercial individual antes e após o refinamento dos dados.	54
Tabela 5 -	Estatística de precisão para a equações genéricas, para os dados agrupados de dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	57
Tabela 6 -	Estatística de precisão das equações específicas, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	60
Tabela 7 -	Estatística de precisão das equações selecionadas para a estratificação diamétrica da espécie <i>C. guianensis</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	63
Tabela 8 -	Estatística de precisão das equações selecionadas para a estratificação diamétrica da espécie <i>H. courbaril</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	65
Tabela 9 -	Estatística de precisão das equações selecionadas para a estratificação diamétrica da espécie <i>L. lurida</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	66
Tabela 10 -	Estatística de precisão das equações selecionadas para a estratificação diamétrica da espécie <i>M. elata</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	67
Tabela 11 -	Estatística de precisão das equações selecionadas para a estratificação diamétrica da espécie <i>V. maxima</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	69
Tabela 12 -	Lista de espécies selecionadas para os ajustes específicos dos modelos volumétricos, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	77

Tabela 13 -	Equações pré-selecionadas para a predição do volume comercial individual nos respectivos cenários, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	78
Tabela 14 -	Parâmetros fixos e aleatórios da equação mista de Schumacher e Hall, para dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	83
Tabela 15 -	Estatística de precisão das equações genéricas, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	83
Tabela 16 -	Estatística de precisão das equações específicas, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	85

LISTA DE ANEXOS

Anexo A -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 10 cm e classe de 55 cm da espécie <i>M. elata</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	92
Anexo B -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 10 cm e classe de 65 cm da espécie <i>M. elata</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	92
Anexo C -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 10 cm e classe de 75 cm da espécie <i>M. elata</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	93
Anexo D -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 85 cm da espécie <i>M. elata</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	93
Anexo E -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 95 cm da espécie <i>M. elata</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	94
Anexo F -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 10 cm e classe de 105 cm da espécie <i>M. elata</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	94
Anexo G -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall não linear (10), para a amplitude de 20 cm e classe de 60 cm da espécie <i>M. elata</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	95
Anexo H -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall não linear (10), para a amplitude de 20 cm e classe de 80 cm da espécie <i>M. elata</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	95
Anexo I -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 20 cm e classe de 100 cm da espécie <i>M. elata</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	96
Anexo J -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 20 cm e classe de 120 cm da espécie <i>M. elata</i> , na Floresta Nacional do Tapajós, município de Belterra, Pará	96

Anexo K -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 50 cm e classe de 75 cm da espécie <i>M. elata</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	97
Anexo L -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 50 cm e classe de 100 cm da espécie <i>M. elata</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	97
Anexo M -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 65 cm da espécie <i>C. guianensis</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	98
Anexo N -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 10 cm e classe de 75 cm da espécie <i>C. guianensis</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	98
Anexo O -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 85 cm da espécie <i>C. guianensis</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	99
Anexo P -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 10 cm e classe de 95 cm da espécie <i>C. guianensis</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	99
Anexo Q -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 105 cm da espécie <i>C. guianensis</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	100
Anexo R -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 20 cm e classe de 70 cm da espécie <i>C. guianensis</i> , na Floresta Nacional do Tapajós, município de Belterra, Para.	100
Anexo S -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 20 cm e classe de 90 cm da espécie <i>C. guianensis</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	101
Anexo T -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 20 cm e classe de 110 cm da espécie <i>C. guianensis</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	101
Anexo U -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 50 cm e classe de 85 cm da espécie <i>C. guianensis</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	102

Anexo V -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 50 cm e classe de 135 cm da espécie <i>C. guianensis</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	102
Anexo W -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 75 cm da espécie <i>H. courbaril</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	103
Anexo X -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 85 cm da espécie <i>H. courbaril</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	103
Anexo Y -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 95 cm da espécie <i>H. courbaril</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	104
Anexo Z -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 10 cm e classe de 105 cm da espécie <i>H. courbaril</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	104
Anexo AA -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 10 cm e classe de 115 cm da espécie <i>H. courbaril</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	105
Anexo BB -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 10 cm e classe de 125 cm da espécie <i>H. courbaril</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	105
Anexo CC -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 20 cm e classe de 80 cm da espécie <i>H. courbaril</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	106
Anexo DD -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 20 cm e classe de 100 cm da espécie <i>H. courbaril</i> , na Floresta Nacional do Tapajós, município de Belterra, Para.	106
Anexo EE -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 20 cm e classe de 120 cm da espécie <i>H. courbaril</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	107
Anexo FF -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 20 cm e classe de 140 cm da espécie <i>H. courbaril</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	107

Anexo GG -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall não linear (10), para a amplitude de 50 cm e classe de 95 cm da espécie <i>H. courbaril</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	108
Anexo HH -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 50 cm e classe de 145 cm da espécie <i>H. courbaril</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	108
Anexo II -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 55 cm da espécie <i>L. lurida</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	109
Anexo JJ -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 10 cm e classe de 65 cm da espécie <i>L. lurida</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	109
Anexo KK -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 10 cm e classe de 75 cm da espécie <i>L. lurida</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	110
Anexo LL -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 85 cm da espécie <i>L. lurida</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	110
Anexo MM -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 10 cm e classe de 95 cm da espécie <i>L. lurida</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	111
Anexo NN -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 105 cm da espécie <i>L. lurida</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	111
Anexo OO -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 20 cm e classe de 60 cm da espécie <i>L. lurida</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	112
Anexo PP -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall não linear (10), para a amplitude de 20 cm e classe de 80 cm da espécie <i>L. lurida</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	112
Anexo QQ -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 20 cm e classe de 100 cm da espécie <i>L. lurida</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	113

Anexo RR -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 20 cm e classe de 120 cm da espécie <i>L. lurida</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	113
Anexo SS -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall não linear (10), para a amplitude de 50 cm e classe de 75 cm da espécie <i>L. lurida</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	114
Anexo TT -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 50 cm e classe de 125 cm da espécie <i>L. lurida</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	114
Anexo UU -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 75 cm da espécie <i>V. maxima</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	115
Anexo VV -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 85 cm da espécie <i>V. maxima</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	115
Anexo WW -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 95 cm da espécie <i>V. maxima</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	116
Anexo XX -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 105 cm da espécie <i>V. maxima</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	116
Anexo YY -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 115 cm da espécie <i>V. maxima</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	117
Anexo ZZ -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 10 cm e classe de 125 cm da espécie <i>V. maxima</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	117
Anexo AAA -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 20 cm e classe de 80 cm da espécie <i>V. maxima</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	118
Anexo BBB -	Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 20 cm e classe de 100 cm da espécie <i>V. maxima</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	118

Anexo CCC - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 20 cm e classe de 120 cm da espécie <i>V. maxima</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	119
Anexo DDD - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 20 cm e classe de 140 cm da espécie <i>V. maxima</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	119
Anexo EEE - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall não linear (10), para a amplitude de 50 cm e classe de 95 cm da espécie <i>V. maxima</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	120
Anexo FFF - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 50 cm e classe de 145 cm da espécie <i>V. maxima</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	120
Anexo GGG - Validação das melhores equações por cenário, através do Teste <i>Qui-quadrado</i> a 95% de probabilidade em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	121
Anexo HHH - Dispersão dos resíduos do modelo SHM para as espécies agrupadas com, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	123
Anexo III - Estimativa dos Parâmetros fixos e aleatórios para a espécie <i>C. guianensis</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	123
Anexo JJJ - Estimativa dos Parâmetros fixos e aleatórios para a espécie <i>H. courbaril</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	124
Anexo KKK - Estimativa dos Parâmetros fixos e aleatórios para a espécie <i>L. lurida</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	124
Anexo LLL - Estimativa dos Parâmetros fixos e aleatórios para a espécie <i>M. elata</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	125
Anexo MMM - Estimativa dos Parâmetros fixos e aleatórios para a espécie <i>V. maxima</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	125
Anexo NNN - Dispersão dos resíduos do modelo SHM para a espécie <i>C. guianensis</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	126
Anexo OOO - Dispersão dos resíduos do modelo SHM para a espécie <i>H. courbaril</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	126
Anexo PPP - Dispersão dos resíduos do modelo SHM para a espécie <i>L. lurida</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....	127

Anexo QQQ - Dispersão dos resíduos do modelo SHM para a espécie <i>M. elata</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	127
Anexo RRR - Dispersão dos resíduos do modelo SHM para a espécie <i>V. maxima</i> , em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.	128

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	24
1.1	OBJETIVOS	26
1.1.1	Objetivo Geral.....	26
1.1.2	Objetivos Específicos	26
2	REVISÃO DE LITERATURA	27
2.1	POTENCIAL MADEIREIRO	27
2.2	MANEJO FLORESTAL	28
2.3	EXPLORAÇÃO DE IMPACTO REDUZIDO (EIR)	29
2.4	FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS - MANEJO COMUNITÁRIO	30
2.5	HISTÓRICO DA COOPERATIVA MISTA DA FLONA TAPAJÓS	31
2.6	VOLUMETRIA	32
2.6.1	Cubagem rigorosa.....	32
2.7	MODELAGEM VOLUMÉTRICA	34
2.7.1	Modelos tradicionais.....	34
2.7.2	Modelos de efeitos mistos	36
2.8	ÁREA DE ESTUDO	37
	REFERÊNCIAS	39
	CAPÍTULO I - PREDIÇÃO VOLUMÉTRICA DE ESPÉCIES COMERCIAIS EM UMA	
	ÁREA SOB CONCESSÃO NA AMAZÔNIA ORIENTAL	46
1	INTRODUÇÃO	48
2	MATERIAL E MÉTODOS	49
2.1	COLETA DE DADOS	49
2.2	AJUSTE E SELEÇÃO DOS MODELOS	50
2.2.1	Coefficiente de determinação	51
2.2.2	Erro padrão da estimativa	51
2.2.3	Análise gráfica.....	52

2.2.4	Multicolinearidade.....	52
2.2.5	Fator correção de Meyer (FCM)	52
2.2.6	Critério de informação de Akaike (AIC)	53
2.2.7	Critério de Informação Bayesiano (BIC)	53
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
3.1	ESTATÍSTICA DESCRITIVA	54
3.2	AJUSTE DOS MODELOS	55
3.2.1	Modelo genérico	55
3.2.2	Ajuste específicos	58
3.2.3	Estratificações por classe diamétrica	62
3.2.3.1	<i>C. guianensis</i>	63
3.2.3.2	<i>H. courbaril</i>	64
3.2.3.3	<i>L. lurida</i>	65
3.2.3.4	<i>M. elata</i>	67
3.2.3.5	<i>V. maxima</i>	68
3.3	VALIDAÇÃO.....	70
4	CONCLUSÕES.....	70
	REFERÊNCIAS	71
CAPÍTULO II - MODELAGEM DE EFEITO MISTO PARA PREDIÇÃO VOLUMÉTRICA DE CINCO ESPÉCIES COMERCIAIS EM UMA ÁREA SOB CONCESSÃO NA AMAZÔNIA ORIENTAL		74
1	INTRODUÇÃO	76
2	MATERIAL E MÉTODOS	77
2.1	COLETA DE DADOS	77
2.2	AJUSTE E SELEÇÃO DOS MODELOS	78
2.2.1	Raiz quadrada do erro médio (RMSE).....	79
2.2.2	Critério de informação de Akaike (AIC).....	80
2.2.3	Critério de Informação Bayesiano (BIC)	80

2.2.4	Análise gráfica.....	80
3	RESULTADOS	81
3.1	ESTATÍSTICA DESCRITIVA	81
3.2	AJUSTE DOS MODELOS	82
3.2.1	Modelo genérico	82
3.2.2	Ajuste específicos	85
4	CONCLUSÕES.....	88
	REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO GERAL

As florestas tropicais são ecossistemas de grande complexidade compostos por uma grande diversidade de espécies, a vasta quantidade de recursos dessas florestas desempenham um papel crucial na subsistência de milhões de pessoas. A Amazônia detém a maior extensão contínua de floresta tropical remanescente do mundo, aproximadamente 5,5 milhões de km², e tem como um dos principais usos da terra a exploração madeireira, sendo fundamental para a economia regional (PHILLIPS *et al.*, 2004; VAN GARDINGEN *et al.*, 2006).

No contexto de grande potencial madeireiro que a Amazônia possui, a correta estimativa da volumetria da área a ser explorada é importante, visto que a estimativa incorreta pode influenciar de forma negativa os resultados gerenciais da empresa, acarretando prejuízos econômicos e até mesmo danos ambientais, implicando ainda no subaproveitamento de seus recursos (RANGEL *et al.*, 2006; RUFINI *et al.*, 2010; STEPKA *et al.*, 2017). Para estimativa do volume das árvores é necessário a execução de inventários florestais, onde, com base em variáveis coletadas, são ajustados modelos estatísticos para estimar o volume da área que será manejada (LEITE; ANDRADE, 2002; SOARES *et al.*, 2011; SILVA; SANTANA, 2014).

As equações comumente empregadas são aquelas em que volume comercial ou total constitui a variável dependente, estando as variáveis independentes representadas pelo diâmetro à altura do peito e pela altura total das árvores (MACHADO; CONCEIÇÃO; FIGUEIREDO, 2002). Porém, devido à altura total ser uma variável de difícil obtenção em florestas densas e de dossel superior elevado, passou a se utilizar dados de romaneio para o ajuste de modelos volumétricos, onde, a soma dos comprimentos das toras obtidas no romaneio corresponde à altura comercial das árvores (SOARES; NETO; SOUZA, 2011; SILVA-RIBEIRO; GAMA; MELO, 2014).

Na Amazônia, comumente são ajustados modelos genéricos para a estimativa volumétrica, esse tipo de modelo considera todas as espécies que serão manejadas, no entanto, são desprezadas as diferentes características e forma do fuste, espécie e tamanho das árvores, resultando em maior amplitude de erro e em menor precisão das estimativas. Alguns autores demonstram que o ajuste de equações volumétricas, desenvolvidas especificamente para as áreas de manejo florestal, constitui o procedimento mais eficiente, econômico e com precisão aceitável para a quantificação da produção madeireira da floresta (BARROS; SILVA JUNIOR, 2009; GOMES *et al.*, 2018; SANTOS *et al.*, 2019).

Além disto, a espécie é considerada um dos fatores que leva as equações de volume a ter suas aplicações restritas, além da área e idade (COUTO; BASTOS, 1987). Isto ocorre devido as diferentes condições de clima e solo que influenciam no crescimento e nas relações

alométricas da árvore. Dessa forma, o desenvolvimento de modelos baseados em dados de um povoamento ou região sujeita a condições uniformes de clima e de solo permitem aos produtores florestais ferramentas que possibilitam a estimação mais exata das variáveis (SOARES; NETO; SOUZA, 2011; VALENTE *et al.*, 2011).

Inúmeros métodos de modelagem são testados para aumentar a precisão das estimativas do volume de espécies comerciais, principalmente nos últimos anos (OLIVEIRA *et al.*, 2017; LANSSANOVA *et al.*, 2018; DOLÁCIO *et al.*, 2019 e NASCIMENTO *et al.*, 2020), em que foram buscadas alternativas com o emprego de modelos não lineares, modelos de afilamento e modelos de efeito misto para melhores estimativas. Vale ressaltar que atualmente a modelagem de efeito misto é empregada principalmente em florestas plantadas. Desta forma, surge como uma nova alternativa a ser testada na floresta amazônica.

Os modelos de efeito misto são considerados como uma das técnicas mais sofisticadas de regressão, que possibilita a utilização de dados originais sem a necessidade de transformação das variáveis para atender as pressuposições como independência entre as observações, distribuição aleatória, normal e idêntica dos resíduos com média zero e variância constante que são básicas na análise de regressão (LAPPI, 1991).

A modelagem de efeito misto, em algumas situações permite generalizar estruturas de correlações espaço-temporais, variâncias não constantes, e em modelos generalizados de efeito misto (GLMN) permite-se generalizações de famílias de distribuições de probabilidade (CARVALHO, 2013). Além disto, consideram a presença de efeitos fixos e aleatórios na base de dados (PERRI; IEMMA, 1999; CALEGARIO *et al.*, 2015). A parte aleatória é incluída no modelo tradicional, apenas com variáveis fixas, por meio de uma matriz de variância e covariância.

Diante da constante necessidade de obter estimativas mais precisas para o volume comercial foi avaliado diferentes métodos de estratificação, além a aplicação da modelagem de efeitos mistos na predição do volume de espécies amazônicas. É esperado que a estimativa volumétrica utilizando estratificações a nível de espécie ou em classes de diâmetro sejam mais precisas em relação aos modelos genéricos e que a utilização da técnica da modelagem de efeitos mistos gere melhor as estimativas volumétricas em relação a modelagem apenas com efeitos fixos. O estudo foi dividido em dois capítulos: o primeiro teve como objetivo, testar diferentes cenários para o ajuste de modelos volumétricos, a fim de identificar a estratégia que resulte em predições mais precisas do volume comercial das principais espécies manejadas na Floresta Nacional do Tapajós. O segundo capítulo visou ajustar modelos mistos e avaliar a precisão na predição do volume das principais espécies manejadas na Flona do Tapajós.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

- Avaliar cenários de modelagem, utilizando diferentes formas de estratificação de dados na modelagem tradicional, além de utilizar a modelagem de efeito mista para predição do volume comercial de espécies nativas da Amazônia.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Selecionar equações genéricas e específicas de cinco espécies para a estimativa do volume comercial individual;
- Estratificar as espécies por classes diamétricas e avaliar a precisão das estimativas;
- Comparar a modelagem mista com a tradicional para predição de volume comercial de espécies nativas da Amazônia.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 POTENCIAL MADEIREIRO

O Brasil é um dos principais produtores de madeira proveniente de florestas nativas do mundo e isso tem relação com o grande potencial madeireiro da Amazônia brasileira, que representa aproximadamente um terço da floresta tropical mundial. Detém uma rica biodiversidade composta de árvores de grande porte o que lhe atribui um significativo potencial madeireiro e é onde estão localizadas cerca de 92% das florestas públicas. Essa grande oferta de recursos florestais desperta intenso comércio e potencializa a produção, estimada em 60 bilhões de metros cúbicos de madeira em tora, cujo valor econômico pode alcançar quatro trilhões de reais em madeira serrada (BARROS; VERÍSSIMO, 2002; ITTO, 2019; SFB, 2019).

A produção de madeira em 2016 foi de aproximadamente 10.6 milhões de metros cúbicos em tora, os estados do Pará e Mato Grosso são responsáveis por 62,4% do total produzido, somente o estado do Pará manejou 3.3 milhões de metros cúbicos (SFB, 2019). Desse total, cerca de 33 mil metros cúbicos foram provenientes do manejo comunitário realizado na Floresta Nacional do Tapajós que tem como espécies mais exploradas: *Apuleia molaris* Spruce ex Benth., *Astronium lecointei* Ducke, *Bagassa guianensis* Aubl., *Cedrelinga catenaeformis* Ducke, *Couratari guianensis* Aubl., *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos, *Hymenaea courbaril* L., *Hymenaea parvifolia* Huber, *Hymenolobium petraeum* Ducke, *Lecythis lurida* (Miers) S.A. Mori, *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach., *Mezilaurus itauba* (Meisn.) Taub. ex Mez, *Pouteria pachycarpa* TD Penn, *Vatairea paraensis* Ducke, *Vochysia maxima* Ducke (Tabela 1).

Tabela 1 - Espécies mais exploradas pela Cooperativa Mista da Flona do Tapajós, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

(Continua)

Nome comum	Nome científico	Família	ρ_{ap}
Angelim-pedra	<i>Hymenolobium petraeum</i> Ducke	Fabaceae	0,71
Cedrorana	<i>Cedrelinga catenaeformis</i> Ducke	Fabaceae	0,52
Fava-amargosa	<i>Vatairea paraensis</i> Ducke	Fabaceae	0,93
Garapeira	<i>Apuleia leiocarpa</i> (J. Vogel) J. F. Macbr	Fabaceae	0,83
Goiabão	<i>Pouteria pachycarpa</i> TD Penn	Sapotaceae	0,93
Ipê-roxo	<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	Bignoniaceae	0,84
Itauba	<i>Mezilaurus itauba</i> (Meisn.) Taub. ex Mez	Lauraceae	0,96
Jarana	<i>Lecythis lurida</i> (Miers) S.A. Mori	Lecythidaceae	0,93
Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Fabaceae	0,80

Em que: ρ_{ap} = densidade aparente em g.cm⁻³.

Fonte: IPT (2013, 2019).

Tabela 1 - Espécies mais exploradas pela Cooperativa Mista da Flona do Tapajós, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

(Conclusão)			
Nome comum	Nome científico	Família	ρ_{ap}
Jutaí-mirim	<i>Hymenaea parvifolia</i> Huber	Fabaceae	0,96
Maçaranduba	<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach.	Sapotaceae	0,83
Muiracatiara	<i>Astronium lecointei</i> Ducke	Anacardeaceae	0,97
Quaruba	<i>Vochysia maxima</i> Ducke	Vochysiaceae	0,49
Tatajuba	<i>Bagassa guianensis</i> Aubl.	Moraceae	0,82
Tauari	<i>Couratari guianensis</i> Aubl.	Lecythidaceae	0,50

Em que: ρ_{ap} = densidade aparente em g.cm⁻³.

Fonte: IPT (2013, 2019).

2.2 MANEJO FLORESTAL

O manejo florestal (MF) é parte da ciência que trata dos princípios referentes à produção contínua e sustentada dos produtos madeireiros, de acordo com o sistema utilizado e as normas que o regulamentam (HIGUCHI, 1994). O MF com enfoque em extração madeireira, consiste na exploração planejada de madeira por meio da Exploração de Impacto Reduzido (EIR). Além disto, a sua finalidade básica é manter o potencial produtivo da floresta, por meio de prescrição e aplicação de tratamentos silviculturais (GAMA, 2005; SABOGAL *et al.*, 2009).

Segundo o Código Florestal Brasileiro, Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, o manejo florestal consiste em administrar a vegetação natural para a obtenção de benefícios econômicos, sociais e ambientais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema objeto do manejo e considerando-se, cumulativa ou alternativamente, a utilização de múltiplas espécies madeireiras ou não, de múltiplos produtos e subprodutos da flora, bem como a utilização de outros bens e serviços (BRASIL, 2012).

Em relação a legislação que trata do manejo florestal, Souza (2015) afirmou que a prática do manejo no Brasil começou a se caracterizar no que é hoje, a partir da Instrução Normativa nº 80, de 24/09/1991, onde foram determinadas ações objetivas, dentre as quais o ciclo de corte mínimo de 20 anos. A partir da instrução normativa do ministério do meio ambiente (MMA) nº4, de 04/02/2002, o plano de manejo florestal passou a contemplar as modalidades de manejo empresarial, manejo em pequena escala, manejo comunitário e em florestas de palmeiras. Além disto a instrução normativa requer o censo das árvores, exceto para sistemas tradicionais de exploração, que consistem na exploração abaixo de 10 m³/ha com uso da força de trabalho familiar, tração animal e a técnica calango (AZEVEDO, 2006).

O MF está regulamentado pelo Decreto nº 5.975/2006, Instruções normativas MMA 04 e 05/2006 e Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) 406/2009 como

regime legal para extração de madeira da Floresta Amazônica. O Decreto nº 5.975/2006 trata que a exploração de florestas e formações sucessoras sob o regime de manejo florestal, tanto de domínio público como de domínio privado, dependerá de prévia aprovação do Plano de Manejo Florestal (PMF) pelo órgão competente do Sistema Nacional do Meio Ambiente SISNAMA (BRASIL, 2006; ESPADA *et al.*, 2014).

Já a Resolução Conama nº 406 de 02 de fevereiro de 2009, estabelece os parâmetros técnicos a serem adotados na elaboração, apresentação, avaliação técnica e execução de PMF com fins madeireiros, para florestas nativas. Nesta Instrução Normativa ficaram estabelecidos que a intensidade de exploração é de no máximo 30 m³/ha com ciclo de 30 a 35 anos para áreas com exploração mecanizada. Para áreas sem mecanização a intensidade de exploração deve ser de no máximo 10 m³/ha e ciclo mínimo de dez anos (BRASIL, 2009).

2.3 EXPLORAÇÃO DE IMPACTO REDUZIDO (EIR)

É um conjunto de atividades que envolvem o planejamento prévio e a utilização de técnicas específicas para a extração de madeira nativa. A implementação dessas técnicas visa minimizar os danos a vegetação remanescente a ao solo, preservar o mecanismo de regeneração da floresta permitindo sua recuperação até a próxima colheita, reduzir os custos da atividade e o número de acidentes de trabalho (BARRETO, 1998; SABOGAL *et al.*, 2000; HIRAI *et al.*, 2012; ESPADA *et al.*, 2014).

O MF requer a aplicação dessas técnicas de EIR, onde deve ser respeitado três etapas: atividades pré-exploratórias, atividades exploratórias e atividades pós-exploratórias. A fase pré exploratória inicia-se dois anos antes da exploração com a abertura das trilhas para o inventário 100%. Um ano antes é pedido o licenciamento da colheita a partir da elaboração do Plano Operacional Anual (POA). Após a aprovação, é realizado o corte de cipós presentes nas árvores que serão derrubadas. E por último, alguns meses antes da colheita é realizado a delimitação das estradas principais e dos pátios de estocagem (AMARAL *et al.*, 1998; CASTRO, 2012; MARTINHAGO, 2012).

As atividades exploratórias consistem previamente na realização da orientação de pequenas trilhas marcadas com balizas e fitas plásticas, em cores que facilitem sua visualização, confecção de mapas para conferência da equipe de derruba e arraste. Após isso é realizada a derruba das árvores e seu arraste de acordo com a legislação. Já as atividades pós-exploratórias consistem em aplicação de tratamentos silviculturais e monitoramento da vegetação remanescente através de medições anuais realizadas em parcelas permanentes (CASTRO, 2012; MARTINHAGO, 2012).

2.4 FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS - MANEJO COMUNITÁRIO

A Floresta Nacional do Tapajós (FNT) é uma unidade de conservação criada pelo decreto nº 73.684 de fevereiro de 1974. Possui uma área de 527.319 ha, e está localizada no oeste do Pará, nos municípios de Belterra, Aveiro, Rurópolis e Placas (IBAMA, 2004). Segundo o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) a FLONA é enquadrada na categoria de Uso Sustentável, sendo permitido o manejo de parte de seus recursos naturais.

De acordo com levantamento realizado em 2014, a FNT abriga cerca de 726 famílias distribuídas em 23 comunidades localizadas as margens do rio Tapajós e ao longo da BR 163 e três aldeias da etnia Munduruku (SILVA, 2018; ICM BIO, 2019). Em unidades de conservação de uso sustentável há uma série de usos permitidos relacionados à segurança alimentar e geração de renda financeira, dentre os quais, tem-se a extração de produtos da floresta, por meio do manejo florestal familiar ou comunitário (ESPADA *et al.*, 2018).

Com o intuito de explorar os recursos naturais de forma racional. Em 2005 decidiu-se implantar o MF comunitário por meio de iniciativas do Projeto de Apoio ao MF na Amazônia (PROMANEJO) (MELO *et al.*, 2011), qual tinha o objetivo de promover a adoção de sistemas sustentáveis de MF na Amazônia, com ênfase em produtos madeireiros, por meio de ações estratégicas e projetos demonstrativos (VERÍSSIMO, 2005; MEDINA; POKORNY, 2011).

Essa forma de manejo implantada na FNT teve como objetivo organizar ações de gestão e fomento ao manejo sustentável em florestas que sejam objeto de utilização pelos agricultores familiares, assentados da reforma agrária, pelos povos e comunidades tradicionais (BRASIL, 2009). Além disto o manejo florestal comunitário é entendido como um potencial para gerar renda e trabalho para os produtores familiares da Amazônia e contribuir para a manutenção das florestas (MEDINA; POKORNY, 2011).

A FNT foi a primeira FLONA do país a estabelecer um Conselho Consultivo nos moldes preconizados pela Lei do SNUC e ditada em julho de 2000. Sendo oficializado pelo Regimento Interno anexo à Portaria Nº 84/2001 de 29 de junho de 2001, conforme descrito por Santos (2014) os seus objetivos são: Contribuir para o aprimoramento de uma política pública florestal que possa garantir o desenvolvimento da sociedade e a conservação dos recursos naturais; Promover a gestão e o planejamento da FNT, de forma consultiva e propositiva, envolvendo os diversos grupos da sociedade e do poder público; Contribuir, como experiência piloto, para a gestão participativa em outras Unidades de Conservação.

Na FNT o manejo florestal vem sendo realizado pela Cooperativa Mista da Floresta Nacional do Tapajós (COOMFLONA) em parceria com os comunitários residentes na unidade de conservação. Os cooperados se dividem em funções administrativas, técnicas e operacionais

para a gestão do Empreendimento Florestal Comunitário (EFC) e a realização das atividades de campo. Essa modalidade de empreendimento florestal vem proporcionando benefícios financeiros substanciais para a população local que depende da floresta, só no ano de 2013 foi gerado mais de USD 1,5 milhões. Desta forma, incentivar o EFC é uma alternativa para promover o desenvolvimento econômico rural, alívio da pobreza, e uma redução da taxa de desmatamento tropical (MELO *et al.*, 2011, ESPADA, 2015; HUMPHRIES *et al.*, 2020).

2.5 HISTÓRICO DA COOPERATIVA MISTA DA FLONA TAPAJÓS

Em 2005 teve início o Projeto Ambé, com área total destinada ao manejo florestal madeireiro de 32.586,560 ha, subdividido em duas áreas denominadas de Samambaia com 13.591,69 ha e Anambé com 18.994.87 ha, que consistiu em um projeto piloto de manejo florestal comunitário na área destinada a uso intensivo da unidade de conservação, gerando benefícios diretos às comunidades e servindo de modelo de exploração sob gestão comunitária. No mesmo ano, foi fundada a COOMFLONA, composta inicialmente por 21 sócios, como forma organizativa para implementar o manejo (CRUZ *et al.*, 2011). Atualmente a cooperativa conta com 203 cooperados, além de 120 manejadores que trabalham de forma alternada nas atividades de campo.

As atividades da COOMFLONA tiveram início com o PROMANEJO, que foi um dos projetos do Programa Piloto de Proteção de Florestas Tropicais (PPG7) e atuou durante 11 anos na FNT, por meio de financiamentos do Banco Alemão de Desenvolvimento (KFW) (VERÍSSIMO, 2005). As atividades de manejo florestal da cooperativa iniciaram em nível experimental em 2006 com uma unidade de produção anual de 100 ha e foi aumentando gradativamente. Atualmente são exploradas cerca 1.600 ha, onde são retirados 125.000 m³ano⁻¹, de um grupo de 24 espécies.

Durante os 3 primeiros anos de atividade, a cooperativa recebeu apoio financeiro do PROMANEJO, o qual foi finalizado em 2007, com a extinção da parceria. Desde então, a cooperativa passou a ser independente financeiramente (SILVA-RIBEIRO, 2013). Para desenvolver o Plano de Manejo, a cooperativa contou com apoio técnico de diversas instituições, como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), a Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), o Instituto Internacional de Educação do Brasil (IEB), o Instituto Natureza Amazônia (INAN), o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Atualmente a COOMFLONA conta com a certificação *Forestry Stewardship Council* (FSC), com o selo a cooperativa acessa mercados mais exigentes, preocupados com a origem do produto.

2.6 VOLUMETRIA

O volume constitui uma das informações de maior importância para o conhecimento do potencial disponível em um povoamento florestal, haja vista que o volume individual fornece subsídios para a avaliação do estoque de madeira e análise do potencial produtivo das florestas (THOMAS *et al.*, 2006). Estimando-se os volumes com precisão, os planos de manejo, as análises de investimento e as tomadas de decisão também serão precisos (RUFINI *et al.*, 2010).

Devido ao fuste de uma árvore não ser um cilindro perfeito, possuindo diferentes formas, existem alguns procedimentos para a determinação do seu volume (SOARES; NETO; SOUZA, 2011). Entre eles, o método do xilômetro, cubagem rigorosa e ajuste de modelos volumétricos. Deste, o princípio do xilômetro é o método considerado mais preciso para determinar o volume e é efetuado por meio do deslocamento de água em um xilômetro (STERNADT, 2001; MACHADO *et al.*, 2006).

2.6.1 Cubagem rigorosa

A cubagem rigorosa consiste na determinação do volume das árvores por meio da divisão do fuste em n seções (toras) e somatório do volume de cada uma dessas toras (CYSNEIROS, 2016). A cubagem pode ser realizada com a derrubada da árvore (método destrutivo) ou com a árvore em pé (método não-destrutivo). Nesse último caso, a árvore pode ser escalada, ou os dados coletados com o emprego de instrumentos como: o relascópio, telerelescópio, pentaprisma ou dendrômetro óptico (LIMA, 2015).

Os métodos de cubagem rigorosa podem ser divididos em métodos absolutos e relativos. Os métodos absolutos são aqueles em que o comprimento da seção não tem vínculo com o comprimento total da árvore. No método relativo, o comprimento da seção ou tora representa um percentual do comprimento total da árvore, permitindo a comparação dos volumes individuais de árvores de tamanho diferente, porém com a mesma forma (CABACINHA, 2003). As principais fórmulas utilizadas na cubagem rigorosa são: Huber, Smalian e Newton.

O método de Huber (1), em algumas situações, apresentar maior precisão que métodos como o de Newton e principalmente em relação ao método de Smalian. Quando constatada sua maior precisão é preferível sua utilização, principalmente pela facilidade de se obter apenas o diâmetro central da tora, por apresentar custo menor em relação a utilização de outros métodos que requerem maior esforço para a obtenção dos diâmetros ao longo da tora (FIGUEIREDO FILHO; MACHADO; CARNEIRO, 2000; MACHADO *et al.*, 2006; MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006).

$$v = g_{1/2} * l \quad (1)$$

Em que: v: volume da seção em m³; g_{1/2}: área transversal no meio da seção em m² e l: comprimento da seção em m.

A cubagem rigorosa pelo método de Smalian (2) consiste na medição dos diâmetros ou circunferências nas extremidades de cada seção da tora. De forma geral esse método apresenta sempre os piores resultados quando comparado a outros métodos, no entanto, isso não ocorre quando utilizado em seções pequenas de 20 e 30 cm, obtendo bons resultados como os de Huber (YOUNG; ROBBINS; WILSON, 1967 FIGUEIREDO FILHO; MACHADO; CARNEIRO, 2000; MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006). O volume da seção por esse método é dado por:

$$v = \frac{g_1 + g_2}{2} * l \quad (2)$$

Em que: v: volume da seção em m³; g₁ e g₂: área transversal obtidas nas extremidades da seção em m² e l: comprimento da seção (m).

Já o método de Newton (3) se destaca por sua precisão, proporcionada pelo número maior de medições de diâmetros numa determinada seção da tora, trazendo bons resultados assim como Huber. No entanto, Campos (1988) afirmou que independentemente da fórmula utilizada para cálculo do volume, quanto menor for o comprimento da seção, mais acurada será sua determinação volumétrica. Nesse método os diâmetros ou circunferências devem ser medidos em três posições na seção, sendo mais trabalhoso em relação aos demais métodos (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006). Seu volume é dado por:

$$v = \frac{g_1 + 4 * g_{1/2} + g_2}{6} * l \quad (3)$$

Em que: v: volume da seção em m³; g₁, g₂ e g_{1/2}: área transversal obtidas nas extremidades e no meio da seção em m², respectivamente e l: comprimento da seção em m.

2.7 MODELAGEM VOLUMÉTRICA

Foi na primeira metade do século XX que começaram os trabalhos voltados para a predição do volume individual das árvores por meio de modelagens que usavam variáveis independentes como diâmetro e altura para predizer a volumetria da árvore usando técnicas de regressão. No entanto, foi com os avanços tecnológicos e o surgimento dos computadores que o uso dessas técnicas foi impulsionado e a partir da década de 50 (MACHADO; CONCEIÇÃO; FIGUEIREDO, 2002).

2.7.1 Modelos tradicionais

A utilização de modelos volumétricos é considerada o procedimento mais eficiente para a quantificação da produção em volume de um povoamento florestal (GUIMARÃES; LEITE, 1996). Inúmeros modelos estatísticos foram criados e testados para o ajuste de equações de volume.

Apesar do uso ter consagrado alguns desses modelos, nenhum deles será sempre o de melhor performance para todas as espécies e condições. Por isto, é recomendável testar vários deles para que por meio de análises estatísticas possa identificar o melhor modelo para cada situação (MACHADO; CONCEIÇÃO; FIGUEIREDO, 2002).

Os modelos volumétricos mais utilizados são aqueles em que o volume constitui a variável dependente, e o diâmetro à altura do peito (dap com ou sem casca) e a altura total (h) ou altura comercial como variáveis independentes (GUIMARÃES; LEITE, 1996; MACHADO; CONCEIÇÃO; FIGUEIREDO, 2002).

Modelos de simples entrada são modelos que explicam o volume por meio de uma única variável, no caso o diâmetro medido à 1,30 metro de altura (SCOLFORO, 2005). Como exemplo de modelo de simples entrada, temos o modelo de Husch (4).

$$\ln(vc/c) = \beta_0 + \beta_1 \ln(dap) + \varepsilon \quad (4)$$

Em que: vc/c: volume total da árvore com casca (m³); dap: diâmetro a 1,30m do solo (cm); β_0 e β_1 : parâmetros do modelo; ln: logaritmo neperiano; ε : erro aleatório.

Modelos de dupla entrada são aqueles que explicam o volume por meio de duas variáveis, no caso o dap e a altura total ou comercial. Este procedimento é utilizado na maioria das situações já que normalmente não existe uma forte correlação hipsométrica, assim a altura

e o diâmetro são utilizados para explicar o volume (SCOLFORO, 2005). Como exemplos de modelo de dupla entrada, temos o modelo de Schumacher e Hall, expresso pela equação 5.

$$\ln(vc/c) = \beta_0 + \beta_1 \ln(dap) + \beta_2 \ln(hc) + \varepsilon \quad (5)$$

Em que: vc/c: volume total da árvore com casca (m³); dap: diâmetro a 1,30m do solo (cm); hc: altura comercial, em m; β_0 e β_1 : parâmetros do modelo; ln: logaritmo neperiano; ε : erro aleatório.

Nos modelos de tripla entrada, o volume é estimado em função do diâmetro, da altura e de uma medida que expressa a forma da árvore (f). Este tipo de modelo não é recomendável, já que a forma da árvore é uma variável difícil de ser quantificada, e quando se faz cubagem rigorosa, esta já é controlada. Por este motivo a variável forma usualmente não é significativa nos modelos (CABACINHA, 2003).

Para Guimarães e Leite (1996) dentre os vários modelos existentes para expressar o volume de madeira em função do diâmetro e altura, o modelo logarítmico de Schumacher e Hall tem sido normalmente apontado como o mais eficiente para expressar esta relação funcional. A escolha do modelo ocorre devido as suas propriedades estatísticas, uma vez que resulta quase sempre em estimativas não tendenciosas. Por outro lado, a grande difusão do modelo de Spurr na forma de variável combinada deve ser atribuída mais à facilidade de ajustamento, pois, com frequência, volumes de árvores menores são estimados com imprecisão (CAMPOS; LEITE, 2009). Na Amazônia, a utilização desses dois modelos é confirmada nos estudos de Cruz *et al.* (2019) e Silva-Ribeiro; Gama e Melo (2014).

Cruz *et al.* (2019), ao avaliar a eficiência da predição volumétrica para *Lecythis lurida* em uma área de manejo florestal na Floresta Nacional do Tapajós, identificou que o modelo de Spurr variável combinada apresentou as predições mais precisas para a espécie estudada. De modo geral a superioridade estatística dos modelos de dupla entrada ocorre devido os modelos de simples entrada assumirem que árvores de mesmo diâmetro possuem a mesma altura, o que não é verdadeiro para florestas heterogêneas.

Silva-Ribeiro; Gama e Melo (2014), ao avaliarem a eficiência da estimativa volumétrica para três espécies em uma área de manejo florestal na Floresta Nacional do Tapajós, também verificou a superioridade dos modelos de dupla entrada em todos cenários analisados. Escolhendo o modelo de Schumacher e Hall como o mais preciso.

2.7.2 Modelos de efeitos mistos

Consideram variáveis observáveis, chamadas de efeito fixo, comuns a todas as observações da amostra, e variáveis não observáveis conhecidas como efeitos aleatórios, específicos a cada observação. Esses modelos propõem avaliar diferentes grupos como efeitos aleatórios, inserindo o efeito das estruturas de variância e covariância dos grupos para minimizar os erros de precisão e melhorar as estimativas (PINHEIRO; BATES, 2000). A análise da parte aleatória consiste na predição dos efeitos aleatórios, na presença de efeitos fixos e a análise da parte fixa consiste de estimação e testes de hipóteses sobre funções estimáveis dos efeitos fixos. Em geral, ambos dependem da estimação dos componentes de variância (PERRI; IEMMA, 1999).

A utilização desses modelos é considerada uma das técnicas de regressão mais sofisticadas, para relações empíricas lineares e não lineares. Possibilitam ao usuário trabalhar com os dados originais sem a necessidade de transformar variáveis para atender as pressuposições básicas de análise de regressão, que são: independência entre as observações, distribuição aleatória, normal e idêntica dos resíduos com média zero e variância constante (CARVALHO, 2013).

Dentre as diversas utilizações destes modelos na ciência florestal, é possível destacar a sua utilização em estudos de estimativas de área basal, volume e afilamento de espécies florestais (CARVALHO, 2013). Em estudos mais recentes que avalia a eficiência da modelagem mista na análise de afilamento de *Pinus taeda* L., Nicoletti *et al.* (2020) observaram que a modelagem mista linear generalizada melhorou a distribuição de probabilidades para a relação diâmetro, altura.

Em estudo realizado por Dantas *et al.* (2020) que avaliou o desempenho modelagem de efeito misto e o treinamento de redes neurais para estimar o volume de troncos de árvores de *Eucalyptus* spp., foi concluído que a utilização do modelo de efeitos mistos multinível não lineares e o aprendizado das redes neurais geram estimativas mais precisas para o volume das árvores quando comparados ao modelo de regressão de efeitos fixos sozinho.

Outros estudos foram desenvolvidos nos últimos anos como o de Nicoletti *et al.* (2019) que avalia e compara as estimativas dos volumes parciais de *Pinus taeda* L. pela mista não linear em relação à tradicional, os autores concluíram que apesar da modelagem mista apresentar grande potencial as estimativas dos volumes parciais foram mais precisas com o polinômio de 5º grau apenas com efeitos fixos. Modelos mistos foram testados para a estimativa do volume de *Eucalyptus* no Estado de Pernambuco, os autores observam que modelos mistos apresentaram melhores resultados quando comparado com o modelo de Schumacher e Hall,

sendo considerado mais eficaz para a modelagem do volume da espécie (GOUVEIA *et al.*, 2015).

A alta precisão desses modelos foi observada em estudos para predição de área basal e volume total do híbrido de *Eucalyptus urocamaldulensis*, obtendo erros de 12% para a estimativa da área basal e 4% para predição do volume (CARVALHO *et al.*, 2011). Em outro estudo com árvores clonais de *Eucalyptus*, o modelo logístico misto relativizado explica melhor as variações do afilamento do fuste das árvores e recomenda-se sua utilização para descrever as variações da altura, bem como para a estimativa dos volumes individuais (CARVALHO *et al.*, 2014).

Ao avaliarem a estimativa do crescimento e da produção em área basal para povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, utilizando a modelagem linear mista, Calegario *et al.* (2004) identificaram que o modelo linear misto gerou estimativas precisas para os efeitos idade e unidade amostral. Outro estudo que avalia a estimativa do crescimento de um povoamento de *Eucalyptus* spp. baseada na teoria dos modelos não lineares em multinível de efeito misto, os autores observaram que a utilização desta modelagem melhorou significativamente os valores do erro padrão, esta melhora ocorreu depois da utilização dos efeitos fixos e aleatórios em conjunto com a modelagem da heterogeneidade da variância e da autocorrelação (CALEGARIO *et al.*, 2005).

Na região amazônica, recentemente, alguns estudos foram desenvolvidos com esse tipo de modelagem, Nascimento *et al.* (2020) avaliaram a predição da altura para espécies amazônicas com o uso de modelos de efeito misto, eles concluíram que o emprego desse tipo de modelagem pode fornecer predições mais acuradas. Já Dolácio *et al.* (2019) desenvolveram estudo com modelos de efeitos mistos para a predição do volume comercial de um povoamento da espécie *Swietenia macrophylla* no estado do Pará. Com base em seus resultados os autores obtiveram resultados promissores em relação a este tipo de modelagem, concluindo que a adição de efeitos mistos ao modelo de Schumacher e Hall não linear é mais preciso do que seu modelo apenas com efeitos fixos.

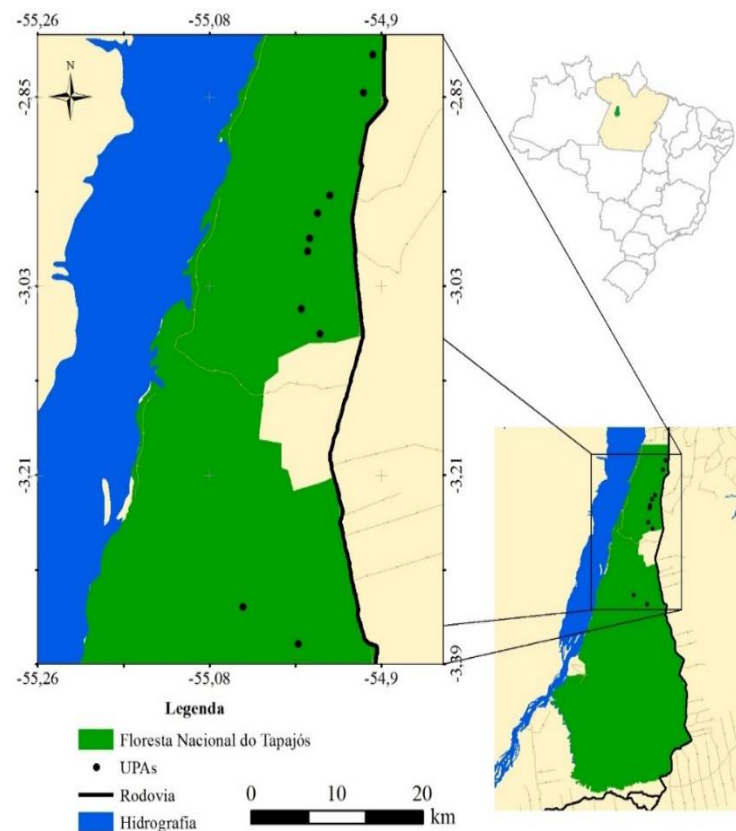
2.8 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado com dados coletados em duas Unidades de Manejo Florestal pertencente a COOMFLONA, Ananbé e Samambaia localizadas entre os km 67 e 117 da Rodovia BR-163, na unidade Floresta Nacional do Tapajós, município de Belterra, Estado do Pará, (lat. 3 ° 19 ' s, long: 54 ° 57 ' W, DATUM WGS 84). Os dados utilizados para os ajustes são provenientes da cubagem rigorosa das toras de dez Unidades de Produção Anual (UPAs),

a saber UPA 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10 e 11, manejadas, respectivamente, de 2007 a 2016 (Figura 1).

A região tem clima do tipo Ami, de acordo com a classificação de Köppen, com temperatura anual de 25,5° C e umidade relativa do ar de 90%. O período chuvoso na região ocorre de janeiro a maio, com precipitação média anual de 1.820 mm. A região apresenta topografia suavemente ondulada a ondulada e o solo predominante é do tipo Latossolo Amarelo Distrófico, profundo e bem drenado (ESPIRITO-SANTO *et al.*, 2005; ALVARES *et al.*, 2013; OLIVEIRA JUNIOR, *et al.*, 2015). A vegetação presente na região é de Floresta Ombrófila Densa, caracterizando-se pela dominância de árvores de grande porte (PINHO *et al.*, 2009; IBGE, 2012).

Figura 1 - Localização das Unidades de Produção Anual (UPAs), na Floresta Nacional do Tapajós, Estado do Pará, Brasil.



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMARAL, P.; VERÍSSIMO, A.; BARRETO, P.; VIDAL, E. **Floresta para sempre - Um manual para a produção de madeira na Amazônia**. Belém: IMAZON, 1998.
- AZEVEDO, C. P. **Dinâmica de florestas submetidas a manejo na Amazônia Oriental: Experimentação e simulação**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- BARROS, P. L. C.; SILVA JÚNIOR, 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, p. 115-126, 2009.
- BARROS, A. C.; VERÍSSIMO, A. **A expansão madeireira na Amazônia: impactos e perspectivas para o desenvolvimento sustentável no Pará**. 2.ed. Belém: IMAZON, 2002.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Decreto nº 5.975 DE 30 de novembro de 2006. Regulamenta os arts. 12, parte final, 15, 16, 19, 20 e 21 da Lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965, o art. 4o, inciso III, da Lei no 6.938, de 31 de agosto de 1981, o art. 2o da Lei no 10.650, de 16 de abril de 2003, altera e acrescenta dispositivos aos Decretos nos 3.179, de 21 de setembro de 1999, e 3.420, de 20 de abril de 2000. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, p 9, 2006.
- BRASIL. Resolução Conama nº406, de 2 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. **Ministério de Meio Ambiente**, Brasília, 4 p; 2009.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília, v. 28, p. 1-107, 2012.
- CABACINHA, C. D. **Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a cubagem rigorosa**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.
- CALEGARIO, N.; RICHARD, F. D.; ROMUALDO, M.; RODOLFO, N. Desenvolvimento de um modelo não linear de efeito misto na estimativa do crescimento e produção de povoamentos clonais de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 10, n. 1, p. 67-86, 2004.
- CALEGARIO, N.; MAESTRI, R.; LEAL, C. L.; DANIELS, R. F. Estimativa do crescimento de povoamentos de *Eucalyptus* baseada na teoria dos modelos não lineares em multinível de efeito misto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 3, p. 285-292, 2005.
- CALEGARIO, N.; DANIELS, R. F.; MAESTRI, R.; NEIVA, R. (2015). The development of a linear mixed-effect model to estimate growth and yield of clonal *Eucalyptus* stands. **Cerne**, Lavras, v. 10, n. 1, p. 67-86, 2015.

CAMPOS, J. C. C. **Dendrometria**. Viçosa: UFV, 1988.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. Viçosa: UFV, 2009.

CARVALHO, S. P. C. **Estimativa volumétrica por modelo misto e tecnologia laser aerotransportado em plantios clonais de *Eucalyptus* sp.** 2013. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013

CARVALHO, S. P. C.; RODRIGUEZ, L. C. E.; CALEGARIO, N.; SAVIAN, T. V.; LIMA, M. P.; SILVA, C. A.; NICOLETTI, M. F. Modelagem não linear mista para descrever o afilamento de árvores clonais de *Eucalyptus* sp. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 104, p. 605-614, 2014.

CARVALHO, S. P. C.; CALEGARIO, N.; SILVA, F. F.; BORGES, L. A. C.; MENDONÇA, A. R.; LIMA, M. P. Modelos não lineares generalizados aplicados na predição da área basal e volume de *Eucalyptus* clonal. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 541-548, 2011.

CASTRO, T. N. **Comparação de diferentes formas de colheita florestal na Amazônia brasileira através da modelagem da produção e do crescimento**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2012

COUTO, H. T. Z.; BASTOS, N. L. M. Modelos de equações de volume e relação hipsométrica para plantações de *Eucalyptus* no Estado de São Paulo. **IPEF**, Piracicaba, n. 37, p. 33-44, 1987.

CRUZ, H.; SABLAYROLLES, P.; KANASHIRO, M.; AMARAL, M.; SIST, P. **Relação empresa comunidade no contexto do manejo florestal comunitário e familiar: uma contribuição do projeto Floresta em Pé**. Belém: IBAMA, 2011. *E-book*. Disponível em: http://www.gret.org/wp-content/uploads/FLORESTA-EM-PE_v2.pdf. Acesso em: 10 out. 2019.

CRUZ, G. S.; SILVA-RIBEIRO, R. B.; 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. **Advances in Forestry Science**, Cuiabá, v.6, n.1, p.549-554, 2019.

CYSNEIROS, V. C. **Estratégias para modelagem do volume comercial em florestas tropicais**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

DANTAS, D.; CALEGARIO, N.; ACERBI JÚNIOR, F. W.; CARVALHO, S. P. C.; ISAAC JÚNIOR, M. A.; MELO, E. A. Multilevel nonlinear mixed-effects model and machine learning for predicting the volume of *Eucalyptus* spp. trees. **Cerne**, Lavras, v. 26, n. 1, p. 48-57, 2020.

DOLÁCIO, C. J. F.; DE OLIVEIRA, T. W. G.; OLIVEIRA, R. S.; CERQUEIRA, C. L.; COSTA, L. R. R. Different approaches for modeling *Swietenia macrophylla* comercial volume in an Amazon agroforestry system. **Agroforestry Systems**, p. 1-12, 2019.

ESPADA, A. L. V.; PIRES, I. P.; LENTINI, M. A. W. BITTENCOUR, P. R. G. **Manejo Florestal e Exploração de Impacto Reduzido em Florestas Naturais de Produção da Amazônia**. Belém: IFT, 2014.

ESPADA, A. L. V. **Parceria enquanto dimensão da governança ambiental para o manejo florestal comunitário na Amazônia: O caso da Floresta Nacional do Tapajós**. 2015. Dissertação (mestrado em gestão dos recursos naturais e desenvolvimento local na Amazônia) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2015

ESPADA, A. L. V.; SOBRINHO, M. V.; ROCHA, G. M.; VASCONCELLOS, A. M. A. Manejo florestal comunitário em parceria na Amazônia brasileira: O caso da Flona do Tapajós. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, Taubaté, v. 14, n. 1, p. 135-160, 2018.

ESPIRITO-SANTO, F. D. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; OLIVEIRA, L. E.; ARAGÃO, C.; MACHADO, E.L.M. Análise da composição florística e fitossociológica da floresta nacional do Tapajós com o apoio geográfico de imagens de satélites. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 35, p. 155-173, 2005.

FIGUEIREDO FILHO, A.; MACHADO, S. A.; CARNEIRO, M. R. A. Testing accuracy of log volume calculation procedures against water displacement techniques (xylometer). **Canadian Journal of Forest Research**, Toronto, v. 30, n. 6, p. 990-997, 2000.

GAMA, J. R. V. **Manejo florestal em faixas alternadas para floresta ombrófila aberta no município de Codó estado do Maranhão**. 2005. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

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, 2018.

GOUVEIA, J. F.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C.; GADELHA, F. H. L.; LIMA FILHO, L. M. A. Modelos volumétricos mistos em clones de *Eucalyptus* no polo Gesseiro do Araripe, Pernambuco. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 3, p. 587-598, 2015.

GUIMARÃES, D. P.; LEITE, H. G. Influência do número de árvores na determinação de equação volumétrica para *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 50, p. 37-42, 1996.

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

HIRAI, E. H.; CARVALHO, C. J. R.; SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P.; QUEIROZ, W. T. Efeito da exploração florestal de impacto reduzido sobre a regeneração natural em uma floresta densa de terra firme no município de Paragominas na Amazônia brasileira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 306-315, 2012.

HUMPHRIES, S.; HOLMES, T.; DE ANDRADE, D. F. C.; MCGRATH, D.; DANTAS, J. B. Searching for win-win forest outcomes: Learning-by-doing, financial viability, and income growth for a community-based forest management cooperative in the Brazilian Amazon. **World Development**, v. 125, p. 104336, 2020.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Floresta Nacional do Tapajós - Plano de Manejo**. Brasília: IBAMA, 2004. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/imgs-unidades-coservacao/flona_tapajoss.pdf. Acesso em: 21 dez. 2018.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 2ª ed., Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2018.

ICMBio - INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **A Floresta Nacional do Tapajós**, 2019. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/flonatapajos/>. Acesso em: 26 out. 2019.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Catálogo de Madeiras brasileiras para construção civil**. São Paulo: IPT, 2013. *E-book*. Disponível em: https://www.ipt.br/download.php?filename=980-Catalogo_de_Madeiras_Brasileiras_para_a_Construcao_Civil.PDF. Acesso em: 21 set. 2020.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Informações sobre madeiras** Disponível em: http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/38.htm. Acesso em: 09 nov. 2019.

ITTO - INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION. **Biennial review and assessment of the world timber situation 2015-2016**. Yokohama: ITTO, 2017. Disponível em: https://www.itto.int/direct/topics/topics_pdf_download/topics_id=5194&no=1. Acesso em: 22 outubro 2019.

JOHNS, J. S.; BARRETO, P.; UHL, C. **Os danos da exploração de madeira com e sem planejamento na Amazônia Oriental**. Belém: IMAZON, 1998. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/42fe/877190f7c8edf8be92d1ba0fde6c143cf90f.pdf>. Acesso em: 18 set. 2018.

LANSSANOVA, L. R; DA SILVA, F. A; SCHONS, C. T; PERERIRA, A. C. D. S. Comparação entre diferentes métodos para estimativa volumétrica de espécies comerciais da Amazônia. **BIOFIX Scientific Journal**, Curitiba, v. 3, n. 1, p. 109-115, 2018.

LAPPI, J. Calibration of height and volume equations with random parameters. **Forest Science**, v. 37, n. 3, p. 781-801, 1991.

LEITE, H.G.; ANDRADE, V.C.L. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 321-328, 2002.

LIMA, G. C. P. **Comparação de diferentes métodos de cubagem de madeira de povoamento de *Pinus taeda* L. na região serrana de Santa Catarina**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Estadual de Santa Catarina, Lages, 2015

MACHADO, S. A.; CONCEIÇÃO, M. B. da; FIGUEIREDO, D. J. de. Modelagem do volume individual para diferentes idades e regimes de desbaste em plantações de *Pinus oocarpa*. **Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava/Iratí, v. 4, n. 2, p. 186-197, 2002.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava: UNICENTRO, 2006.

MACHADO, S. A.; TÉO, S. J.; URBANO, E.; FIGURA, M.A.; SILVA, L. C. R. Comparação de métodos de cubagem absolutos com o volume obtido pelo xilômetro para Bracatinga (*Mimosa scabrella Benth*). **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 239-253, 2006.

MARTINHAGO, A. Z. **Otimização para a locação de pátios de estocagem para exploração de impacto reduzido na Amazônia brasileira**. 2012. Tese. (Doutorado em Manejo e Colheita Floresta) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

MEDINA, G.; POKORNY, B. Avaliação financeira do manejo florestal comunitário. **Novos cadernos NAEA**, Belém, v. 14, n. 2, p. 25-36, 2011.

MELO, M. S.; SABLAYROLLES, P.; ALMEIDA, E. C. de; DANTAS, J. B. Os custos de produção e o quadro financeiro do manejo florestal em florestas comunitárias da região de Santarém. **Relação empresa/comunidade no contexto do manejo florestal comunitário e familiar: uma contribuição do projeto Floresta em Pé**. Belém: IBAMA, p. 172-207, 2011.

NASCIMENTO, R. G. M.; VANCLAY, J. K.; FIGUEIREDO FILHO, A.; DO AMARAL MACHADO, S.; RUSCHEL, A. R.; HIRAMATSU, N. A.; DE 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.

NICOLETTI, M. F.; E CARVALHO, S. P. C.; MACHADO, S. A.; COSTA, V. J.; SILVA, C. A.; TOPANOTTI, L. R. Bivariate and generalized models for taper stem representation and assortments production of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). **Journal of Environmental Management**, v. 270, p. 110865, 2020.

NICOLETTI, M. F.; CARVALHO, S. P. C.; MACHADO, S. D. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; OLIVEIRA, G. S. Partial Volume Prediction Through Nonlinear Mixed Modeling. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 4, p. 1-10, 2019.

OLIVEIRA JUNIOR, R. C.; KELLER, M. M.; RAMOS, J. F. F.; BELDINI, T. P.; CRILL, P. M.; CAMARGO, P. B.; HAREN, J. V. Chemical analysis of rainfall and throughfall in the Tapajos National Forest, Belterra, Pará, Brazil. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 10, n. 2, p. 264-285, 2015.

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, 2017.

PERRI, S. H. V.; IEMMA, A. F. Procedimento “Mixed” do SAS para análise de modelos mistos. **Scientia agrícola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 959-967, 1999.

PHILLIPS, P. D.; AZEVEDO, C. P.; DEGEN, B.; THOMPSON, I. S.; SILVA, J. N. M.; VAN GARDINGEN, P. R. An individual based spatially explicit simulation model for strategic forest management planning in the eastern Amazon. **Ecological Modelling**, Kidlington, v. 173, p. 335-354, 2004.

PINHEIRO J.C, BATES D.M. **Mixed-effects models in S and S-PLUS**. New York: Springer-Verlag; 2000.

PINHO, G. S. C.; FIEDLER, N. C.; GUIMARÃES, P. P.; SILVA, G. F.; SANTOS, J. Análise de custos e rendimentos de diferentes métodos de corte de cipós para produção de madeira na floresta nacional do Tapajós. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 39, p. 555-560, 2009.

RANGEL, M.S.; CALEGARIO, N.; MELLO, A.A.; LEMOS, P.C. Melhoria na precisão da prescrição de manejo para floresta natural. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 145-156, 2006.

RUFINI, A. L.; SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D.; MELLO, J. M. Equações volumétricas para o cerrado *Sensu stricto*, em Minas Gerais. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 1, p. 1-11, 2010.

SABOGAL, C.; SILVA, J. N. M.; ZWEEDE, J.; PEREIRA JÚNIOR, R.; BARRETO, P.; GUERREIRO, C. A. **Diretrizes técnicas para exploração de impacto reduzido em operações florestais de terra firme na Amazônia brasileira**. Belém: CIFOR, 2000.

SABOGAL, C.; POKORNY, B.; SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P.; ZWEEDE, J.; PUERTA, R. **Diretrizes Técnicas de Manejo para Produção Madeireira Mecanizada em Florestas de Terra Firme na Amazônia Brasileira**. Belém: EMPRAPA, 2009.

SANTOS, G. R. **Avaliação da gestão da Floresta Nacional do Tapajós, Belterra-PA, na percepção dos moradores da comunidade Maguari**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2014.

SANTOS, M. F. S.; 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, 2019.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal: parte I: modelos de regressão linear e não linear: parte II: modelos para relação hipsométricas, volume, afilamento e peso da matéria seca**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005.

SFB - Serviço Florestal Brasileiro. **Plano Anual de Outorga Florestal 2020**. Brasília: SFB, 2019. *E-book*. Disponível em: <http://www.florestal.gov.br/documentos/publicacoes/4207-paof-2020>. Acesso em: 15 out 2019.

SILVA, E. N.; SANTANA, A. C. Modelos de regressão para estimação do volume de árvores comerciais, em florestas de Paragominas. **Ceres**, Viçosa, v. 61, n. 5, p. 631-636, 2014.

SILVA, G. G. P. Sociobiodiversidade na comunidade de Jamaraquá, Belterra, Pará. **in: Floresta Nacional do Tapajós: território, economia, gestão e manejo de recursos naturais da Amazônia**, p. 169-193, 2018.

SILVA-RIBEIRO, R. B. **Quantificação e valoração de resíduos da colheita florestal na Floresta Nacional do Tapajós, Pará**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

SILVA-RIBEIRO, R. B.; 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.

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, v. 35, n. 5, p. 1039-1051, 2011.

SOARES, C. P. B.; NETO, F. P.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa: UFV, 2011.

SOUZA, M. A. S. **Dinâmica e produção de uma floresta sob regime de manejo florestal sustentável na Amazônia central**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e ambientais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus; 2015.

STEPKA, T. F.; ZENY JUNIOR, G. A.; LISBOA, G. S.; CERQUEIRA, C. L.; PESCK, V. A.; ROIK, M. Modelos volumétricos e funções de afilamento para *Pinus taeda* L. na região dos campos gerais, Paraná, Brasil. **Espacios**, Caracas, v. 38, n. 21, p. 9, 2017.

STERNADT, G. H. **Cubagem de toras de mogno**: Comparação do processo do IBAMA e o adotado por madeireiras. Brasília: IBAMA, 2001. Livro, Disponível em: http://www.mognobrasileiro.com.br/wp-content/uploads/2008/06/processos_de_cubagem_de_toras_de_mogno_impressao.doc. Acesso em: 14 nov. 2019.

THOMAS, C.; ANDRADE, C. M.; SCHENEIDER, 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, p. 319-327, 2006.

VALENTE, D. R.; QUEIROZ, W. T.; PINHEIRO, J. G.; MONTEIRO, L. A. S. Modelo de predição para o volume total de Quaruba (*Vochysia imundata* ducke) via análise de fatores e regressão. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 307-317, 2011.

VAN GARDINGEN, P.; VALLE, D.; THOMPSON, I. Evaluation of yield regulation options for primary forest in Tapajós National Forest, Brazil. **Forest Ecology and Management**, 231 (1-3), p. 184-195. 2006.

VERÍSSIMO, A. **Influência do Promanejo sobre políticas públicas de manejo florestal sustentável na Amazônia**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005. Disponível em: <https://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/735/2/Influencia%20do%20promanejo%20sobre%20políticas%20publicas.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2019.

YOUNG, H. E.; ROBBINS, W. C.; WILSON, S. Errors in volume determination of primary forest products. **Pulp & Paper Magazine of Canada**, Quebec, v. 68, p. 389-394, 1967.

CAPÍTULO I - PREDIÇÃO VOLUMÉTRICA DE ESPÉCIES COMERCIAIS EM UMA ÁREA SOB CONCESSÃO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

RESUMO

A Amazônia possui uma rica diversidade de espécies arbóreas de grande porte e alto valor comercial, o que lhe atribui um grande potencial na produção de madeira. No entanto é necessário estimar com precisão o volume de madeira das áreas a serem manejadas e garantir a máxima produtividade dessa floresta. Neste contexto, este estudo teve como objetivo, avaliar diferentes cenários para o ajuste de modelos volumétricos, a fim de identificar a estratégia que resulte em previsões mais precisas do volume comercial das principais espécies exploradas na Floresta Nacional do Tapajós, PA. Foram utilizados dados de romaneio e inventário 100% de dez unidades de produção anual (UPAs) para o ajuste de dez modelos volumétricos, lineares e não lineares, para um agrupamento de 44 espécies e individuais para as espécies *Couratari guianensis*, *Hymenaea courbaril*, *Lecythis lurida*, *Manilkara elata* e *Vochysia maxima*, sem e com estratificação em classes de 10, 20 e 50 cm de diâmetro. Para a escolha das melhores equações, avaliou-se a significância dos parâmetros estimados ao nível de 5% de significância, Coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj} (\%)$), erro padrão da estimativa ($S_{yx} (\%)$), critério de informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC), análise gráfica dos resíduos e de multicolinearidade. Para os ajustes geral e específicos individuais, os valores de $R^2_{aj} \%$ e o $S_{yx} \%$ variaram de 63,4 a 81,1% e 25,1 a 34,1%, respectivamente, sendo melhores quando comparados aos ajustes individuais (60,9 a 81,3% e 18,1 a 29,4%), respectivamente. O cenário II foi o mais preciso em relação ao I e III, exceto para as espécies *Couratari guianensis* e *Vochysia maxima*. De modo geral, o modelo de Schumacher e Hall não linear foi mais preciso em relação aos demais, proporcionando as melhores previsões volumétricas na composição de uma equação genérica e equações específicas para espécies comerciais na Floresta Nacional do Tapajós.

Palavras-chave: Manejo florestal. Floresta tropical. Equação de volume.

ABSTRACT

The Amazon has a rich diversity of large tree species of high commercial value, which gives it great potential in wood production. However, it is necessary to accurately estimate the volume of wood of the areas to be managed and ensure the maximum productivity of this forest. In this context, this study aimed to evaluate different scenarios for the adjustment of volumetric models, in order to identify the strategy that results in more accurate predictions of the commercial volume of the main species explored in the Tapajos National Forest, PA. Measurement of the stem and packing data of the logs of ten annual production units (UPAs) were used to fit ten volumetric models, linear and non-linear, for a grouping of 44 species and individual for the species *Couratari guianensis*, *Hymenaea courbaril*, *Lecythis lurida*, *Manilkara elata* e *Vochysia maxima*, without and with stratification in classes of 10, 20 and 50 cm of diameter. For the choice of the best equations, the significance of the estimated parameters at the level of 5% significance, Adjusted Determination Coefficient (R^2_{aj} %), standard estimation error (S_{yx} %), Akaike Information Criterion (AIC), Bayesian Information Criterion (BIC), graphic analysis of residuals and multicollinearity. For the general and specific fit, the values of R^2_{aj} % and S_{yx} % ranged from 63.4 to 81.1% and 25.1 to 34.1%, respectively, being better when compared to individual adjustments (60.9 to 81.3% and 18.1 to 29.4%), respectively. Scenario II was the most accurate in relation to I and III, except for the species *Couratari guianensis* and *Vochysia maxima*. In general, the nonlinear Schumacher and Hall model was more accurate in relation to the others, providing the best volumetric predictions in the composition of a generic equation and specific equations for commercial species in the Tapajos National Forest.

Keywords: Forest management, Tropical forest, Volume equation.

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia possui uma rica biodiversidade, que se encontra dispersa na maior área contínua de floresta tropical do mundo, onde predominam árvores de grande porte e espécies de alto valor comercial. As espécies que compõe sua florística apresentam características morfológicas que as diferenciam, tornando-a um ambiente de grande heterogeneidade (ASNER *et al.*, 2004; SANTOS *et al.*, 2012; SILVA-RIBEIRO, 2013).

As florestas tropicais desempenham um papel crucial na subsistência das pessoas que dependem de seus recursos, parte dela é explorada para fins madeireiros por meio de Planos de Manejo Florestal. A madeira explorada fornece retornos financeiros a curto prazo e atua como um precursor da economia regional. No entanto, o ambiente heterogêneo das florestas, com árvores de diferentes diâmetros e vasta quantidade de espécies, dificulta a estimativa do volume, principal variável utilizada na exploração dos recursos madeireiros (PHILLIPS *et al.*, 2004; SILVA-RIBEIRO, 2013).

O volume é a principal variável quando se trata do planejamento da exploração e estima-lo com maior acurácia é fundamental para o melhor aproveitamento do recurso madeireiro e produtividade da floresta. No entanto, o ajuste de modelos lineares e não lineares com base em muitas espécies, desprezando características morfológicas do fuste de cada espécie, é o método mais comum para prever o volume em florestas inequidistantes como a Amazônia, o que implica em previsões volumétricas errôneas (THOMAS *et al.*, 2006; CASTRO *et al.*, 2013; SILVA-RIBEIRO, 2013; BAPTISTA *et al.*, 2019).

Desprezar as peculiaridades inerentes a cada espécie ocasiona a subutilização da matéria prima e significativa perda econômica, visto que o planejamento será comprometido (GAMA *et al.*, 2017). Diante da necessidade de quantificar com acurácia o estoque de matéria prima florestal, maximizar a produção e rentabilidade da floresta, a busca por formas de prever com maior precisão o volume comercial das espécies Amazônicas é de grande relevância.

Visando reduzir o erro na previsão do volume, inúmeros autores têm testado diferentes formas de absorver e contornar a heterogeneidade relacionada às características das espécies e ao porte das árvores deste ecossistema, gerando equações específicas para cada local a ser manejado, espécie, tipo fisionômico e classes diamétricas, com o intuito de tornar os ajustes volumétricos mais precisos (THAINES *et al.*, 2010; SILVA-RIBEIRO; GAMA; MELO, 2014; TONINI, BORGES, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2019, CRUZ *et al.*, 2019).

Esses ajustes mais específicos a cada área, espécie e classes de diâmetro resultam em maior precisão nas estimativas, pois minimizam a ação da heterogeneidade da floresta ao reduzir a variabilidade da base de dados. Assim, equações volumétricas com base em conjuntos específicos de dados garantem estimativas mais acuradas em relação ao volume de um maciço florestal e podem ser uma alternativa para contornar as restrições impostas pela área e espécie (SCOLFORO, 2005; SOARES *et al.*, 2011). Neste contexto, este estudo teve como objetivo, avaliar diferentes cenários para o ajuste de modelos volumétricos, a fim de identificar a estratégia que resulte em predições mais precisas do volume comercial das principais espécies exploradas na Floresta Nacional do Tapajós, PA.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 COLETA DE DADOS

Os dados referentes a diâmetro medido à 1,30 m do solo (dap) e altura comercial (hc), utilizados nos ajustes dos modelos volumétricos, foram provenientes do inventário 100% e romaneio de toras das UPAs, realizado pela COOMFLONA. Sendo que as 26.689 árvores de 44 espécies foram cubadas pelo método de Smalian, que na ocasião consistiu na obtenção de diâmetros da base e topo da tora, considerando comprimentos entre 4 e 7 m, a utilização de comprimentos diferentes no processo de cubagem não gera diferença estatística no volume das toras (SILVA-RIBEIRO; GAMA; MELO, 2014).

Com objetivo de reduzir a variabilidade do conjunto de dados, foi testado dois métodos de remoção de *outliers*, o primeiro consistiu na remoção dos valores discrepantes com base nos resíduos obtidos pelo ajuste prévio dos modelos. O segundo consistiu na aplicação do teste de Grubbs para a exclusão desses valores extremos ($G > 2.G_{tab}$) (GRUBBS, 1969), para complementar o teste, foi realizada a análise gráfica da dispersão da variável dependente volume comercial (v), pela variável independente diâmetro à altura do peito (dap), sendo excluídos os pares de observação dessas variáveis com baixa correlação, isoladas da nuvem de dispersão. Avaliando a efetiva melhora nos ajustes optou-se pelo segundo método que resultou na melhora da estatística de precisão dos modelos.

O refinamento resultou do conjunto de dados com 23.912 árvores de 44 espécies ($50 \text{ cm} \leq \text{dap} < 180 \text{ cm}$), que foram utilizadas no ajuste dos modelos para a obtenção da equação genérica, cenário I. Destas, foram selecionadas 13.967 árvores das cinco espécies mais exploradas, cenário II, que correspondem cerca de 59% do volume explorado em dez anos. Para o ajuste dos modelos estatísticos específicos de cada espécie e para estratificação empírica em classes de 10, 20 e 50 cm de diâmetro, cenário III (Tabela 2).

Tabela 2 - Lista de espécies selecionadas para os ajustes específicos dos modelos matemático volumétricos de dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Pará.

Nome científico	N	Amp. dap (cm)	Volume explorado (%)
<i>Couratari guianensis</i> Aubl.	2.690	50-160	13
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	1.433	70-170	11
<i>Lecythis lurida</i> (Miers) S.A. Mori	2.616	50-160	9
<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.)	5.725	50-150	19
<i>Vochysia maxima</i> Ducke	1.503	50-180	7

Em que: n: número de árvores cubadas; Amp. dap: amplitude dos dados de diâmetro altura do peito usados nos ajustes específicos sem estratificação diamétrica.

2.2 AJUSTE E SELEÇÃO DOS MODELOS

Foram ajustados dez modelos volumétricos, lineares e não lineares, usados na ciência florestal, o modelo não linear foi ajustado utilizando o algoritmo de *Gauss-Newton* (Tabela 3). O ajuste dos modelos foi realizado para obtenção de uma equação genérica, considerando o agrupamento de todas as espécies exploradas. Para as cinco espécies selecionadas, os modelos ajustados resultaram em equações específicas para cada espécie e para cada classe diamétrica, considerando as amplitudes preestabelecidas.

Tabela 3 - Modelos volumétricos testados para o ajuste das equações dos três cenários, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

Nº	Autor	Modelo
1	Schumacher e Hall logaritimizado	$\ln v = \beta_0 + \beta_1 \ln(dap) + \beta_2 \ln(hc) + \varepsilon$
2	Spurr logaritimizado	$\ln v = \beta_0 + \beta_1 \ln(dap^2 hc) + \varepsilon$
3	Husch	$\ln v = \beta_0 + \beta_1 \ln(dap) + \varepsilon$
4	Meyer	$v = \beta_0 + \beta_1 (dap) + \beta_2 (dap^2) + \beta_3 (dap hc) + \beta_4 (dap^2 hc) + \beta_5 (hc) + \varepsilon$
5	Stoate	$v = \beta_0 + \beta_1 (dap^2) + \beta_2 (dap^2 hc) + \beta_3 (dap hc) + \beta_4 (hc) + \varepsilon$
6	Meyer modificado	$v = \beta_0 + \beta_1 (dap) + \beta_2 (dap^2) + \beta_3 (dap hc) + \beta_4 (dap^2 hc) + \varepsilon$
7	Brenac	$\ln v = \beta_0 + \beta_1 \ln(dap) + \beta_2 (1/dap) + \varepsilon$
8	Spurr variável combinada	$v = \beta_0 + \beta_1 (dap^2 hc) + \varepsilon$
9	Hohenald – Krenn	$v = \beta_0 + \beta_1 (dap) + \beta_2 (dap^2) + \varepsilon$
10	Schumacher e Hall não linear	$v = \beta_0 dap^{\beta_1} hc^{\beta_2} + \varepsilon$

Em que: v: volume individual comercial (m³); dap: diâmetro medido à 1,30 m do solo (cm); hc: altura comercial (m); β_i : Parâmetros estimados da regressão; ln: logaritmo neperiano; ε : erro aleatório.

Como critérios para a escolha do melhor modelo, foi considerado as seguintes estatísticas de precisão:

2.2.1 Coeficiente de determinação

O coeficiente de determinação R^2 (6) atribui o quanto da variável independente é explicada pelas variáveis dependentes, seus resultados variam de 0 a 1 sendo que quanto mais próximo de 1 melhor o poder explicativo de modelo, em modelos não linear o R^2 é calculado pelo quadrado do coeficiente de correlação linear de Pearson entre os valores observados e estimados da variável resposta. Para comparar modelos de naturezas diferentes foi calculado coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj \%}$) (7), eliminando assim a interferência que o número de Parâmetros distintos entre as equações poderia causar na análise da comparação. Deve-se ressaltar que para os modelos logarítmicos, em que a variável dependente sofreu alteração este coeficiente foi recalculado (HIRAMATSU, 2008; SOARES *et al.*, 2011).

$$R^2 = \left[1 - \left(\frac{SQ_{\text{resíduo}}}{SQ_{\text{total}}} \right) \right] \quad (6)$$

Em que: R^2 : coeficiente de determinação; $SQ_{\text{resíduo}}$: soma dos quadrados dos resíduos; SQ_{total} : soma dos quadrados totais.

$$R^2_{aj \%} = 1 - \left[(1 - R^2) \cdot \left(\frac{n - 1}{n - p - 1} \right) \right] \quad (7)$$

Em que: $R^2_{aj \%}$:coeficiente de determinação ajustado; R^2 : coeficiente de determinação; n: número de observações; p: número de parâmetros.

2.2.2 Erro padrão da estimativa

O erro padrão da estimativa (S_{yx}) (8) é uma estatística que mede a dispersão média entre os valores observados e estimados ao longo da linha de regressão, sendo que, quanto mais baixo for o valor do S_{yx} , melhor terá sido o ajuste. Para os modelos onde a variável dependente sofreu transformação, é necessário ressaltar que deve recalculá-lo o erro padrão, a fim de que possa comparar estaticamente as equações (MACHADO *et al.*, 2002; SOARES; NETO; SOUZA, 2011).

$$S_{yx} = \sqrt{QM_{\text{Erro}}} \quad (8)$$

$$S_{yx} \% = \frac{S_{yx}}{\bar{Y}} \cdot 100 \quad (9)$$

Em que: S_{yx} : erro padrão da estimativa; QM_{Erro} : quadrado médio do resíduo; $S_{yx} \%$: erro padrão da estimativa em porcentagem; \bar{Y} : média do volume observado, em m^3 .

2.2.3 Análise gráfica

A análise da distribuição gráfica de resíduos é um critério importante, pois possibilita a verificação do ajuste da equação ao longo da amplitude dos dados. Permite detectar se há ou não tendenciosidade na estimativa da variável dependente ao longo da linha de regressão, ou seja, se a dispersão dos pontos ao longo do eixo da variável independente indica de forma clara se o ajuste subestima ou superestima a variável dependente. Sendo determinante na avaliação da qualidade das estimativas, para tomada de decisão quanto à utilização ou não do modelo (AHRENS, 1982; BARRETO *et al.*, 2014). Os resíduos são calculados por meio da equação 10:

$$\text{Resíduo}\% = \left(\frac{Y_i - \hat{Y}_i}{\bar{Y}_i} \right) \cdot 100 \quad (10)$$

Em que: \bar{Y}_i : média da variável observada; \hat{Y}_i : variável dependente estimada; Y_i : variável dependente observada.

2.2.4 Multicolinearidade

A multicolinearidade foi analisada por meio do VIF (*variance inflation factor*) para modelos que possuem mais de uma variável independente. De forma geral, $VIF > 10$ indica que o modelo apresenta multicolinearidade problemática, ou seja, há correlação entre as variáveis independentes, gerando parâmetros não confiáveis, desaconselhando a utilização do modelo (DRAPER; SMITH, 1980).

2.2.5 Fator correção de Meyer (FCM)

O uso do FCM objetiva a correção das estimativas dos modelos que sofreram transformações matemáticas na variável dependente, é caso dos modelos logarítmicos na base 10 e o logaritmo natural. A aplicação do artifício matemático anti-log gera erros sistemáticos

chamados de discrepância logarítmica (SILVA *et al.*, 2011). O Fator de Correção de Meyer foi utilizado, segundo a fórmula a seguir:

$$FM = e^{0,5} (S_{yx})^2 \quad (11)$$

Em que: FM: fator de correção de Meyer; e: constante de Euler (2,718281...); e S_{yx} : erro padrão da estimativa.

2.2.6 Critério de informação de Akaike (AIC)

O AIC é um critério que se baseia no valor da verossimilhança, no número de parâmetro do modelo, estima a discrepância geral relativa entre um modelo de aproximação e o modelo real (hipotético) que gerou os dados. Desta forma, quanto menor o valor do AIC de um modelo, menor sua discrepância geral estimada e, por consequência, menor sua distância relativa para o modelo real (hipotético) (BARBOSA, 2009; NICOLETTI *et al.*, 2012). O AIC é calculado pela equação 12:

$$AIC = -2 \ln(L) + 2p \quad (12)$$

Em que: \ln : logaritmo na base neperiana; L: valor de máxima verossimilhança apresentado pelo modelo; p: número de parâmetros.

2.2.7 Critério de Informação Bayesiano (BIC)

É um critério que se baseia na verossimilhança e na aproximação da probabilidade posterior, além de penalizar o número de parâmetros do modelo. Desta forma, é considerado o melhor modelo aquele que minimiza o seu valor (EMILIANO, 2009). O BIC é calculado pela equação 13:

$$BIC = -2 \ln(L) + p \ln(n) \quad (13)$$

Em que: \ln : logaritmo neperiano; L: valor da máxima verossimilhança apresentada pelo modelo; p: número de parâmetros; n: número de observações.

Analisou-se também a significância dos parâmetros estimados pelo teste t a 95% de probabilidade e o histograma dos resíduos. Para a validação do melhor modelo, foi separado,

aleatoriamente, uma amostra independente de 10% dos dados para a equação geral e separadamente para cada espécie selecionada para os ajustes específicos, exclusivamente para validar os melhores modelos por meio do teste de aderência do *Qui-quadrado* (χ^2) a 95% de probabilidade.

Para a comparação entre os cenários, não foi considerado os valores de AIC e BIC por não se tratar da mesma base de dados, desta forma sendo usados apenas como critério de seleção do melhor modelo de cada situação. O processamento e análise de dados foram realizados no software Estatístico R versão 3.5.1 (R CORE TEAM, 2018) e na construção dos gráficos foi utilizado o pacote *ggplot2*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ESTATÍSTICA DESCRITIVA

Com base no conjunto de dados analisado, a Tabela 4 apresenta a estatística descritiva para a variável volume comercial com a presença de *outliers* e após sua retirada. Foram cubadas no total 26.689 árvores com volume individual médio de 7,3136 m³, porém foram obtidos volumes de até 59,4820 m³. Mesmo após a remoção dos valores discrepantes, ocorreu pouca variação no número de observações (n) e foi possível observar que houve a manutenção da média e das medidas de variabilidade (σ , $cv(\%)$), resultado esperado pois a variabilidade é característica inerente às florestas naturais.

Tabela 4 - Estatística descritiva dos dados de volume comercial individual antes e após o refinamento dos dados.

	\bar{y}	σ	$cv(\%)$	Mínimo	Máximo	n
Com <i>outliers</i>	7,3136	19,83	60,88	0,5806	59,4820	26.689
Sem <i>outliers</i>	7,1758	16,37	56,39	0,5806	28,3645	23.912

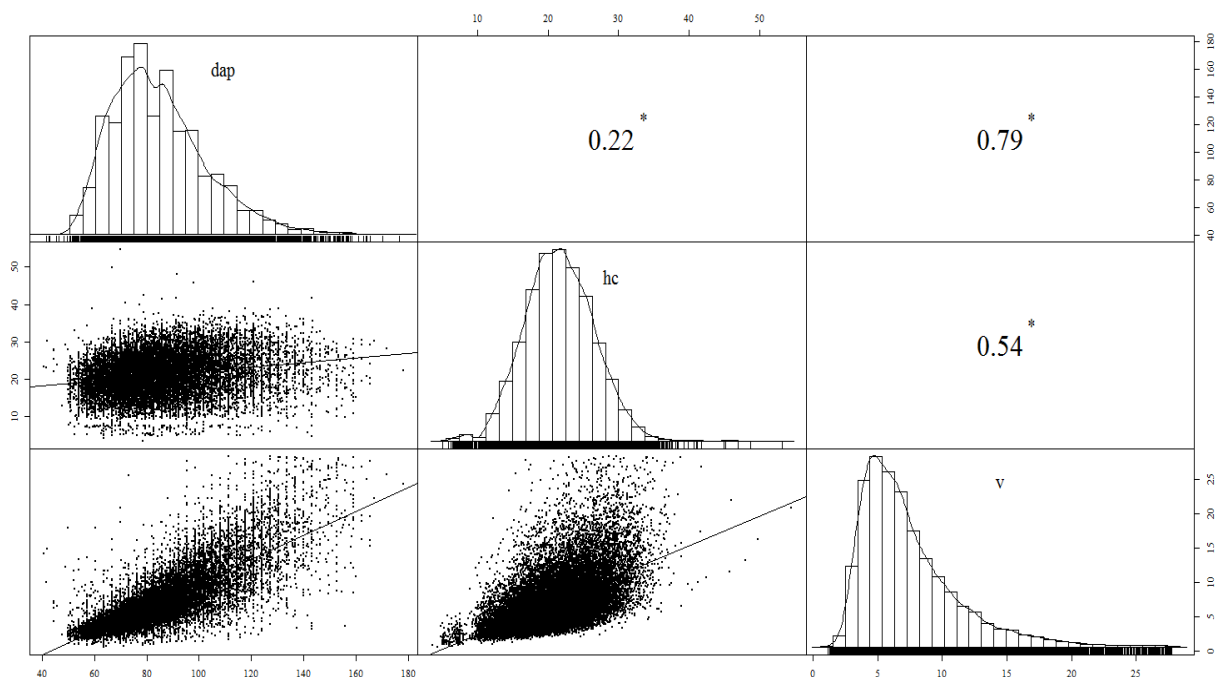
Em que: \bar{y} : média dos volumes comerciais individuais em m³; σ : desvio padrão; $cv(\%)$: coeficiente de variação; Mínimo: mínimo volume comercial individual em m³; Máximo: máximo volume comercial individual em m³; n: número de árvores cubadas.

Após a retirada de valores discrepantes foi avaliada a correlação e distribuição das variáveis dendrométricas. Nos histogramas, Figura 2, foi possível observar comportamentos diferentes para as variáveis dendrométricas. A variável hc apresentou distribuição simétrica com a maior frequência de observações entre 20 e 25 m, as variáveis dap e v, apresentaram distribuição assimétrica à direita com concentração de árvores entre 60 e 80 cm e 5 m³, respectivamente. Além disso, as variáveis apresentaram correlação que podem ser classificadas em três níveis: fraca (dap e hc), moderada (v e hc) e forte (v e dap) (DANCEY; REIDY, 2013).

Apesar da diferença na intensidade da correlação das variáveis todas foram significativamente correlacionadas. Ao analisar os gráficos de dispersão foi possível observar que as árvores de grande porte possuem correlação menor em relação as menores árvores, esse comportamento comum entre elas e estão representados pelo afastamento dos pontos da linha de tendência.

A baixa correlação entre as variáveis hc e dap está associada a grande heterogeneidade do conjunto de dados, pois em sua composição há árvores de mesmo diâmetro que apresentam altura comercial diferente, uma vez que essa variável vai variar em relação ao aproveitamento da árvores principalmente pela retirada de toras com presença de podridão interna ou rachaduras.

Figura 2 - Correlação entre as variáveis dap, hc e v, dos dados agrupados de dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



Em que: dap: diâmetro à altura do peito; hc: altura comercial; v: volume individual comercial; *: variáveis correlacionadas significativamente de acordo com a correlação de Pearson a 95% de probabilidade.

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

3.2 AJUSTE DOS MODELOS

3.2.1 Modelo genérico

Os parâmetros estimados da regressão e as estatísticas de precisão que fundamentaram a seleção do melhor modelo estão descritos na Tabela 5. Dentre os dez modelos ajustados apenas os modelos 4 e 6 apresentaram coeficientes não significativos de acordo com o teste t a

95% de probabilidade. A não significância pode estar associada a presença de elevado grau de multicolinearidade entre as covariáveis.

Ao analisar o VIF dos modelos múltiplos, valores superiores a dez foram verificados para os modelos 4, 5 e 6, apenas o modelo 1 apresentou resultados aceitáveis, inferior a dez. Os altos valores de VIF foram reflexo da alta correlação entre as variáveis independentes, essa característica resulta em parâmetros estimados não confiáveis, sendo aconselhável a não utilização dessas equações (HOFFMANN, 2016; MAIA, 2017). Uma forma de minimizar a alta correlação entre as covariáveis preditoras é utilizar covariáveis distintas das já usada no modelo. Para os modelos que se observou elevado grau de multicolinearidade, não foram analisados os critérios de seleção (R^2_{aj} , S_{yx} , AIC e BIC), pois as estimativas realizadas podem não ser condizentes com a realidade.

Os modelos apresentaram valores de R^2_{aj} variando de 63,4 (modelo 4) a 80,1% (modelos 1, 2, 4 e 10). Em comparação dos modelos lineares com o não linear, observa-se que este último foi levemente superior aos demais, com redução dos critérios de informação de Akaike e Bayesiano. Esta leve superioridade pode estar relacionada com as características dos modelos não lineares em interpretar variáveis biológicas (MAIA *et al.*, 2009).

Outro ponto observado foi a superioridade de modelos de dupla entrada, que também foi observada em outros estudos com espécies amazônicas (SILVA *et al.*, 1984; THAINES *et al.*, 2010; SILVA-RIBEIRO; GAMA; MELO, 2014; TONINI; BORGES, 2015; DE LIMA *et al.*, 2020), estando associada a inserção da variável altura total ou comercial, tendo como reflexo a melhora significativa nos resultados da estatística de precisão dos ajustes volumétricos. Em estudo recente realizado por Cysneiros *et al.* (2017), foi verificado aumento de aproximadamente 10% no R^2 e redução de 5% no S_{yx} , resultados inferiores aos encontrados neste estudo que obteve o aumento superior a 15% para o R^2_{aj} e 9% para S_{yx} .

Ao analisar os valores de S_{yx} % foi possível detectar que variaram entre 25,1% a 34,1%, podendo ser considerado valores altos. Logo, para Cysneiros (2016), os altos valores de S_{yx} % nas estimativas de volume das espécies Amazônicas foram ocasionados devido ao número de espécies utilizadas nos ajustes e ao número de árvores cubadas, sendo que menor o número de árvores cubadas menor o erro da estimativa. Para os critérios de informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC), diferenças mais evidentes puderam ser verificadas entre os modelos, sendo Schumacher e Hall não linear e Spurr variável combinada superiores aos demais por apresentarem os menores valores.

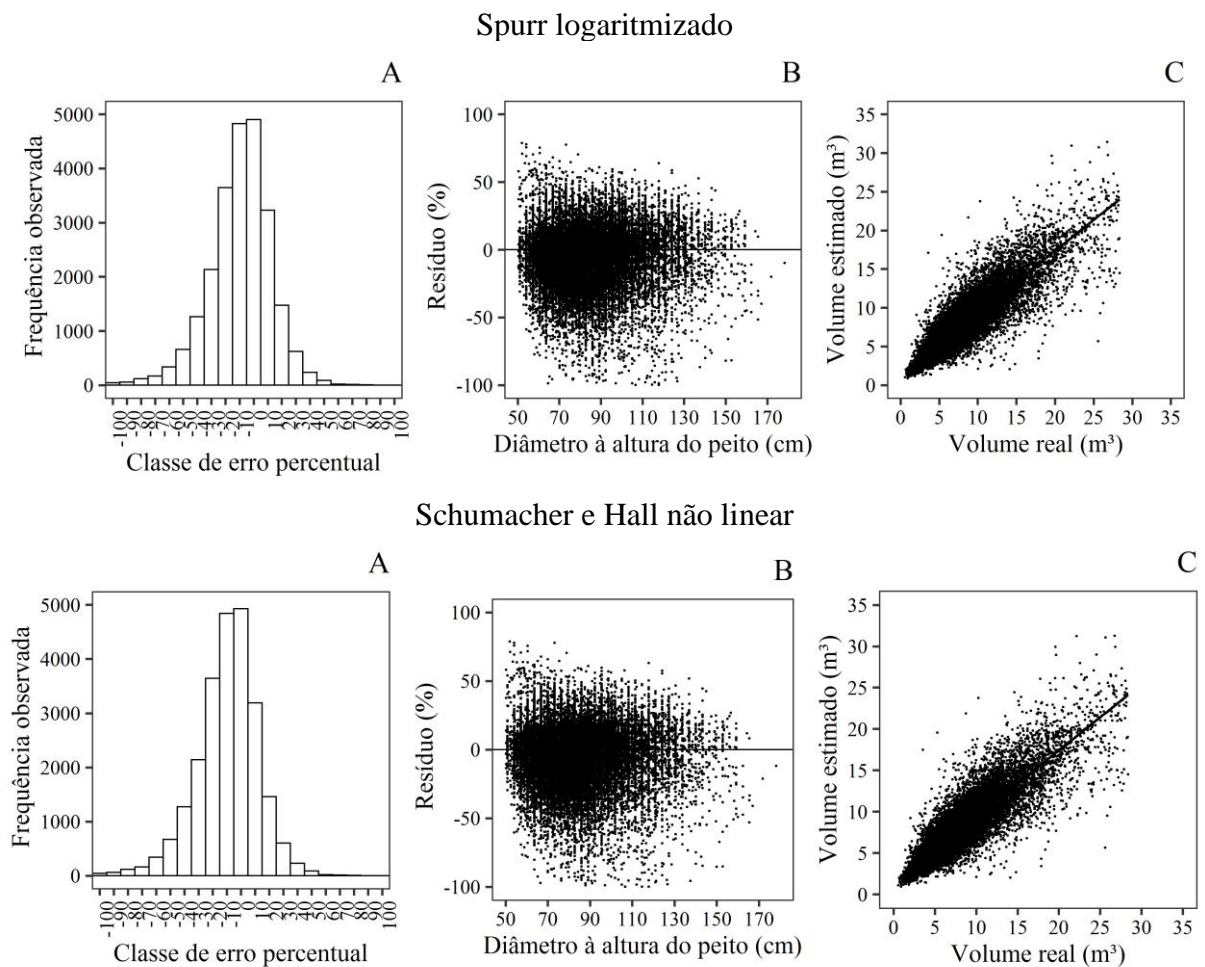
Tabela 5 - Estatística de precisão para as equações genéricas, para os dados agrupados de dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

Mod.	Parâmetros	VIF	FM	R ² _{aj} %	S _{yx} %	AIC	BIC
1	β_0	-8,55797*	-				
	β_1	1,75035*	1,0	80,1	25,2	156.870,2	156.902,5
	β_2	0,88252*	1,0				
2	β_0	-8,56315*	-	80,1	25,1	156.867,8	156.892,1
	β_1	0,87748*	-				
3	β_0	-6,87812*	-	63,4	34,1	156.898,3	156.922,6
	β_1	1,97284*	-				
4	β_0	3,00875*	-				
	β_1	-0,07006*	867,3				
	β_2	0,00052*	850,3	80,1	25,2	96.110,3	96.166,9
	β_3	0,00491*	2461,6				
	β_4	0,00001 ^{ns}	1342,7				
	β_5	-0,17465*	312,5				
5	β_0	-0,41346*	-				
	β_1	0,00018*	16,7	80,0	25,2	96.187,4	96.227,8
	β_2	0,00003*	25,2				
	β_3	0,06055*	5,9				
6	β_0	-0,57378*	-				
	β_1	0,00680 ^{ns}	81,8				
	β_2	0,00013*	136,1	80,0	25,2	96.127,0	96.175,5
	β_3	0,00119*	49,2				
	β_4	0,00003*	99,8				
7	β_0	-7,91336*	-				
	β_1	2,16297*	55,9	63,3	34,2	156.895,1	156.927,4
	β_2	15,84527*	55,9				
8	β_0	0,94760*	-	79,9	25,3	96.342,6	96.366,9
	β_1	0,00004*	-				
9	β_0	-1,96257*	-				
	β_1	0,04650*	49,2	63,5	34,1	110.611,4	110.643,8
	β_2	0,00069*	49,2				
10	β_0	0,00019*	-				
	β_1	1,78166*	-	80,1	25,1	96.055,5	96.087,8
	β_2	0,84709*	-				

Em que: Mod.: modelo estatístico ajustado; β_i : parâmetros estimados da regressão; FM: fator de correção de Meyer; R²_{aj} %: coeficiente de determinação ajustado em porcentagem; S_{yx} %: erro padrão da estimativa em porcentagem; AIC: critério de informação Akaike; BIC: critério de informação Bayesiano; *: parâmetro significativo de acordo com o teste t à 95% de probabilidade; ^{ns}: parâmetro não significativo de acordo com o teste t à 95% de probabilidade; 1: Schumacher e Hall logaritmizado; 2: Spurr logaritmizados; 3: Husch; 4: Meyer; 5: Stoate; 6: Meyer modificado; 7: Brenac; 8: Spurr variável combinada; 9: Hohenald - Krenn; 10: Schumacher e Hall não linear.

A análise gráfica da distribuição dos resíduos para os dois melhores modelos, (2) e (10) demonstra que ambas apresentaram grande dispersão dos resíduos para as árvores de grandes diâmetros, reafirmando a elevada variabilidade das variáveis dendrométricas das espécies Amazônicas (Figura 3).

Figura 3 - Gráficos da equação proveniente dos modelos de Spurr logaritmizado e Schumacher e Hall não linear, para os dados agrupados de dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

3.2.2 Ajuste específicos

Após o ajuste dos dez modelos volumétricos para cada espécie, foi observado maior precisão do modelo não linear de Schumacher e Hall (10), em relação aos demais modelos, para todas as espécies. O modelo apresentou coeficientes significativos, maior valor de R^2_{aj} e menores valores de S_{yx} %, AIC e BIC. Este comportamento foi semelhante ao obtido no cenário

I, o R^2_{aj} para as melhores equações variou de 61,2% a 79,7% para as espécies *C. guianensis* e *H. courbaril*, respectivamente.

Apesar de inúmeros estudos com espécies amazônicas terem demonstrado a necessidade da obtenção de equações específicas para espécies ou grupo de espécies com características semelhantes para obter melhores estimativas (SOARES *et al.*, 2011; MIRANDA *et al.*, 2014; GIMENEZ *et al.*, 2015; CYSNEIROS *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2019). Nesse estudo, a estratificação a nível de espécie não resultou em melhora na estatística de precisão para a espécie *C. guianensis* e *V. maxima*, sendo obtido valores inferiores ao da equação geral. Este resultado pode estar associado a grande variabilidade de florestas inequidâneas, onde indivíduos de mesma espécie apresentam características distintas.

Os resultados inferiores obtidos para as espécies podem estar associados às características morfológica, devido a presença de grandes raízes tabulares, o que dificulta a medição do diâmetro com acurácia. Em estudo realizado por Oliveira *et al.* (2017), ao avaliarem a predição volumétrica da *C. guianensis* na Flona Tapajós, obtiveram resultados semelhantes de R^2_{aj} e S_{yx} % que foi, respectivamente, 0,67 e 22,78%. Em outro estudo realizado com espécie do gênero *Couratari*, Cysneiros *et al.* (2017) observaram que o modelo Schumacher e Hall foi o mais adequado para a realização da predição do volume individual para a espécie do gênero, com R^2_{aj} e S_{yx} % de 0,61 e 28,77%, respectivamente.

Ao avaliar esse método de estratificação para as espécies *H. courbaril*, *L. lurida* e *M. elata* foi observado a superioridade de modelos de dupla entrada de Schumacher e Hall para as três espécies. Essa situação já havia sido constatada na região por Silva-Ribeiro; Gama e Melo (2014), ao avaliarem modelos para a predição do volume para essas espécies. Além disso, foi observado a redução de em média 21% no S_{yx} em relação ao cenário I, isso pode ter relação com as características morfológicas dessas espécies que tendem a ter fustes mais cilíndricos.

Tabela 6 - Estatística de precisão das equações específicas, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

Espécie	Mod.	Parâmetros		R ² _{aj} %	S _{yx} %	AIC	BIC
<i>C. guianensis</i>	10	β_0	0,00052*	61,2	26,6	12.008,1	12.031,7
		β_1	1,57866*				
		β_2	0,83415*				
<i>H. courbaril</i>	10	β_0	0,00023*	79,7	17,4	6.407,4	6.428,5
		β_1	1,73544*				
		β_2	0,87278*				
<i>L. lurida</i>	10	β_0	0,00025*	79,2	21,0	8.636,1	8.659,6
		β_1	1,77118*				
		β_2	0,76529*				
<i>M. elata</i>	10	β_0	0,00037*	77,3	21,5	18.636,9	18.663,5
		β_1	1,62918*				
		β_2	0,83883*				
<i>V. maxima</i>	10	β_0	0,00047*	63,5	29,4	7.104,4	7.125,7
		β_1	1,59277*				
		β_2	0,86640*				

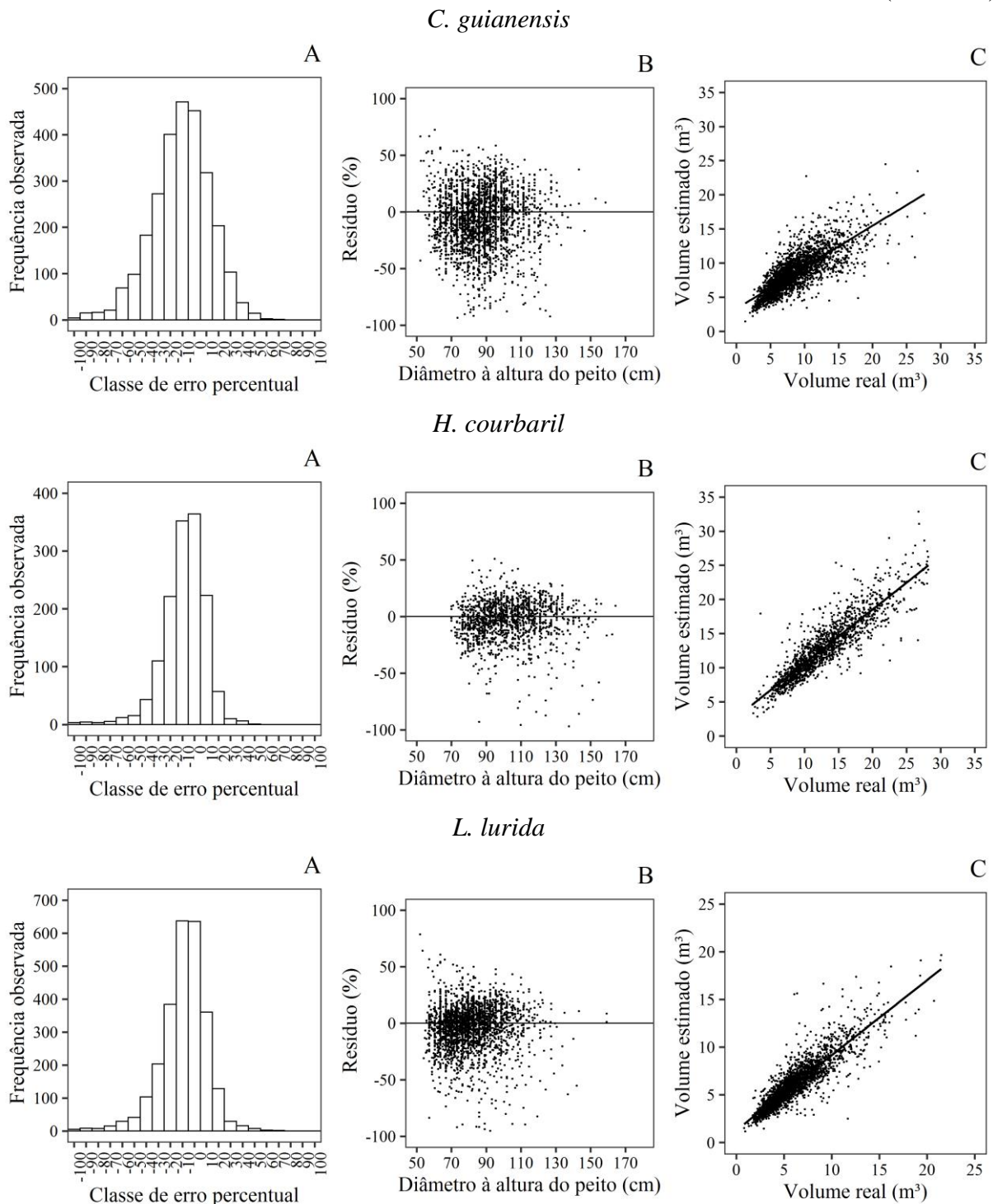
Em que: Mod.: modelo estatístico ajustado; β_i : Parâmetros da regressão; R²_{aj.%}: coeficiente de determinação ajustado em porcentagem; S_{yx} %: erro padrão da estimativa em porcentagem; AIC: critério de informação Akaike;

BIC: critério de informação Bayesiano; *: coeficiente significativo de acordo com o teste t à 95% de probabilidade; 10: Schumacher e Hall não linear.

A distribuição e histogramas de resíduos foram determinantes para a seleção da melhor equação (Figura 4). Ao avaliar a tendência desses gráficos foi possível observar que as equações selecionadas tenderam a superestimar o volume comercial. Esse comportamento é observado pela concentração maior de resíduos nas classes de erro percentual negativa. Em relação a dispersão dos resíduos, todas as espécies apresentaram a nuvem de pontos muito dispersa, bem como pontos distantes da linha regressora, resultado da grande variabilidade dos dados. Todas as espécies apresentaram maior dispersão dos resíduos a partir do diâmetro de 70 cm, enquanto para *H. courbaril*, os maiores resíduos foram a partir de 90 cm. Ao avaliar os gráficos de distribuição do volume observado em função do estimado, foi observado grande afastamento dos pontos em relação a linha de tendência, principalmente, para árvores com volume a partir de 15 m³.

Figura 4 - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall não linear para as espécies mais exploradas, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

(Continua)

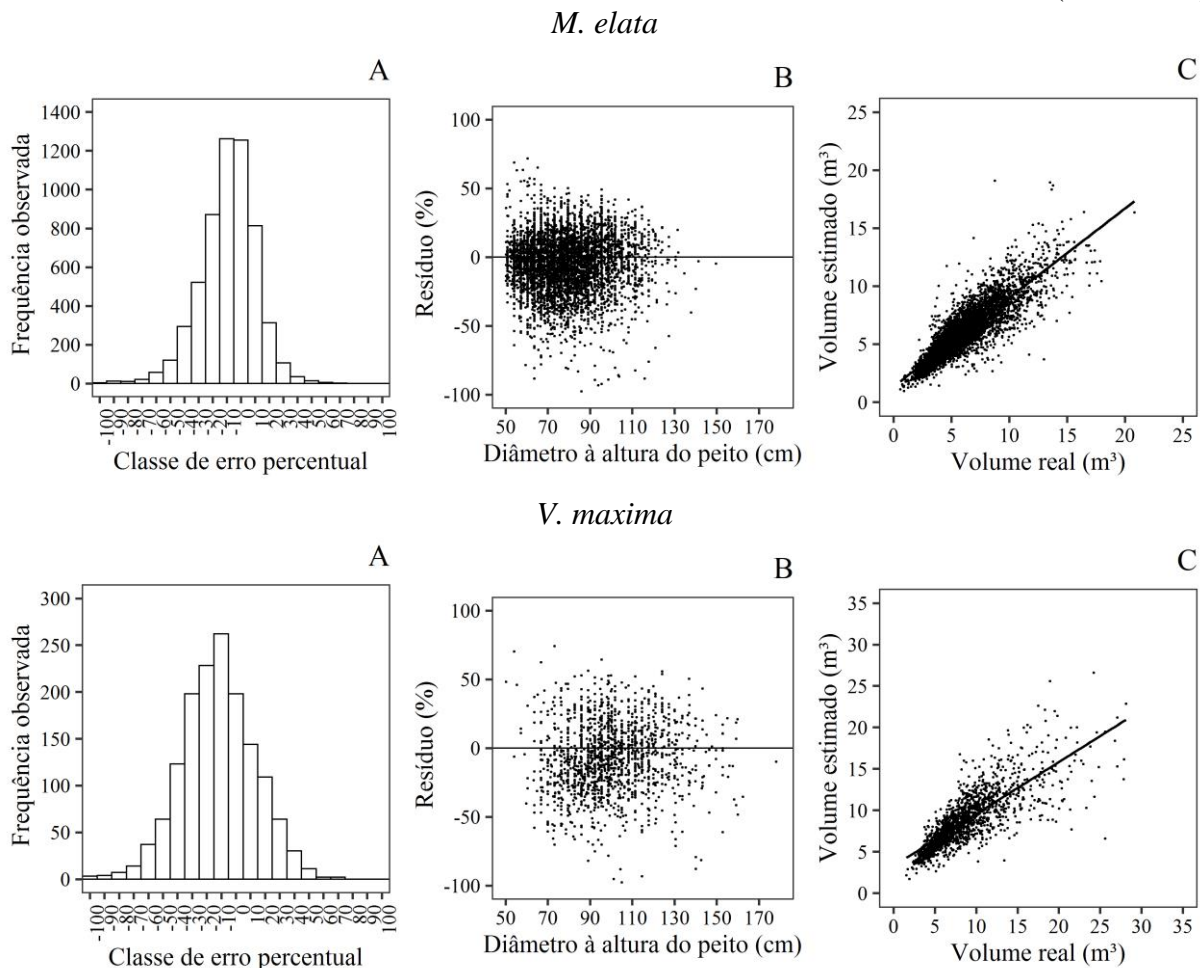


Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 4 - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall não linear para as espécies mais exploradas, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

(Conclusão)



Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

3.2.3 Estratificações por classe diamétrica

Neste cenário foi selecionado o melhor modelo para cada classe diamétrica das cinco espécies avaliadas. Não foi observado a superioridade do modelo não linear de Schumacher e Hall, em 48% dos ajustes foi escolhido o modelo Spurr logaritmizado (2), seguido por 25% do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), 20% do modelo de Spurr variável combinada (8) e apenas 7% do modelo de Schumacher e Hall não linear (10). Ao avaliar a distribuição gráfica de resíduos, conforme demonstrado nos anexos A-FFF. De modo geral, todos os modelos selecionados apresentaram comportamento semelhante, sendo perceptível a tendência de superestimar o volume comercial individual dessas espécies, independente da amplitude e classe, como comprovado pelos histogramas de resíduos.

3.2.3.1 *C. guianensis*

Na Tabela 7 está descrita a estatística de precisão das melhores equações selecionada para cada classe diamétrica. Apesar de serem selecionadas como as melhores equações, a estatística de precisão foi ruim, principalmente quando se analisa o R^2_{aj} , cuja variação foi entre 29,1 (classe 75 cm e amplitude de 10 cm) a 57 % (classe 95 cm e amplitude de 50 cm). Para a amplitude de 10 cm, as classes diamétricas apresentaram os piores resultados, pois de acordo com o R^2_{aj} as variáveis independentes estão explicando menos de 35% da variável dependente, esse critério foi em média 61% e 49% inferior aos resultados encontrados no cenário I e II, respectivamente. Quanto ao S_{yx} % essa amplitude apresentou resultados superiores a 20% e em todas as amplitudes.

As estratificações em classes de diâmetro influenciaram de forma negativa na estatística dos modelos quando comparado aos obtidos na equação específica da espécie, pois apenas na estratificação com amplitude de 50 cm, foi possível obter resultados próximos, sendo R^2_{aj} de 57,0% e S_{yx} % de 25,5. Os altos valores de S_{yx} % e baixos R^2_{aj} podem estar associados na grande variabilidade da altura comercial, apesar da estratificação por classes diamétricas árvores com diâmetros iguais apresentam alturas diferentes, portanto as variáveis não conseguem explicar de forma precisa a variável volume comercial.

Resultados semelhantes aos do presente estudo foram obtidos por Oliveira *et al.* (2017) ao realizarem o ajuste de modelos volumétricos por classes diamétricas para a espécie na Floresta Nacional do Tapajós, os autores verificaram R^2_{aj} inferior a 50% e S_{yx} % superior a 17%, sendo associado a grande variação do diâmetro ao longo do fuste da espécie, o que dificulta a acurácia da medição.

Tabela 7 - Estatística de precisão das equações selecionadas para a estratificação diamétrica da espécie *C. guianensis*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

(Continua)

Amp.	C.C	Mod.	Parâmetros		VIF	FM	R^2_{aj} %	S_{yx} %	AIC	BIC
10	65	2	β_0	-9,20062*	-	1,0	32,9	30,8	830,3	840,5
			β_1	0,94154*						
	75	1	β_0	-6,67937*	1,0	1,0	29,1	24,3	2.269,8	2.287,4
			β_1	1,34759*						
			β_2	0,85302*						

Em que: Amp.: amplitude da classe em cm; C.C.: centro de classe diamétrica em cm; Mod.: modelo estatístico ajustado; β_i : Parâmetros da regressão; VIF: fator de inflação da variância; FM: fator de correção de Meyer; R^2_{aj} %: coeficiente de determinação ajustado em porcentagem; S_{yx} %: erro padrão da estimativa em porcentagem; AIC: critério de informação Akaike; BIC: critério de informação Bayesiano; *: coeficiente significativo de acordo com o teste t à 95% de probabilidade; 1: Schumacher e Hall logaritimizado; 2: Spurr logaritimizados; 8: Spurr variável combinada.

Tabela 7 - Estatística de precisão das equações selecionadas para a estratificação diamétrica da espécie *C. guianensis*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

(Conclusão)										
Amp.	C.C	Mod.	Parâmetros		VIF	FM	R ² _{aj} %	S _{yx} %	AIC	BIC
10	85	2	β_0	-8,81777*	-	1,0	33,2	24,8	2.734,8	2.748,3
			β_1	0,89923*						
	95	1	β_0	-11,80139*	1,0	1,0	31,2	25,3	2.356,8	2.373,7
			β_1	2,45200*						
			β_2	0,92204*						
	105	2	β_0	-7,61773*	-	1,0	29,8	23,3	1.171,5	1.182,0
			β_1	0,80317*						
20	70	1	β_0	-6,95605*	1,0	1,0	35,1	25,2	3.088,7	3.107,5
			β_1	1,41496*						
			β_2	0,84784*						
	90	1	β_0	-11,27818*	1,0	1,0	42,2	25,5	5.171,3	5.191,5
			β_1	2,34709*						
			β_2	0,90524*						
	110	2	β_0	-7,27526*	-	1,0	33,3	25,0	2.143,5	2.155,6
			β_1	0,77440*						
50	95	2	β_0	-8,16499*	-	1,0	57,0	25,5	9.585,4	9.602,5
			β_1	0,84852*						
	145	8	β_0	4,68589*	-	-	29,3	25,1	951,0	960,6
			β_1	0,00003*						

Em que: Amp.: amplitude da classe em cm; C.C.: centro de classe diamétrica em cm; Mod.: modelo estatístico ajustado; β_i : Parâmetros da regressão; VIF: fator de inflação da variância; FM: fator de correção de Meyer; R²_{aj} %: coeficiente de determinação ajustado em porcentagem; S_{yx} %: erro padrão da estimativa em porcentagem; AIC: critério de informação Akaike; BIC: critério de informação Bayesiano; *: coeficiente significativo de acordo com o teste t à 95% de probabilidade; 1: Schumacher e Hall logaritmizado; 2: Spurr logaritmizados; 8: Spurr variável combinada.

3.2.3.2 *H. courbaril*

A estatística de precisão das melhores equações para cada classe diamétrica da espécie *H. courbaril*, estão descritos na Tabela 8. De modo geral o modelo de Spurr logaritmizado (2) foi o mais adequado para estimar o volume desta espécie considerando esterificação com amplitude de 10 e 20 cm. No entanto, o maior R²_{aj}, 70,8%, foi obtido para a classe de 95 cm e amplitude de 50 cm pelo modelo (10), as demais classes apresentaram R²_{aj} variando entre 34,9% (classe de 85 cm e amplitude de 10 cm) e 60,4% (classe de 140 cm e amplitude de 20 cm). Para o S_{yx} % a estratificação proporcionou uma suave redução, com erro padrão variando entre 13,1% (classe de 75 cm e amplitude de 10 cm) à 17,8% (classe de 85 cm e amplitude de 10 cm). Ao comparar esses resultados com os cenários I e II foi observado pouca melhora em relação a precisão dos ajustes, não justificando o uso desse método de esterificação para essa espécie.

Tabela 8 - Estatística de precisão das equações selecionadas para a estratificação diamétrica da espécie *H. courbaril*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

Amp.	C.C	Mod.	Parâmetros	VIF	FM	R ² _{aj} %	S _{yx} %	AIC	BIC
10	75	2	β_0 -7,88196* β_1 0,82213*	-	1,0	52,7	13,1	279,9	287,8
	85	2	β_0 -7,92991* β_1 0,82826*	-	1,0	34,9	18,1	803,0	813,1
	95	2	β_0 -8,06712* β_1 0,84196*	-	1,0	40,8	17,8	1.264,5	1.275,7
	105	1	β_0 -6,04913* β_1 1,13598* β_2 1,00961*	- 1,0 1,0	1,0	38,5	16,6	1.088,0	1.102,0
	115	8	β_0 1,92920* β_1 0,00004*	-	-	50,2	17,3	933,1	942,9
	125	8	β_0 3,83927* β_1 0,00003*	-	-	40,7	16,4	630,1	638,5
	140	2	β_0 -8,27285* β_1 0,85541*	-	1,0	47,1	16,9	1.085,9	1.097,1
20	100	2	β_0 -8,57213* β_1 0,88315*	-	1,0	48,1	17,3	2.333,5	2.346,3
	120	8	β_0 2,25624* β_1 0,00004*	-	-	54,1	16,6	1.578,8	1.590,2
	140	2	β_0 -10,85160* β_1 1,05429*	-	1,0	60,4	15,7	467,9	475,3
	145	1	β_0 0,00019* β_1 1,80144* β_2 0,82663*	-	-	70,8	17,7	4.492,6	4.512,5
50	145	1	β_0 -5,41067* β_1 0,99142* β_2 1,06566*	1,0 1,0 1,0	1,0	57,3	16,4	1.156,8	1.170,4

Em que: Amp.: amplitude da classe em cm; C.C.: centro de classe diamétrica em cm; Mod.: modelo estatístico ajustado; β : Parâmetros da regressão; VIF: fator de inflação da variância; FM: fator de correção de Meyer; R²_{aj} %: coeficiente de determinação ajustado em porcentagem; S_{yx} %: erro padrão da estimativa em porcentagem; AIC: critério de informação Akaike; BIC: critério de informação Bayesiano; *: coeficiente significativo de acordo com o teste t à 95% de probabilidade; 1: Schumacher e Hall logaritimizado; 2: Spurr logaritimizados; 8: Spurr variável combinada; 10: Schumacher e Hall não linear.

3.2.3.3 *L. lurida*

As melhores equações para cada classe diamétrica e sua respectiva estatística de precisão, R²_{aj} e S_{yx} %, AIC e BIC estão descritos na Tabela 9. Na estratificação com amplitude de 10 cm estão os piores resultados de R²_{aj}, com 11,94% e alto S_{yx} de 49,44% (classe de 55 cm). Para a amplitude de 20 cm, foi obtido o segundo pior resultado, com R²_{aj} de 17,15% e S_{yx} de 24,85% para a classe de 120 cm. Para esta espécie a estratificação por diâmetro só gerou resultados melhores para a classe de 75 cm, amplitude de 50 cm, alcançando 73,28% e 18,85% de R²_{aj} e S_{yx}, respectivamente. Valor 7,45% inferior e 10,24 % superior ao R²_{aj} e S_{yx},

respectivamente, do cenário II, não justificando o emprego dessa técnica para a situação avaliada.

Tabela 9 - Estatística de precisão das equações selecionadas para a estratificação diamétrica da espécie *L. lurida*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

Amp.	C.C	Mod.	Parâmetros		VIF	FM	R ² _{aj} %	S _{yx} %	AIC	BIC
10	55	2	β ₀	-7,70309*	-	1,1	11,9	49,4	278,0	285,0
			β ₁	0,80215*						
	65	1	β ₀	-8,59747*	1,0	1,0	38,5	20,8	1.037,2	1.053,6
			β ₁	1,86608*						
			β ₂	0,72491*						
	75	1	β ₀	-9,58798*	1,0	1,0	55,7	17,7	1.955,2	1.973,7
			β ₁	2,05223*						
			β ₂	0,78855*						
	85	2	β ₀	-8,08057*	-	1,0	46,3	18,4	1.716,6	1.729,5
			β ₁	0,83682*						
95	1	β ₀	-9,13414*	1,0	1,0	54,1	17,7	1.127,3	1.142,3	
		β ₁	1,94516*							
		β ₂	0,78980*							
105	2	β ₀	-8,68709*	-	1,0	56,7	20,6	570,5	579,2	
		β ₁	0,88823*							
20	60	8	β ₀	1,00926*	-	-	36,1	24,2	1.316,0	1.328,7
			β ₁	0,00003*						
	80	10	β ₀	0,00022*	-	-	60,0	18,1	3.730,3	3.750,9
			β ₁	1,81314*						
			β ₂	0,74975*						
100	8	β ₀	1,49268*	-	-	59,0	18,6	1.724,6	1.737,0	
		β ₁	0,00004*							
50	120	2	β ₀	-4,53382*	-	1,0	17,2	24,9	402,3	409,4
			β ₁	0,55588*						
	75	10	β ₀	0,00016*	-	-	73,3	18,9	6.350,2	6.372,8
			β ₁	1,87980*						
			β ₂	0,75992*						
125	2	β ₀	-7,49447*	-	1,0	49,8	23,0	1.045,5	1.055,7	
		β ₁	0,79087*							

Em que: Amp.: amplitude da classe em cm; C.C.: centro de classe diamétrica em cm; Mod.: modelo estatístico ajustado; β_i : Parâmetros da regressão; VIF: fator de inflação da variância; FM: fator de correção de Meyer; R²_{aj} %: coeficiente de determinação ajustado em porcentagem; S_{yx} %: erro padrão da estimativa em porcentagem; AIC: critério de informação Akaike; BIC: critério de informação Bayesiano; *: coeficiente significativo de acordo com o teste t à 95% de probabilidade; 1: Schumacher e Hall logaritmizado; 2: Spurr logaritmizados; 8: Spurr variável combinada; 10: Schumacher e Hall não linear.

3.2.3.4 *M. elata*

Após os ajustes por classe diamétrica foi possível observar os baixos resultados para R^2_{aj} , em torno de 60% para a amplitude 10 e 20 cm, e altos valores do S_{yx} %, conforme descritos na Tabela 10. O melhor resultado para o R^2_{aj} foi observado na estratificação de 50 cm, com valor de 70,4%. Resultados semelhantes foram obtidos por Santos *et al.* (2019) para espécies do gênero *Manilkara* na FNT, os autores não indicaram a utilização de estratificação em classes com amplitude de 10 cm, sendo sugerida a estratificação em apenas duas classes diamétricas.

A estratificação em classes diamétricas favoreceu a diminuição dos valores dos critérios de informação de Akaike e Bayesiano, quando comparados aos obtidos por meio das equações específicas. Porém, foi observado que a estratificação em classes de 10 cm favoreceu a diminuição desses critérios, quando comparados aos obtidos nas classes de 20 e 50 cm.

Apesar da estratificação por classes diamétricas diminuir a variabilidade da base de dados, não foi possível verificar melhoria na estatística de precisão das melhores equações para a espécie, quando comparado aos resultados obtidos nos ajustes específicos. Neste caso, apesar da significância de todos os parâmetros, as estratificações por classes diamétricas não foram adequadas, sendo aconselhável a não utilização deste método para a espécie. Diferentemente dos resultados deste estudo, Cysneiros *et al.* (2017) afirmam que a estratificação por classes diamétricas, considerando um conjunto de espécies, proporcionam melhorias significativas na estatística de precisão. Neste estudo, no entanto, a estratificação por espécies não resultou em melhoras significativas em relação ao cenário I e II.

Tabela 10 - Estatística de precisão das equações selecionadas para a estratificação diamétrica da espécie *M. elata*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

(Continua)									
Amp.	C.C	Mod.	Parâmetros	VIF	FM	R^2_{aj} %	S_{yx} %	AIC	BIC
10	55	8	β_0 0,43056*	-	-	37,9	21,6	961,7	974,2
			β_1 0,00004*						
	65	1	β_0 -7,34294*	1,0	1,0	42,4	21,5	2.609,8	2.629,6
			β_1 1,44866*						
			β_2 0,89078*						
	75	8	β_0 0,47265*	-	-	50,0	19,0	4.259,7	4.275,7
			β_1 0,00004*						

Em que: Amp.: amplitude da classe em cm; C.C.: centro de classe diamétrica em cm; Mod.: modelo estatístico ajustado; β : Parâmetros da regressão; VIF: fator de inflação da variância; FM: fator de correção de Meyer; R^2_{aj} %: coeficiente de determinação ajustado em porcentagem; S_{yx} %: erro padrão da estimativa em porcentagem; AIC: critério de informação Akaike; BIC: critério de informação Bayesiano; *: coeficiente significativo de acordo com o teste t à 95% de probabilidade; 1: Schumacher e Hall logaritmizado; 2: Spurr logaritmizados; 8: Spurr variável combinada; 10: Schumacher e Hall não linear.

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Tabela 10 - Estatística de precisão das equações selecionadas para a estratificação diamétrica da espécie *M. elata*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

(Conclusão)										
Amp.	C.C	Mod.	Parâmetros		VIF	FM	R ² _{aj} %	S _{yx} %	AIC	BIC
10	85	2	β ₀	-8,64232*	-	1,0	45,2	18,9	3.243,1	3.257,8
			β ₁	0,87913*						
	95	2	β ₀	-8,72587*	-	1,0	46,3	20,2	2.391,8	2.405,2
			β ₁	0,88613*						
	105	8	β ₀	1,24920*	-	-	48,6	19,6	1.188,6	1.199,6
			β ₁	0,00003*						
20	60	10	β ₀	0,00072*	-	-	46,7	22,7	3.696,2	3.717,5
			β ₁	1,41955*						
			β ₂	0,90079*						
	80	10	β ₀	0,00028*	-	-	55,7	19,1	7.592,0	7.615,3
			β ₁	1,66469*						
			β ₂	0,86771*						
	100	2	β ₀	-8,67380*	-	1,0	49,4	20,3	3.642,3	3.656,7
			β ₁	0,88215*						
	120	8	β ₀	2,55070*	-	-	45,5	19,9	818,0	827,6
β ₁			0,00003*							
50	75	2	β ₀	-8,17123*	-	1,0	70,4	20,5	14.430,4	14.449,7
			β ₁	0,84021*						
	100	1	β ₀	-6,77489*	-	1,0	53,4	20,1	2.063,2	2.079,9
			β ₁	1,31741*						
			β ₂	0,93824*						

Em que: Amp.: amplitude da classe em cm; C.C.: centro de classe diamétrica em cm; Mod.: modelo estatístico ajustado; β_i : Parâmetros da regressão; VIF: fator de inflação da variância; FM: fator de correção de Meyer; R²_{aj} %: coeficiente de determinação ajustado em porcentagem; S_{yx} %: erro padrão da estimativa em porcentagem; AIC: critério de informação Akaike; BIC: critério de informação Bayesiano; *: coeficiente significativo de acordo com o teste t à 95% de probabilidade; 1: Schumacher e Hall logaritmizado; 2: Spurr logaritmizados; 8: Spurr variável combinada; 10: Schumacher e Hall não linear.

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

3.2.3.5 *V. maxima*

Os modelos de Schumacher e Hall logaritmizado (1), Spurr logaritmizado (2), Spurr variável combinada e Schumacher e Hall não linear foram os mais adequados para estimar o volume da espécie nas classes diamétricas. Na Tabela 11 estão os parâmetros e a estatística de precisão das melhores equações para cada classe diamétrica. Foi verificado que a estratificação elevou o S_{yx} %, passou de 29,4% do ajuste específico para 40,9% na amplitude de 10 cm. Em relação ao R²_{aj}, nenhuma das técnicas de estratificação favoreceu este parâmetro, uma vez que o maior R²_{aj} foi de 54,9%, para classe de 95 cm e amplitude de 50 cm, resultado inferior ao obtido no ajuste específico.

Apesar da estratificação os altos erros associados as equações comprometem a utilização das mesmas, sendo aconselhável a não estratificação por classes diamétricas para a espécie. A

estratificação com amplitude de 10 cm propiciou os melhores resultados dos critérios de Akaike e Bayesiano, pois foram obtidos os menores resultados quando comparados as demais amplitudes, conforme demonstrado na Tabela 11.

Os baixos resultados de R^2_{aj} estão relacionados a grande variabilidade da altura comercial dentro das classes diamétricas, o que resulta em uma baixa correlação entre as variáveis dendrométricas e consequentemente, em baixos coeficientes de determinação ajustado e altos erros padrões.

Tabela 11 - Estatística de precisão das equações selecionadas para a estratificação diamétrica da espécie *V. maxima*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

(Continua)

Amp.	C.C	Mod.	Parâmetros		VIF	FM	R^2_{aj} %	S_{yx} %	AIC	BIC
10	75	2	β_0	-10,45408*	-	1,0	25,2	40,9	695,1	704,4
			β_1	1,04881*						
	85	2	β_0	-9,67659*	-	1,0	37,0	29,6	870,4	880,5
			β_1	0,97694*						
	95	2	β_0	-8,25332*	-	1,0	34,7	25,0	1.320,1	1.331,4
			β_1	0,85780*						
20	105	2	β_0	-8,56933*	-	1,0	31,3	25,2	963,9	974,0
			β_1	0,88380*						
	115	2	β_0	-9,17152*	-	1,0	39,6	24,3	835,5	845,0
			β_1	0,93261*						
	125	8	β_0	5,65278*	-	-	12,9	26,7	549,9	557,8
			β_1	0,00003*						
	80	1	β_0	-8,69991*	-	1,0	36,6	33,9	1.577,2	1.592,9
			β_1	1,69519*						
			β_2	1,04489*						
	100	1	β_0	-7,34947*	-	1,0	37,1	26,0	2.326,7	2.343,8
			β_1	1,48544*						
			β_2	0,91475*						
	120	2	β_0	-8,66235*	-	1,0	36,8	24,6	1.386,9	1.397,8
			β_1	0,89301*						
	140	2	β_0	-7,32917*	-	1,0	20,4	28,2	464,0	471,2
			β_1	0,78221*						

Em que: Amp.: amplitude da classe em cm; C.C.: centro de classe diamétrica em cm; Mod.: modelo estatístico ajustado; β_i : Parâmetros da regressão; VIF: fator de inflação da variância; FM: fator de correção de Meyer; R^2_{aj} %: coeficiente de determinação ajustado em porcentagem; S_{yx} %: erro padrão da estimativa em porcentagem; AIC: critério de informação Akaike; BIC: critério de informação Bayesiano; *: coeficiente significativo de acordo com o teste t à 95% de probabilidade; 1: Schumacher e Hall logaritmizado; 2: Spurr logaritmizados; 8: Spurr variável combinada; 10: Schumacher e Hall não linear.

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Tabela 11 - Estatística de precisão das equações selecionadas para a estratificação diamétrica da espécie *V. maxima*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

(Continua)

Amp.	C.C	Mod.	Parâmetros		VIF	FM	R ² _{aj} %	S _{yx} %	AIC	BIC
50	95	10	β_0	0,00031*	-	-	54,9	27,4	4.753,5	4.773,5
			β_1	1,60962*						
			β_2	0,97954*						
	145	1	β_0	-4,84035*	1,0	1,0	32,2	26,3	1.139,3	1.152,6
			β_1	1,06931*						
			β_2	0,76841*						

Em que: Amp.: amplitude da classe em cm; C.C.: centro de classe diamétrica em cm; Mod.: modelo estatístico ajustado; β_i : Parâmetros da regressão; VIF: fator de inflação da variância; FM: fator de correção de Meyer; R²_{aj} %: coeficiente de determinação ajustado em porcentagem; S_{yx} %: erro padrão da estimativa em porcentagem; AIC: critério de informação Akaike; BIC: critério de informação Bayesiano; *: coeficiente significativo de acordo com o teste t à 95% de probabilidade; 1: Schumacher e Hall logaritmizado; 2: Spurr logaritmizados; 8: Spurr variável combinada; 10: Schumacher e Hall não linear.

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

3.3 VALIDAÇÃO

A equações resultantes do agrupamento das espécies, estratificação diamétrica e equação genérica foram validadas pelo teste *Qui-quadrado* a 95% de probabilidade, indicando ausência de diferença estatística significativa entre os volumes reais obtidos na cubagem rigorosa e os estimados pela melhor equação de cada cenário (Anexo GGG). Assim, pode-se afirmar que as equações selecionadas anteriormente podem ser utilizadas para a predição do volume comercial das espécies na área de estudo.

4 CONCLUSÕES

A modelagem específica (cenário II) foi mais precisa que a modelagem com estratificação a nível de diâmetro e a modelagem genérica, exceto para as espécies *Couratari guianensis* e *Vochysia maxima*.

É recomendado a avaliação de outros métodos de estratificação ou modelagem, podendo destacar uso de redes neurais artificiais e modelos de efeito misto.

O modelo de Schumacher e Hall não linear foi mais preciso em relação aos demais, proporcionando as melhores predições volumétricas na composição de uma equação genérica e equações específicas para espécies comerciais na Floresta Nacional do Tapajós.

No contexto avaliado, não é recomendado a utilização da estratificação por classes diâmetro pois resultaram em estatística de precisão inferiores aos do cenário I e II, para todas as espécies analisadas, exceto para a classe de 75 cm, amplitude de 50 cm da espécie *L. lurida*. Não justificando a utilização desse método.

REFERÊNCIAS

- AHRENS, S. **Importância da distribuição de resíduos de regressão na seleção de equações de volume**. 4º Congresso Florestal Brasileiro. 1982. Curitiba: EMBRAPA-URPFCS, Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/103293/1/ImportanciaDistribuicao0001.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2019.
- ASNER, G.P; KELLER, M; PEREIRA, R; ZWEEDE, J.C; SILVA, J.N.M; 2004. Canopy damage and recovery after selective logging in Amazonia: field and satellite studies. **Ecological Applications**, Washington, v. 14, n. sp4, p. 280-298, 2004.
- BAPTISTA, F. R. C. B.; ATAÍDE, D. H. S.; ROCHA, P. V.; SILVA, L. C.; ARAÚJO, E. J. G.; CURTO, R. A.; MENDONÇA, B. A. F. Estratificação no ajuste de modelos de relação hipsométrica em fragmento de floresta inequiânea. **Scientific Electronic Archives**, Rondonópolis, v. 12, n. 6, p. 52 - 61, 2019.
- CASTRO, R. V. O.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, F. B.; LEITE, H. G. Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 3, p. 287-295, 2013.
- CRUZ, G. S.; SILVA-RIBEIRO, R. B.; 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. **Advances in Forestry Science**, Cuiabá, v. 6, n. 1, p. 549-554, 2019.
- CYSNEIROS, V.C.; PELISSARI, A.L.; MACHADO, S.A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; SOUZA, L. Modelos genéricos e específicos para estimativa do volume comercial em uma floresta sob concessão na Amazônia. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 114, p. 295-304, 2017.
- DANCY, C.P.; REIDY, J. **Estatística sem matemática para psicologia**. 5ª ed. Porto Alegre: Penso, 2013.
- DE LIMA, R. B; RUTISHAUSER, E; DA SILVA, J. A. A; GUEDES, M. C; HERAULT, B; DE OLIVEIRA, C. P; FERREIRA, R. L. C. Accurate Estimation of Commercial Volume in Tropical Forests. **Forest Science**, 2020.
- EMILIANO, P. C. **Fundamentos e aplicações dos critérios de informação: Akaike e Bayesiano**. 2009. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) - Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2009.
- DRAPER N. R, SMITH H. **Applied regression analisys**. 2. Ed. New York: J. Wiley, 1980.
- FERNANDES, N.P.; JARDIM, F.C.S.; HIGUCHI, N. Tabelas de volume para a floresta de terra firme na estação experimental de silvicultura tropical. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 13, n. 3-4, p. 537-545, 1983.
- 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. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 12, n. 4, p. 535-542, 2017.

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. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 106, p. 291-301, 2015.

GRUBBS, F. E. Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. **Technometrics**, v. 11, n. 1, p. 13-14. 1969.

HIRAMATSU, N. A. **Equações de volume comercial para espécies nativas na região do vale do Jari, Amazônia Oriental**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

HOFFMANN, R. **Análise de regressão: uma introdução à Econometria**. 5 ed. Piracicaba: Esalq, USP, 2016.

MACHADO, S. A.; CONCEIÇÃO, M. B. da; FIGUEIREDO, D. J. de. Modelagem do volume individual para diferentes idades e regimes de desbaste em plantações de *Pinus oocarpa*. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava/Iratí, v. 4, n. 2, p. 186-197, jul/dez, 2002.

MAIA, A.G. **Econometria: conceitos e aplicações**. 1ª ed. São Paulo: Editora Saint Paul, 2017.

MAIA, E.; SIQUEIRA, D.L.; SILVA, F.F.; PETERNELLI, L.A.; SALOMÃO, L.C.C. Método de comparação de modelos de regressão não-lineares em bananeiras. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.5, p.1380-1386, ago, 2009.

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

NICOLETTI, M. F.; BATISTA, J. L. F.; CARVALHO, S. D. P. C.; DE CASTRO, T. N. Acurácia de dois dendrômetros ópticos na cubagem não destrutiva para a determinação da biomassa florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 70, p. 139, 2012.

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, 2017.

PHILLIPS, P. D.; AZEVEDO, C. P.; DEGEN, B.; THOMPSON, I. S.; SILVA, J. N. M.; VAN GARDINGEN, P. R. An individual based spatially explicit simulation model for strategic forest management planning in the eastern Amazon. **Ecological Modelling**, n. 173, p. 335-354. 2004.

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.

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, 2019.

SARMENTO, A. S. L. **Equações de volume para estimativa de biomassa de Castanha da Amazônia**. 2015. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical) - Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2015.

SCOLFORO, J. R. **Biometria Florestal: Parte I: Modelos de regressão linear e não-linear. Parte II: Modelos para relação hipsométrica, volume, afilamento, e peso de matéria seca.** Lavras: UFLA/FAEPE, 2005.

SILVA, F.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R.; Equações de afilamento para descrever o volume total do fuste de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na região do Triângulo Mineiro. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 91, p. 367-376, 2011.

SILVA, J.N.M.; CARVALHO, J.O.P.; LOPES, J.C.A.; CARVALHO, M.S.P. Equações de volume para a floresta nacional do Tapajós. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Curitiba, v. 8, p. 50-63, 1984.

SILVA-RIBEIRO, R. B. **Quantificação e valoração de resíduos da colheita florestal na Floresta Nacional do Tapajós, Pará.** 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

SILVA RIBEIRO, R. B.; 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.

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

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, v. 35, n. 5, p. 1039-1051, 2011.

TEAM, R. Core. R version 3.5. 1 (Feather Spray): A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. URL <https://www.r-project.org>, 2018.

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

THOMAS, C.; ANDRADE, C. M.; SCHENEIDER, 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, p. 319-327, 2006.

TONINI, H.; BORGES, R.A. Equação de volume para espécies comerciais em Floresta Ombrófila Densa no sul de Roraima. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 82, p. 111-117, 2015.

WICKHAM, Hadley. **ggplot2: elegant graphics for data analysis.** springer, 2016.

CAPÍTULO II - MODELAGEM DE EFEITO MISTO PARA PREDIÇÃO VOLUMÉTRICA DE CINCO ESPÉCIES COMERCIAIS EM UMA ÁREA SOB CONCESSÃO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

RESUMO

O manejo de florestas inequidâneas tem o constante desafio de obter estimativas do volume comercial das árvores de forma eficiente e precisa, impulsionando de forma contínua a busca por ferramentas e métodos que possibilitem uma menor amplitude de erro nessas predições. O estudo objetivou ajustar modelos de efeito misto para cinco principais espécies manejadas na Floresta Nacional do Tapajós - PA e comparar sua eficiência na predição do volume comercial individual em relação aos modelos tradicionais. Foram utilizados dados de romaneio e inventário 100% de dez unidades de produção anual (UPAs) localizadas na Floresta Nacional do Tapajós, município Belterra, estado do Pará. Previamente, foi selecionada a melhor equação para ajuste geral para 44 espécies (cenário I) e específico para cada uma das cinco espécies com maior volume explorado (cenário II). Observado a superioridade do modelo de Schumacher e Hall não linear em ambos os cenários, foi adicionado a sua estrutura a variável aleatória área basal por UPA (G/UPA). Para a comparação entre os modelos de efeito misto e o modelo tradicional, avaliaram-se a raiz quadrática do erro médio (RMSE), Critério de informação de Akaike (AIC), Critério de informação Bayesiano (BIC), dispersão de resíduo e o valor da log-verossimilhança (LogLik). O modelo de efeito misto de Schumacher e Hall resultou em maior precisão em relação a sua forma original, apenas com efeitos fixos, acarretou em aumento da precisão na predição do volume comercial para os cenários I e II. No entanto, para obter uma aplicabilidade real na predição do volume de novas árvores é necessário fazer a calibração do modelo de efeito misto.

Palavras-chave: Modelo de efeito misto. Floresta Tropical. Comparação entre modelos.

ABSTRACT

The management of Uneven Aged Forest has the constant challenge of obtaining estimates of the commercial volume of trees efficiently and accurately, continuously driving the search for tools and methods that allow a smaller amplitude of error in these predictions. The study aimed to fit mixed-effect models for five main species managed in the Tapajos National Forest – PA and compare their efficiency in predicting individual commercial volume in relation to traditional models. Data on diameter to breast height (dbh) and total height used for adjustments come from the measurement of the stem and packing data of the logs of ten Annual Production Units located in the Tapajos National Forest. Previously, the best equation was selected for overall fitted for 44 species (scenario I) and specific for each of the five species with the highest volume explored (scenario II). Observing the superiority of the Schumacher and Hall nonlinear model in both scenarios, the random variable basal area per UPA (G/UPA) was added to its structure. For the comparison between mixed effect models and the traditional model, the root mean square Error (RMSE), Akaike Information Criterion (AIC), Bayesian Information Criterion (BIC), residue dispersion and log-likelihood value (LogLik) were evaluated. The mixed effect model of Schumacher and Hall resulted in greater accuracy in relation to its original shape, only with fixed effects, resulted in increased accuracy in predicting the commercial volume for scenarios I and II. However, to obtain a real applicability in predicting the volume of new trees it is necessary to do the calibration of the mixed effect model.

Keywords: Mixed-effects model. Tropical forest. Comparing models.

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia tem como um dos principais usos da terra o manejo florestal, no entanto, é necessário conhecer a estrutura e o estoque volumétrico existente para manejar florestas naturais, com o intuito de maximizar a produção e a rentabilidade. Para se obter informações referentes a volumetria da floresta é necessário a execução de inventários florestais, onde, com base em variáveis coletadas, são ajustados modelos estatísticos para predizer o volume comercial da área a ser manejada (THAINES *et al.*, 2010; SOARES *et al.*, 2011; SILVA; SANTANA, 2014; TONINI; BORGES, 2015).

Apesar disso, obter o volume comercial das árvores de forma eficiente e precisa é um grande desafio, pois as florestas tropicais naturais são compostas por uma grande diversidade de espécies com diâmetros e formas de fuste que variam entre si ou até mesmo entre árvores da mesma espécie. Essas características acarretam em base de dados com alta heterogeneidade e em estimativas com maior amplitude de erro (SOARES *et al.*, 2011; SANTOS *et al.*, 2012).

Diante da necessidade de predizer o volume de forma acurada, outros cenários vêm sendo testados, como ajustes específicos, por classes diamétricas e por grupos de espécies, além do emprego de modelos não lineares e de afilamento e modelos de efeito misto. Atualmente, a modelagem de efeito misto vem sendo utilizada principalmente em florestas plantadas na análise do afilamento, área basal e volumetria, principalmente de espécies do gênero *Pinus* e *Eucalyptus*. Autores como Carvalho *et al.* (2014) e Nicoletti *et al.* (2019) desenvolveram estudos voltados para afilamento, já Calejario *et al.* (2004); Calejario *et al.* (2005) e Cunha; Finger e Schneider (2013) estudaram a aplicação desse tipo de modelagem na predição da área basal e Carvalho *et al.* (2011) e Gouveia *et al.* (2015) aplicaram na predição de volume.

Esse tipo de modelagem é considerado como uma das técnicas mais sofisticadas de regressão, que possibilita a utilização de dados originais sem a necessidade de transformação das variáveis para atender as pressuposições como independência entre as observações, distribuição aleatória, normal e idêntica dos resíduos com média zero e variância constante que são básicas na análise de regressão (LAPPI, 1991).

Em algumas situações, os modelos de efeito misto permitem generalizar estruturas de correlações espaço-temporais, variâncias não constantes, e em modelos generalizados de efeito misto (GLMN) permite-se generalizações de famílias de distribuições de probabilidade (CARVALHO, 2013). Além disto, consideram a presença de efeitos fixos e aleatórios na base de dados (PERRI; IEMMA, 1999; CALEGARIO *et al.*, 2015). A parte aleatória é incluída no modelo tradicional, apenas com variáveis fixas, por meio de uma matriz de variância e covariância.

Ela consiste não apenas em efeitos fixos associados a toda população como na modelagem tradicional, mas também considera efeitos aleatórios que representam variação específica de cada observação ou entre diferentes grupos. Essa variação é avaliada por meio da inserção dos efeitos das estruturas de variância e covariância dos grupos para minimizar os erros de precisão e melhorar as previsões (PERRI; IEMMA, 1999; PINHEIRO; BATES, 2000; NICOLETTI, 2017). Diante da constante busca por resultados mais precisos e maior produtividade das florestas tropicais o emprego de novas técnicas, como a modelagem de efeito misto, que tornem mais eficientes essas estimativas do estoque volumétrico são de grande importância para o manejo florestal, neste contexto, este estudo objetivou ajustar modelos de efeito misto para cinco principais espécies manejadas na Floresta Nacional do Tapajós e comparar sua precisão na predição do volume comercial em relação a modelagem tradicional.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 COLETA DE DADOS

Os dados referentes a diâmetro medido à 1,30 m do solo (dap) e altura comercial (hc), utilizados nos ajustes dos modelos mistos volumétricos, foram provenientes do inventário 100% e romaneio de toras das UPAs, realizado pela COOMFLONA. As árvores foram cubadas pelo método de Smalian, que na ocasião consistiu na obtenção de diâmetros da base e topo da tora, considerando comprimentos entre 4 e 7 m (SILVA-RIBEIRO; GAMA; MELO, 2014). Para a obtenção da equação genérica (cenário I) foram utilizadas 23.912 árvores de 44 espécies ($50 \text{ cm} \leq \text{dap} < 180 \text{ cm}$). Destas, foram selecionadas as cinco espécies mais exploradas, representando cerca de 59% do volume explorado dez anos. Assim, totalizou 13.967 árvores para o ajuste do modelo misto volumétricos específicos (cenário II) de cada espécie (Tabela 12).

Tabela 12 - Lista de espécies selecionadas para os ajustes específicos dos modelos volumétricos, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

Nome científico	n	UPA	Amp. dap	Volume explorado (%)
<i>Couratari guianensis</i> Aubl.	2.690	2 - 11	50-160	7
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	1.433	2 - 11	70-170	13
<i>Lecythis lurida</i> (Miers) S.A. Mori	2.616	2 - 11	50-160	19
<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.)	5.725	2 - 11	50-150	11
<i>Vochysia maxima</i> Ducke	1.503	4; 7-11	50-180	9

Em que: n: número de árvores cubadas; UPA: Unidade de Produção Anual; Amp. dap: amplitude dos dados de diâmetro altura do peito usados nos ajustes específicos sem estratificação diamétrica.

2.2 AJUSTE E SELEÇÃO DOS MODELOS

Foram testados previamente dez modelos volumétricos em cada cenário, de simples e dupla entrada, lineares e não lineares, usados na ciência florestal, para a obtenção de uma equação genérica e específica de cada espécie das cinco avaliadas, conforme ilustrado na Tabela 3, citada no capítulo I. Com base nos resultados previamente obtidos, o modelo de Schumacher e Hall não linear foi o modelo que melhor se ajustou aos dados de todos os cenários (Tabela 13). A partir da seleção dessas equações, duas variáveis aleatórias foram pré avaliadas, área basal por UPA (G/UPA) e área basal por hectare (G/ha). No entanto foi avaliado apenas o uso da G/UPA, que apresentou estatística melhor que a G/ha. Para a obtenção de um modelo de efeitos mistos, constituído com parâmetros fixos, provenientes de cada equação pré-selecionada, e aleatórios (G/UPA). A variável selecionada foi incorporada ao parâmetro β_2 , Altura comercial (hc), para a avaliar a influência da variável aleatória, G/UPA, sobre a variável fixa, hc, consegue explicar melhor o volume comercial das árvores de cada cenário.

Quando se trata de florestas primárias, a área basal pode ser considerada como um importante indicador de qualidade de sítio, onde maiores áreas basais indicam locais mais produtivos (ALDER; SYNNOTT, 1992; FIGUEIREDO FILHO *et al.*, 2010). A escolha do parâmetro β_2 , hc, está relacionado ao fato dessa variável ter influência em relação ao aproveitamento das árvores principalmente pela retirada de toras com presença de podridão interna ou rachaduras. Portanto, espera-se que a adição da variabilidade da área possa explicar melhor o volume comercial, uma vez que as árvores do mesmo local tendem a ser mais semelhantes umas às outras do que árvores de diferentes áreas.

Tabela 13 - Equações pré-selecionadas para a predição do volume comercial individual nos respectivos cenários, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

Cenário	S _{yx} %	AIC	BIC	Equação
Agrupamento das espécies	25,1	96.055,5	96.087,8	$v = 0,00019 * dap^{1,78166} * hc^{0,84709} + \varepsilon$
<i>C. guianensis</i>	26,6	12.008,1	12.031,7	$v = 0,00052 * dap^{1,57866} * hc^{0,83415} + \varepsilon$
<i>H. courbaril</i>	17,4	6.407,4	6.428,5	$v = 0,00023 * dap^{1,73544} * hc^{0,87278} + \varepsilon$
<i>L. lurida</i>	21,0	8.636,1	8.659,6	$v = 0,00025 * dap^{1,77118} * hc^{0,76529} + \varepsilon$
<i>M. elata</i>	21,5	18.636,9	18.663,5	$v = 0,00037 * dap^{1,62918} * hc^{0,83883} + \varepsilon$
<i>V. maxima</i>	29,4	7.104,4	7.125,7	$v = 0,00047 * dap^{1,59277} * hc^{0,86640} + \varepsilon$

Em que: S_{yx} %: erro padrão da estimativa em porcentagem; AIC: critério de informação Akaike; BIC: critério de informação Bayesiano; v: volume individual comercial, em m³; dap: diâmetro à altura do peito, em cm; hc: altura comercial, em m; ε : erro aleatório.

A estrutura do modelo de efeito misto utilizado está descrita a seguir (Equação 14):

$$y_i = f(\phi_i, x_i) + \varepsilon_i \quad (14)$$

Em que: y_i : volume comercial individual, em m^3 ; x_i : vetor de covariáveis da i -ésima árvore; f : função diferenciável e não linear em pelo menos um dos componentes do vetor de parâmetros ϕ_i ; ε_i : vetor de erros aleatórios.

O vetor de parâmetros no modelo misto varia individualmente e representa a combinação dos efeitos fixos e aleatórios. De modo geral, o modelo de Schumacher e Hall misto testado no estudo pode ser representado da seguinte forma (Equação 15):

$$v = \beta_0 * dap^{\beta_1} * hc^{(\beta_2 + \varphi_2)} + \varepsilon \quad (15)$$

Em que: v : volume comercial individual, em m^3 ; dap : diâmetro à altura do peito, em cm; hc : altura comercial, em m; β_i : coeficientes fixos do modelo; φ_i : coeficientes aleatórios do modelo; ε : erros aleatórios.

Como critérios para a escolha do melhor modelo, foi considerado os seguintes parâmetros de precisão:

2.2.1 Raiz quadrada do erro médio (RMSE)

O uso dessa estatística é recomendado quando há a presença de variáveis colineares no modelo. Trata-se de uma métrica frequentemente usada para expressar a qualidade de precisão das estimativas obtidas, quanto menor o seu valor mais próximo os dados estimados estão dos dados observado e consequentemente, mais preciso é o modelo avaliado (MOSER; OLIVEIRA, 2017). Para o cálculo do RMSE é utilizada a seguinte expressão (Equação 16):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (16)$$

Em que: RMSE: raiz quadrada do erro médio, em m^3 ; Y_i : volume observado, em m^3 ; \hat{Y}_i : volume estimado, em m^3 ; n : número de observações.

2.2.2 Critério de informação de Akaike (AIC)

O AIC é um critério que se baseia no valor da verossimilhança, no número de parâmetro do modelo, estima a discrepância geral relativa entre um modelo de aproximação e o modelo real (hipotético) que gerou os dados. Desta forma, quanto menor o valor do AIC de um modelo, menor sua discrepância geral estimada e, por consequência, menor sua distância relativa para o modelo real (hipotético) (BARBOSA, 2009; NICOLETTI *et al.*, 2012). O AIC é calculado pela equação 12:

$$AIC = -2 \ln(L) + 2p \quad (12)$$

Em que: \ln : logaritmo na base neperiana; L: valor de máxima verossimilhança apresentado pelo modelo; p: número de parâmetros.

2.2.3 Critério de Informação Bayesiano (BIC)

É um critério que se baseia na verossimilhança e na aproximação da probabilidade posterior, além de penalizar o número de parâmetros do modelo. Desta forma, é considerado o melhor modelo aquele que minimiza o seu valor (EMILIANO, 2009). O BIC é calculado pela equação 13:

$$BIC = -2 \ln(L) + p \ln(n) \quad (13)$$

Em que: \ln : logaritmo neperiano; L: valor da máxima verossimilhança apresentada pelo modelo; p: número de parâmetros; n: número de observações.

2.2.4 Análise gráfica

A análise da distribuição gráfica de resíduos é um critério importante, pois possibilita a verificação do ajuste da equação ao longo da amplitude dos dados. Permite detectar se há ou não tendenciosidade na estimativa da variável dependente ao longo da linha de regressão, ou seja, se a dispersão dos pontos ao longo do eixo da variável independente indica de forma clara se o ajuste subestima ou superestima a variável dependente. Sendo determinante na avaliação da qualidade das estimativas, para tomada de decisão quanto à utilização ou não do modelo (BARRETO *et al.*, 2014). Os resíduos são calculados por meio da equação 10:

$$\text{Resíduo}_{\%} = \left(\frac{Y_i - \hat{Y}_i}{\bar{Y}_i} \right) \cdot 100 \quad (10)$$

Em que: \bar{Y}_i : média da variável observada; \hat{Y}_i : variável dependente estimada; Y_i : variável dependente observada.

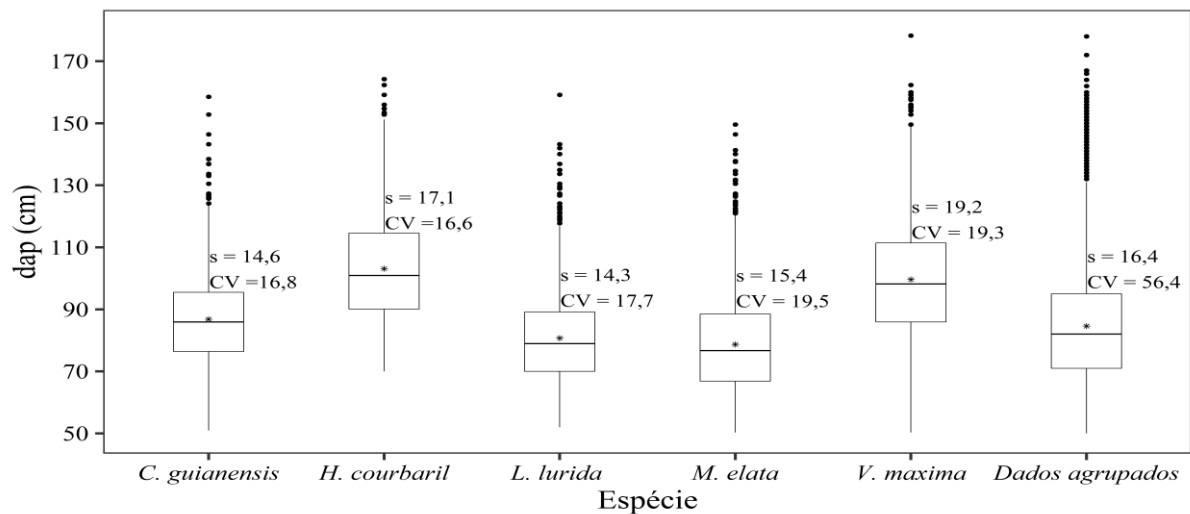
Para complementar a comparação entre os modelos foi avaliado o valor da log-verossimilhança, quanto maior esse valor, melhor o modelo. O processamento e análise de dados foram realizados no software Estatístico R (R CORE TEAM, 2018), utilizando o pacote *nlme* para os ajustes dos modelos mistos não lineares e o pacote *ggplot2* para a construção dos gráficos.

3 RESULTADOS

3.1 ESTATÍSTICA DESCRITIVA

Com base no conjunto de dados analisado, a Figura 10 apresenta a estatística descritiva para o dap para os dados agrupados (primeiro cenário) e das cinco espécies mais importantes (segundo cenário). Ao avaliar as medidas de variabilidade, desvio padrão (s) e coeficiente de variação ($CV_{(\%)}$) para o agrupamento de todas as espécies, foi possível observar a grande heterogeneidade da variável dap. Esse resultado já era esperado para a floresta analisada, pois se trata de uma floresta natural inequidânea composta por uma grande variação de espécies com características distintas, refletindo na alta heterogeneidade do conjunto de dados ($CV = 56\%$). Entretanto, ao avaliar especificamente cada espécie esse percentual reduz em média 68%, o que indica maior homogeneidade para o conjunto de dados específico (Figura 10).

Figura 5 - Boxplots do diâmetro à altura do peito para os dados agrupados e para as cinco espécies mais exploradas, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



Em que: dap: diâmetro à altura do peito, em cm; s: desvio padrão, em cm; CV: coeficiente de variação, em %; *: média do diâmetro à altura do peito, em cm.

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

3.2 AJUSTE DOS MODELOS

3.2.1 Modelo genérico

Com base na melhor equação para o conjunto geral de dados, foi adicionado a variação da área basal de cada UPA (G/UPA). Além da variação que essa variável tem em relação ao tamanho de cada UPA, a área basal é um importante indicador de qualidade de sítio, onde maiores G podem indicar um local de maior produtividade (ALDER; SYNNOTT, 1992; FIGUEIREDO FILHO *et al.*, 2010).

Analisando os resultados da Tabelas 14, percebe-se que a modelagem de efeito misto (MEM) proporcionou parâmetros fixos e aleatórios significativos de acordo com o teste t a 95% de probabilidade, o que indica que a G/UPA exerce influência sobre a altura comercial e que o modelo pode ser utilizado para estimar o volume comercial das árvores. Ao comparar a variação entre os parâmetros fixos do MEM em relação ao modelo tradicional (MT), Tabelas 13 e 14, nota-se pouca variação, entretanto isso pode contribuir para melhores previsões com o MEM. Gouveia *et al.* (2015), ao utilizarem o modelo de Schumacher e Hall não linear misto para a predição de volume de *Eucalyptus* obtiveram aumento na precisão das estimativas e significância em todos os parâmetros em Araripe, Pernambuco.

Tabela 14 - Parâmetros fixos e aleatórios da equação mista de Schumacher e Hall, para dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

UPA	Área (ha)	G/UPA	Parâmetros			
			β_0	β_1	β_2	φ_2
2	300	215,451				-0,04937*
3	500	594,307				-0,03589*
4	700	1.063,367				-0,01386*
5	1.000	1.077,396				-0,00584*
6	1.000	1.093,182	0,00017*	1,80392*	0,84336*	0,01158*
7	1.000	1.328,454				0,02408*
8	1.000	1.407,509				0,00538*
9	1.600	2.840,055				0,00668*
10	1.600	2.440,109				0,01447*
11	1.600	2.020,119				0,04276*

Em que: UPA: Unidade de Produção Anual; G/UPA: área basal da UPA, em m²/UPA; β_i : parâmetros fixos da equação; φ_2 : parâmetro aleatório da equação; *: parâmetro significativo de acordo com o teste t à 95% de probabilidade.

Ao comparar estatística de precisão do modelo Schumacher e Hall tradicional (SHT), selecionado previamente com o modelo de Schumacher e Hall misto (SHM), foi possível observar que a inserção da variável aleatória (G/UPA) apresentou resultados positivos. Percebe-se a redução de 10% no RMSE, cerca de 2% no AIC e BIC, 4% no erro padrão residual e aumento significativo no log-verossimilhança (Tabela 15). Mesmo com a melhora da estatística dos modelos mistos, o S_{yx} foi superior a 20%, considerado valores altos e baixa precisão.

Tabela 15 - Estatística de precisão das equações genéricas, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

Modelo	RMSE	AIC	BIC	LogLik
SHT	1,8	96.055,5	96.087,8	-47.089,69
SHM	1,7	94.189,4	94.229,8	-48.023,73

Em que: RMSE: raiz quadrada do erro médio; AIC: critério de informação Akaike; BIC: critério de informação Bayesiano; LogLik: Log-verossimilhança; SHT: Schumacher e Hall tradicional; SHM: Schumacher e Hall misto.

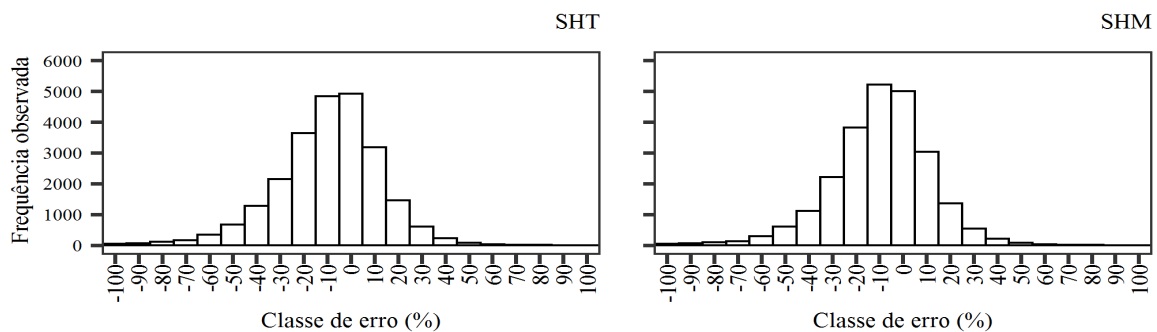
A ausência de estudos com modelos volumétricos mistos na Amazônia dificulta a comparação dos resultados, no entanto, a superioridade deste tipo de modelagem é notável em florestas plantadas. Em estudo realizado por Gouveia *et al.* (2015), que avaliaram o uso de modelos não lineares de efeitos mistos para estimar o volume *Eucalyptus urophylla*, foi observado que o desempenho deste tipo de modelagem também foi superior quando comparado ao modelo SHT. Além da melhora na estatística de precisão, os autores ainda ressaltam que uma das grandes vantagens da inclusão de efeitos aleatórios, com relação aos modelos de efeitos fixos, é a redução do erro padrão residual, que em seu estudo foi de aproximadamente 40%.

Carvalho *et al.* (2014), que avaliaram uso modelagem não linear mista para descrever o afilamento e estimar o volume individual de árvores clonais de *Eucalyptus* sp. encontraram uma redução considerável do erro-padrão, cerca de 40%. Em ambas as situações os resultados foram muito superiores ao observados neste estudo, esta superioridade nos resultados pode estar relacionada com homogeneidade dos plantios florestais, que consequentemente gera conjuntos de dados com pouca variabilidade.

Diferente da realidade das florestas inequidâneas, que possuem grande heterogeneidade, no entanto, Nascimento *et al.* (2020) ao avaliarem a predição da altura para espécies amazônicas com o uso da modelagem de efeito misto concluíram que o tratamento prévio minucioso do banco de dados, para verificação de possíveis erros e remoção de valores discrepantes, resultou em estimativas finais mais precisas, ou seja, dedicar um tempo maior buscando estratégias para refinar o conjunto de dados, sem descaracterizar a heterogeneidade comum das florestas naturais, associada ao uso da modelagem mista pode fornecer predições mais acuradas.

Ao avaliar a tendência geral dos resíduos para os dados agrupados do modelo SHM em comparação ao modelo SHT, por meio dos histogramas de resíduos e dispersão de resíduos, Figura 6 e Anexo HHH, respectivamente. A adição da área basal resultou em grande dispersão dos resíduos e tendência a superestimativa para as árvores de grandes diâmetros, >100 cm (Anexo HHH), assim como o modelo mais simples. No entanto, a Figura 11 mostra que o modelo SHM teve um aumento número de observações na classe de erro 10, refletindo em um maior agrupamento próximo a classe 0, ilustrando o reflexo positivo da adição de efeitos aleatórios na regressão.

Figura 6 - Histograma de resíduos dos modelos SHT e SHM para os dados agrupados de dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

3.2.2 Ajuste específicos

Após o ajuste do modelo misto específico os parâmetros fixos e aleatórios preditos para cada espécie foram significativos de acordo com o teste t a 95% de probabilidade, desta forma, podem ser utilizadas para a estimativa dos volumes comerciais específicos (Anexo III-MMM). Ao avaliar a estatística de precisão do modelo SHM foi observado melhorias no RMSE, AIC, BIC e aumento significativo na log-verossimilhança, as espécies obtiveram redução média de cerca de 7% na RMSE, 3% no AIC e BIC. A espécie *H. courbaril* obteve a redução mais expressiva com 9% na RMSE, enquanto o mínimo foi de 4% para a espécie e *C. guianensis*. No entanto apenas esta última espécie apresentou redução menor que os 10% obtido para no cenário I (Tabela 16).

Assim como no RMSE, foi observado melhora nas estatísticas AIC e BIC, que variou de 1 a 8% para a espécie *C. guianensis* e *M. elata*, respectivamente. Esta última foi a que teve os melhores resultados quando se trata da comparação da modelagem tradicional com a mista, com os menores valores de RMSE. Em estudo realizado por Dolácio *et al.* (2019), em um plantio de 17 anos no estado do Pará, os autores concluem que a equação de SHM para a estimativa do volume comercial de *Swietenia macrophylla* é mais precisa que o SHT, reduzindo cerca de 31% no RMSE. Com base nos resultados deste estudo é notável que a técnica da MEM é muito promissora e deve ser mais explorada em florestas tropicais, implementando outras metodologias de estratificação e variáveis aleatórias.

Tabela 16 - Estatística de precisão das equações específicas, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

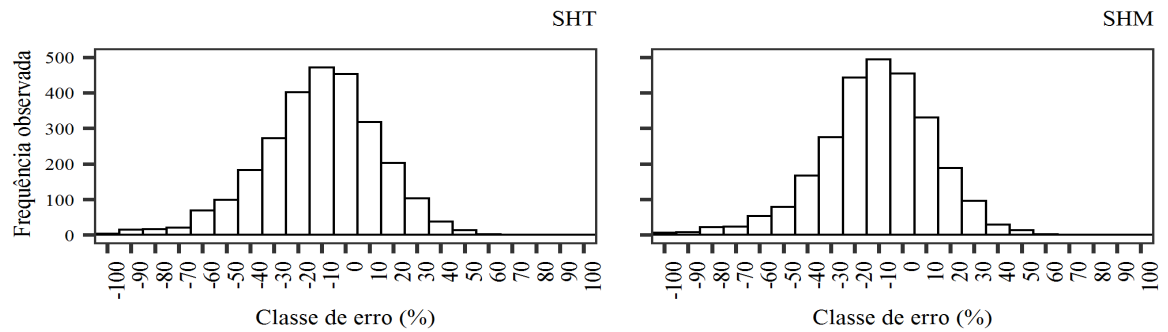
Espécie	Equação	RMSE	AIC	BIC	LogLik
<i>C. guianensis</i>	SHT	2,3	12.008,1	12.031,7	-6.000,0
	SHM	2,2	11.860,1	11.889,6	-5.925,1
<i>H. courbaril</i>	SHT	2,3	6.407,4	6.428,5	-3.199,7
	SHM	2,1	6.275,3	6.301,6	-3.132,6
<i>L. lurida</i>	SHT	1,3	8.636,1	8.659,6	-4.314,0
	SHM	1,2	8.355,4	8.384,8	-4.172,7
<i>M. elata</i>	SHT	1,2	18.636,9	18.663,5	-9.314,4
	SHM	1,1	17.319,7	17.353,0	-8.654,8
<i>V. maxima</i>	SHT	2,6	7.104,4	7.125,7	-3.548,2
	SHM	2,4	6.941,6	6.968,2	-3.465,8

Em que: RMSE: raiz quadrada do erro médio; AIC: critério de informação Akaike; BIC: critério de informação Bayesiano; LogLik: log-verossimilhança; SHT: Schumacher e Hall tradicional; SHM: Schumacher e Hall misto.

O histograma dos resíduos neste cenário seguiu a mesma tendência do ajuste genérico, o modelo misto, apesar de resultar em grande dispersão dos resíduos, concentrou um número

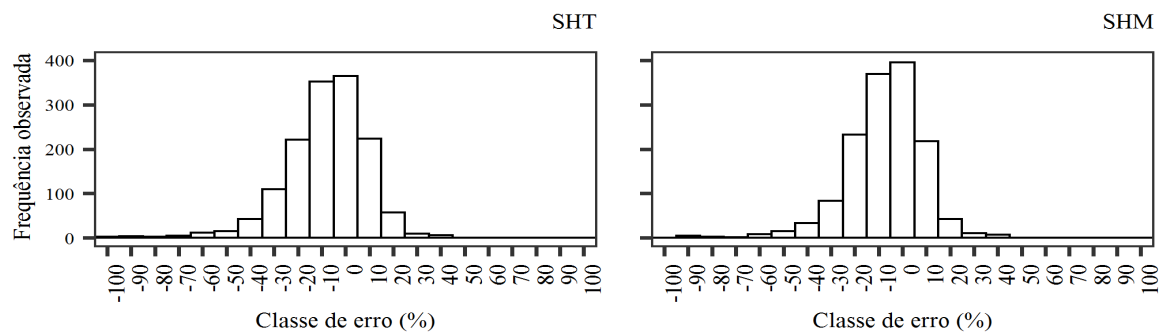
maior de observações em classes próximas ao 0, reflexo do melhor ajuste que essa modelagem proporcionou para todas as espécies (Figuras 7-11). A tendência em superestimativa também foi observada em todas as espécies, principalmente em árvores de grandes diâmetros.

Figura 7 - Histograma de resíduos dos modelos SHT e SHM para a espécie *C. guianensis*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



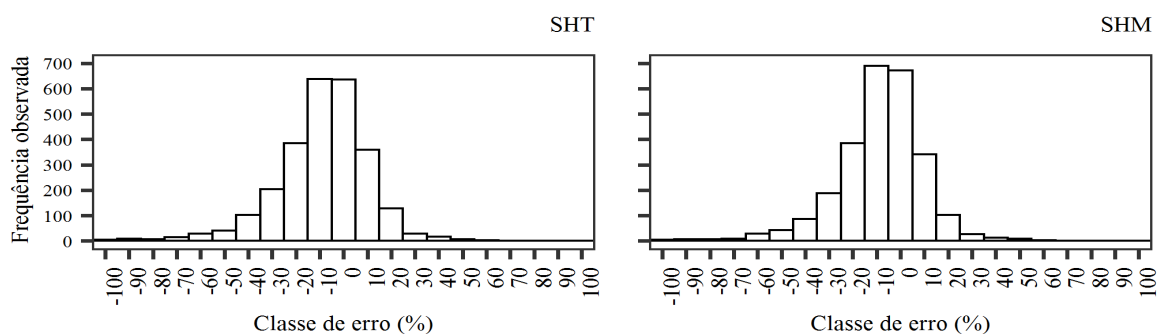
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 8 - Histograma de resíduos dos modelos SHT e SHM para a espécie *H. courbaril*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



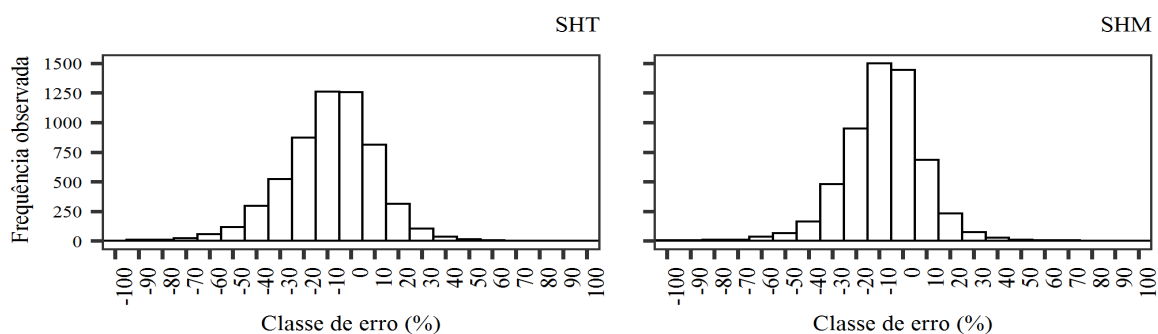
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 9 - Histograma de resíduos dos modelos SHT e SHM para a espécie *L. lurida*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



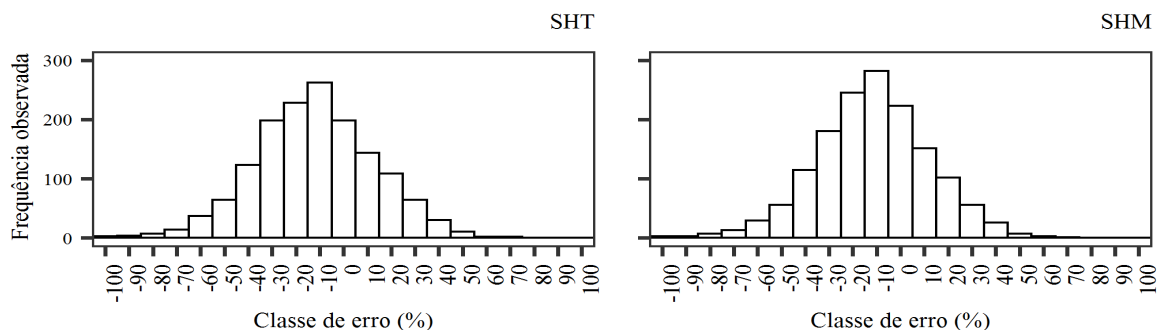
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 10 - Histograma de resíduos dos modelos SHT e SHM para a espécie *M. elata*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 11 - Histograma de resíduos dos modelos SHT e SHM para a espécie *V. maxima*, em seis UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

4 CONCLUSÕES

O modelo de efeito misto de Schumacher e Hall resultou em maior precisão em relação a sua forma original, apenas os efeitos fixos, acarretando em aumento da precisão na predição do volume comercial para os cenários I e II.

São necessários mais estudos em florestas tropicais, sendo recomendados o uso de outras metodologias de estratificação associada a outras variáveis aleatórias, além da verificação da influência da variável aleatória nas demais variáveis dendrométricas como dap e volume.

Para obter uma aplicabilidade real na predição do volume de novas árvores é necessário fazer a calibração do modelo de efeito misto.

REFERÊNCIAS

- ALDER, D.; SYNNOTT, T. J. **Permanent sample plot techniques for mixed tropical forest**. Oxford: Oxford Forestry Institute, 1992.
- BARBOSA, M. **Uma abordagem para análise de dados com medidas repetidas utilizando modelos lineares mistos**. 2009. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2009.
- 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. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, p. 1-9, 2014.
- CALEGARIO, N.; DANIELS, R. F.; MAESTRI, R.; NEIVA, R. Desenvolvimento de um modelo linear de efeito misto na estimativa do crescimento e produção de povoamentos clonais de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 10, n. 1, p. 67-86, 2004.
- CALEGARIO, N.; MAESTRI, R.; LEAL, C. L.; DANIELS, R. F. Estimativa do crescimento de povoamentos de *Eucalyptus* baseada na teoria dos modelos não lineares em multinível de efeito misto. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 3, p. 285-292, 2005.
- CALEGARIO, N.; DANIELS, R. F.; MAESTRI, R.; NEIVA, R. (2015). The development of a linear mixed-effect model to estimate growth and yield of clonal *Eucalyptus* stands. **Cerne**, Lavras, v. 10, n. 1, p. 067-086, 2015.
- CARVALHO, S. P. C.; CALEGARIO, N.; SILVA, F. F.; BORGES, L. A. C.; MENDONÇA, A. R.; LIMA, M. P. Modelos não lineares generalizados aplicados na predição da área basal e volume de *Eucalyptus* clonal. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 541-548, 2011.
- CARVALHO, S. P. C. **Estimativa volumétrica por modelo misto e tecnologia laser aerotransportado em plantios clonais de *Eucalyptus* sp.** 2013. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.
- CARVALHO, S. P. C.; RODRIGUEZ, L. C. E.; CALEGARIO, N.; SAVIAN, T. V.; LIMA, M. P.; SILVA, C. A.; NICOLETTI, M. F. Modelagem não linear mista para descrever o afilamento de árvores clonais de *Eucalyptus* sp. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 104, p. 605-614, 2014.
- CUNHA, T. A.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. Linear mixed model to describe the basal area increment for individual cedro (*Cedrela odorata* L.) trees in occidental Amazon, Brazil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 3, p. 461-470, 2013.
- DOLÁCIO, C. J. F.; DE OLIVEIRA, T. W. G.; OLIVEIRA, R. S.; CERQUEIRA, C. L.; COSTA, L. R. R. Different approaches for modeling *Swietenia macrophylla* comercial volume in an Amazon agroforestry system. **Agroforestry Systems**, p. 1-12, 2019.
- EMILIANO, P. C. **Fundamentos e aplicações dos critérios de informação: Akaike e Bayesiano**. 2009. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) - Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2009.
- FIGUEIREDO FILHO, A.; DIAS, A. N.; STEPKA, T. F.; SAWCZUK, A. R. Crescimento, mortalidade, ingresso e distribuição diamétrica em Floresta Ombrófila Mista. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, 2010.

- GOUVEIA, J. F.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C.; GADELHA, F. H. L.; LIMA FILHO, L. M. A. Modelos volumétricos mistos em clones de *Eucalyptus* no polo Gesseiro do Araripe, Pernambuco. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 3, p. 587-598, 2015.
- LAPPI, J. Calibration of height and volume equations with random parameters. **Forest Science**, v. 37, n. 3, p. 781-801, 1991.
- MOSER, P.; OLIVEIRA, L. Z. **Regressão aplicada à dendrometria**: Uma introdução e iniciação à linguagem R. Blumenau: Edifurb, 2017.
- NASCIMENTO, R. G. M.; VANCLAY, J. K.; FIGUEIREDO FILHO, A.; DO AMARAL MACHADO, S.; RUSCHEL, A. R.; HIRAMATSU, N. A.; DE 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**, p. 100028, 2020.
- NICOLETTI, M. F. **Modelagem não linear mista e método bivariado para sortimento da produção de *Pinus taeda* L.** 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- NICOLETTI, M. F.; BATTISTA, J. L. F.; CARVALHO, S. P. C. de; CASTRO, T. N. de. Acurácia de dois dendrômetros ópticos na cubagem não destrutiva para a determinação da biomassa florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 70, p. 139, 2012.
- NICOLETTI, M. F.; CARVALHO, S. P. C.; MACHADO, S. D. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; OLIVEIRA, G. S. Partial Volume Prediction Through Nonlinear Mixed Modeling. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 4, p. 1-10, 2019.
- PERRI, S. H. V.; IEMMA, A. F. Procedimento “Mixed” do SAS para análise de modelos mistos. **Scientia agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 959-967, 1999.
- PINHEIRO J.C, BATES D.M. **Mixed-effects models in S and S-PLUS**. New York: Springer-Verlag; 2000.
- PINHEIRO, J.; BATES, D.; DEBROY, S.; SARKAR, D.; TEAM, R. C. **nlme**: linear and nonlinear mixed effects models. R package version 3.1-137. Vienna: R Foundation, 2018.
- 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.
- SILVA RIBEIRO, R. B.; 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.
- SILVA, E. N.; SANTANA, A. C. Modelos de regressão para estimação do volume de árvores comerciais, em florestas de Paragominas. **Ceres**, Viçosa, v. 61, n. 5, p. 631 – 636, 2014.
- 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, v. 35, n. 5, p. 1039-1051, 2011.
- TEAM, R. Core. R version 3.5. 1 (Feather Spray): A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria**. URL <https://www.r-project.org>, 2018.

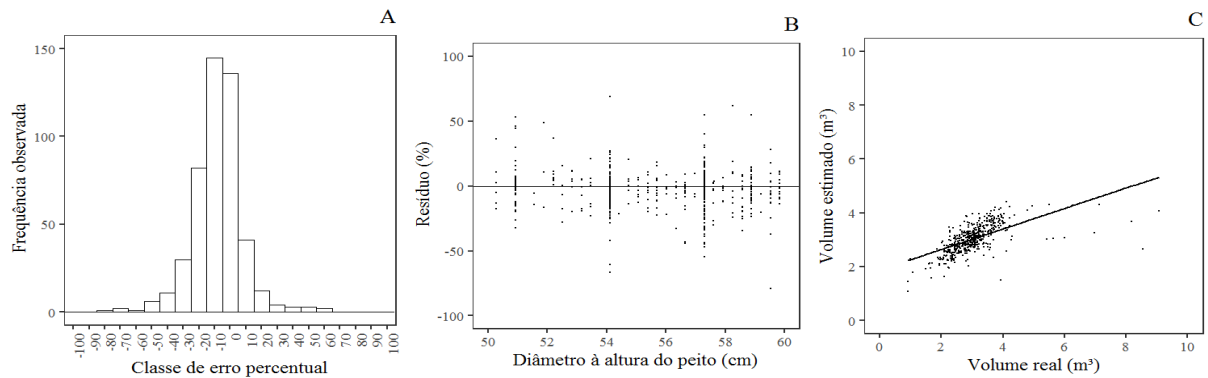
THAINES, F.; BRAZ, E.M.; MATTOS, P.P.; THAINES, A.A.R. Equações para estimativa de volume de madeira para a região da bacia Ituxi, Lábrea, AM. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 64, p. 283-289, 2010.

TONINI, H.; BORGES, R.A. Equação de volume para espécies comerciais em Floresta Ombrófila Densa no sul de Roraima. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 82, p. 111-117, 2015.

WICKHAM, Hadley. **ggplot2**: elegant graphics for data analysis. springer, 2016.

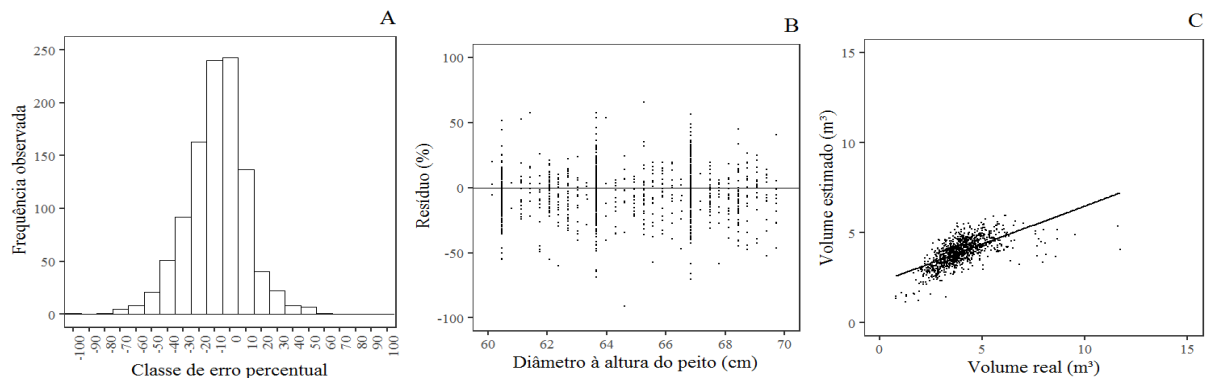
ANEXOS

Anexo A - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 10 cm e classe de 55 cm da espécie *M. elata*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



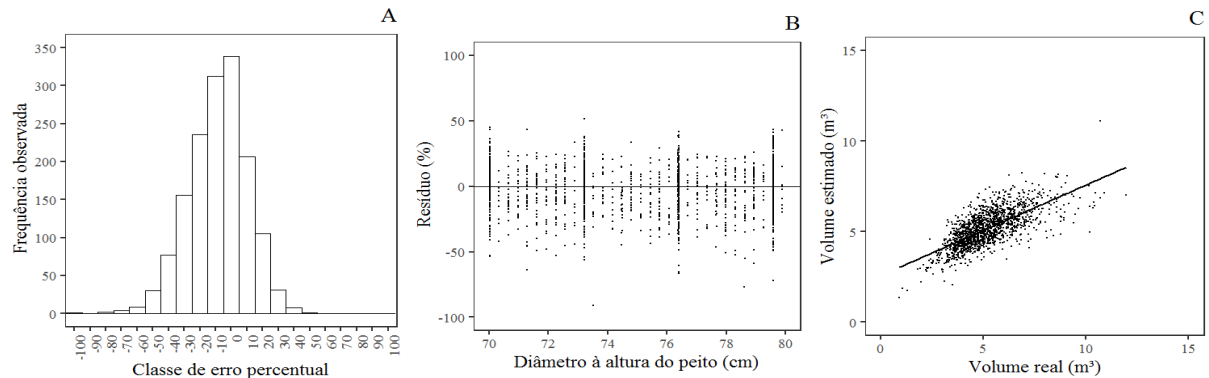
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo B - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 10 cm e classe de 65 cm da espécie *M. elata*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



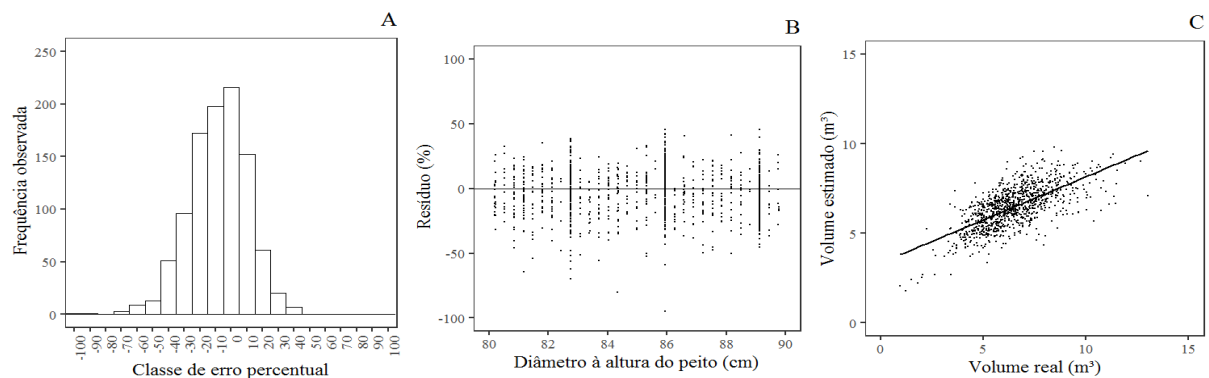
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo C - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 10 cm e classe de 75 cm da espécie *M. elata*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



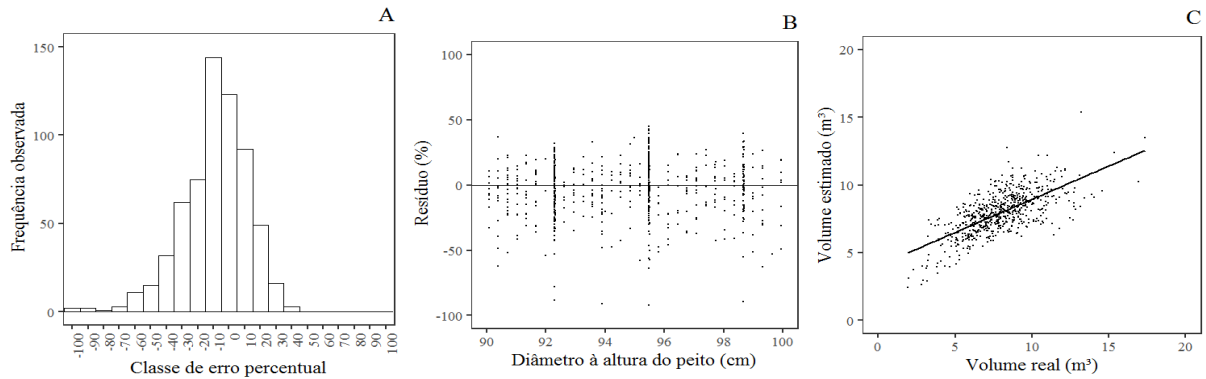
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo D - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritimizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 85 cm da espécie *M. elata*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



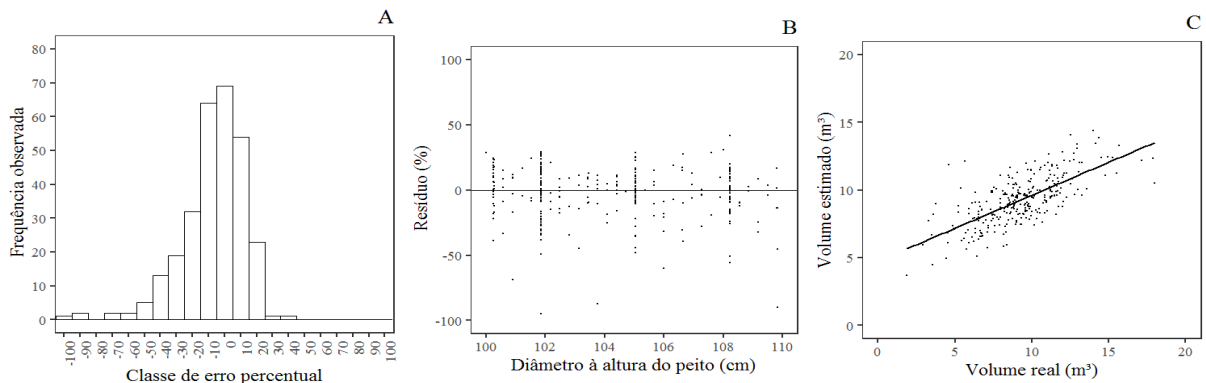
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo E - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 95 cm da espécie *M. elata*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



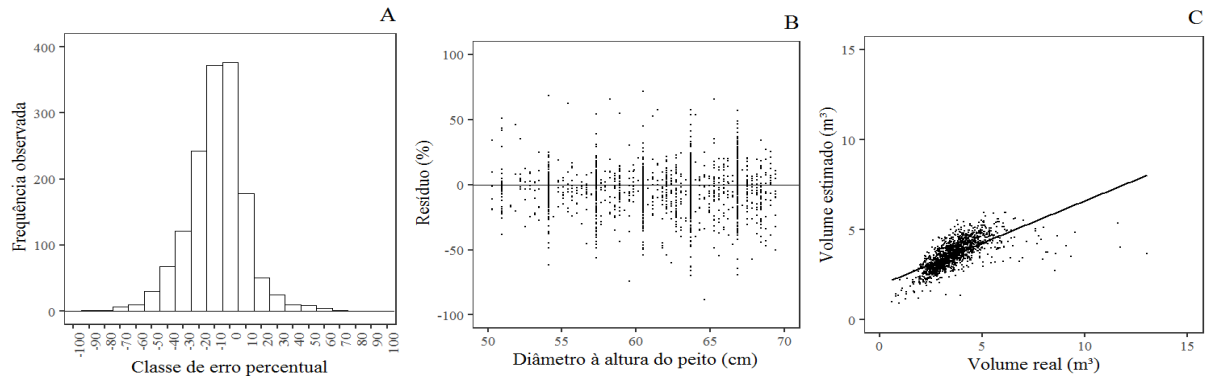
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo F - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 10 cm e classe de 105 cm da espécie *M. elata*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



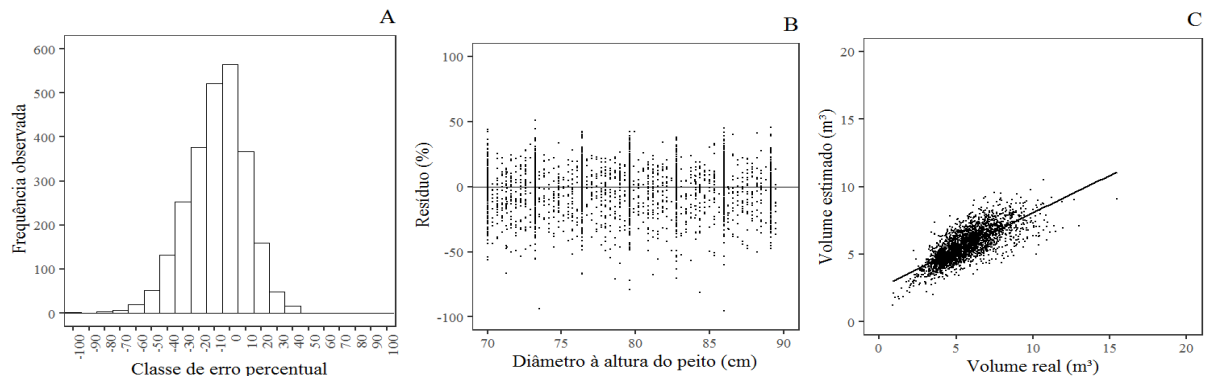
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo G - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall não linear (10), para a amplitude de 20 cm e classe de 60 cm da espécie *M. elata*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



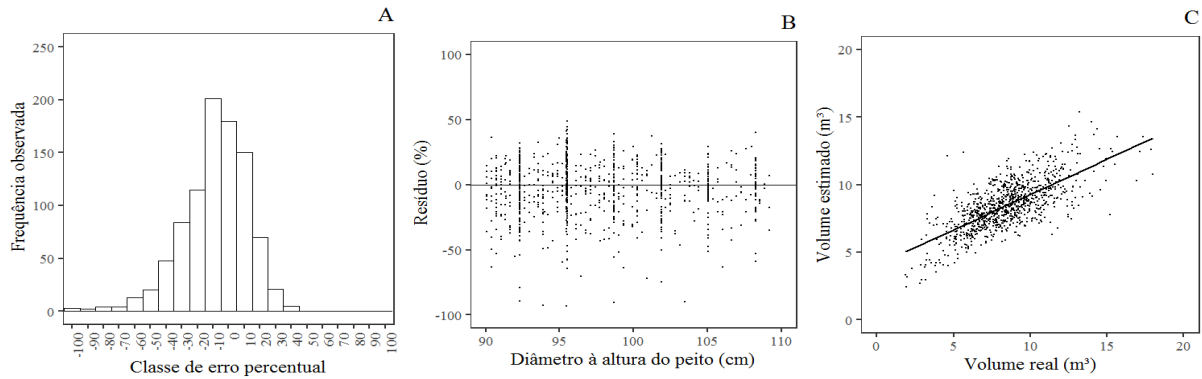
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo H - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall não linear (10), para a amplitude de 20 cm e classe de 80 cm da espécie *M. elata*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



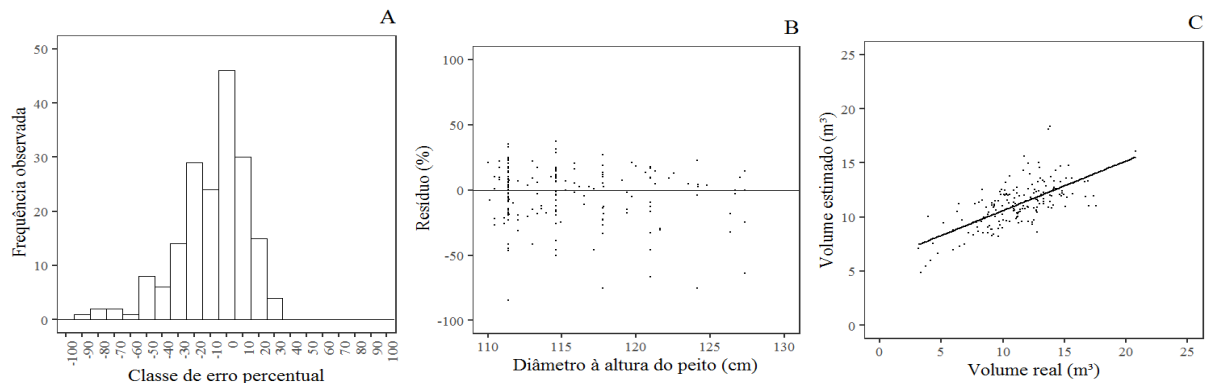
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo I - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 20 cm e classe de 100 cm da espécie *M. elata*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



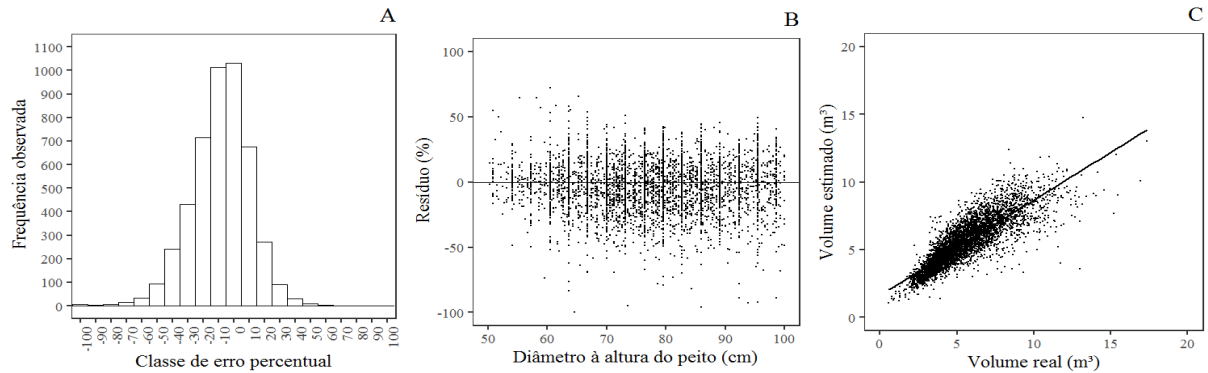
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo J - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 20 cm e classe de 120 cm da espécie *M. elata*, na Floresta Nacional do Tapajós, município de Belterra, Pará



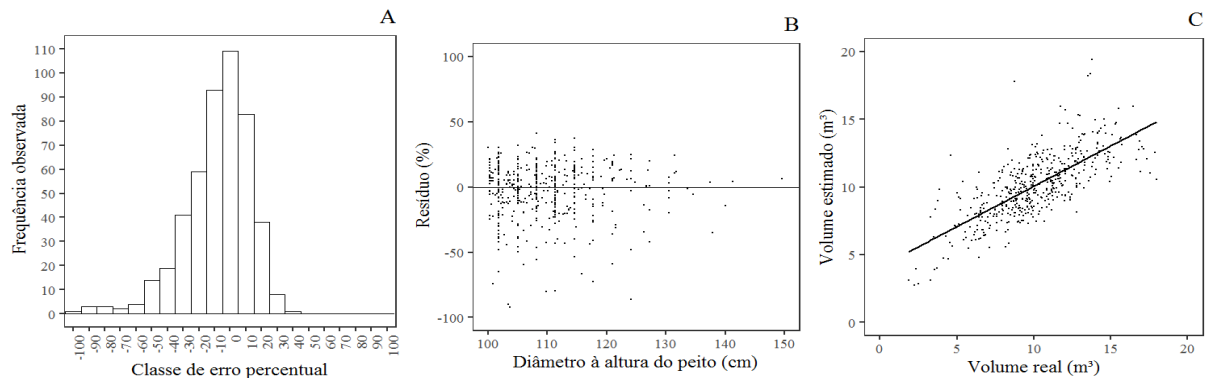
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo K - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 50 cm e classe de 75 cm da espécie *M. elata*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



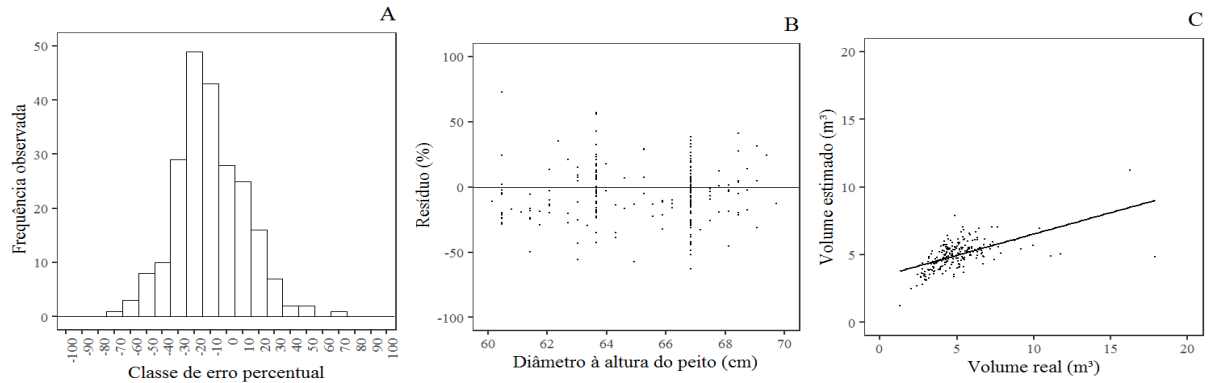
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo L - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 50 cm e classe de 100 cm da espécie *M. elata*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



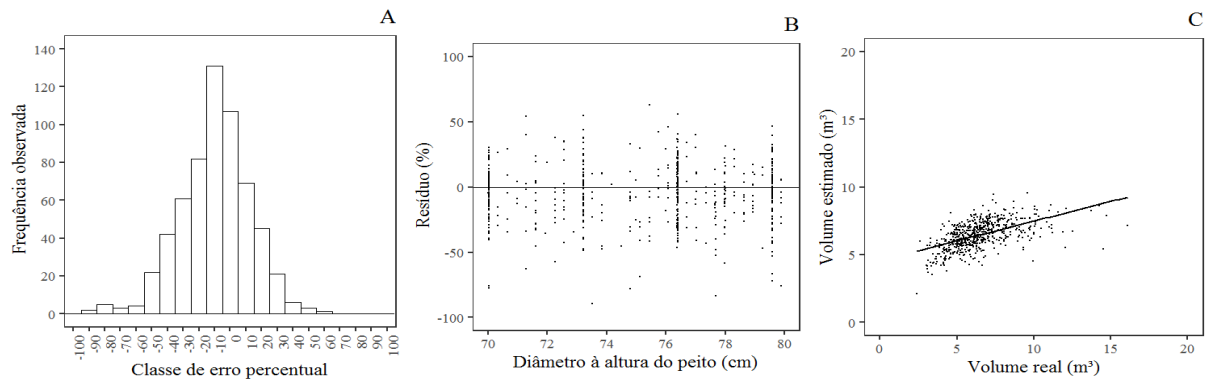
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo M - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 65 cm da espécie *C. guianensis*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



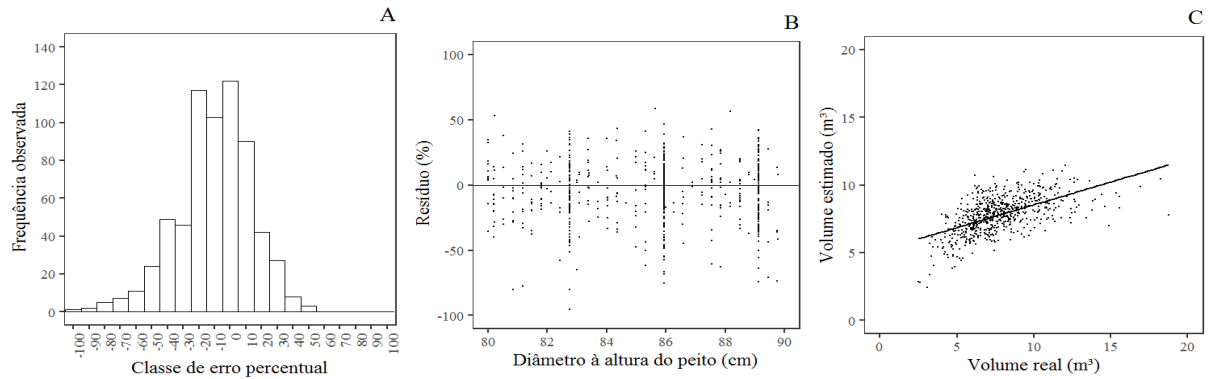
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo N - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 10 cm e classe de 75 cm da espécie *C. guianensis*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



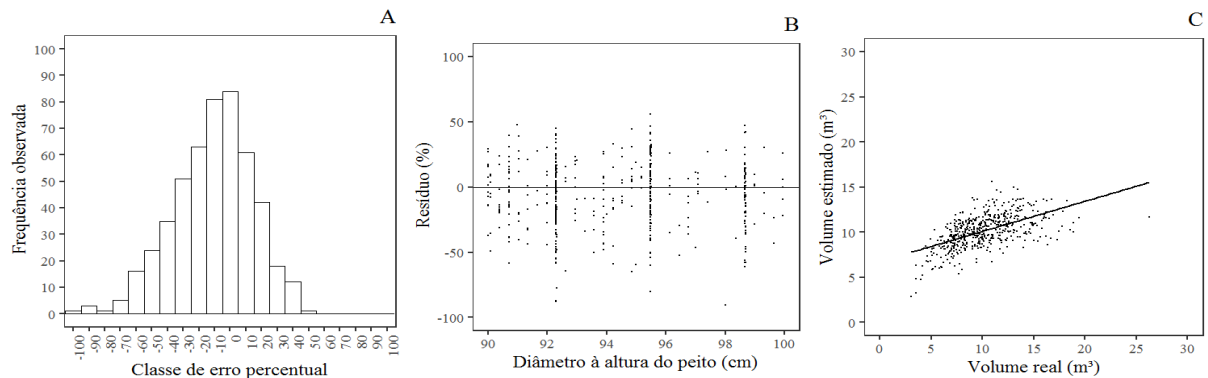
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo O - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 85 cm da espécie *C. guianensis*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



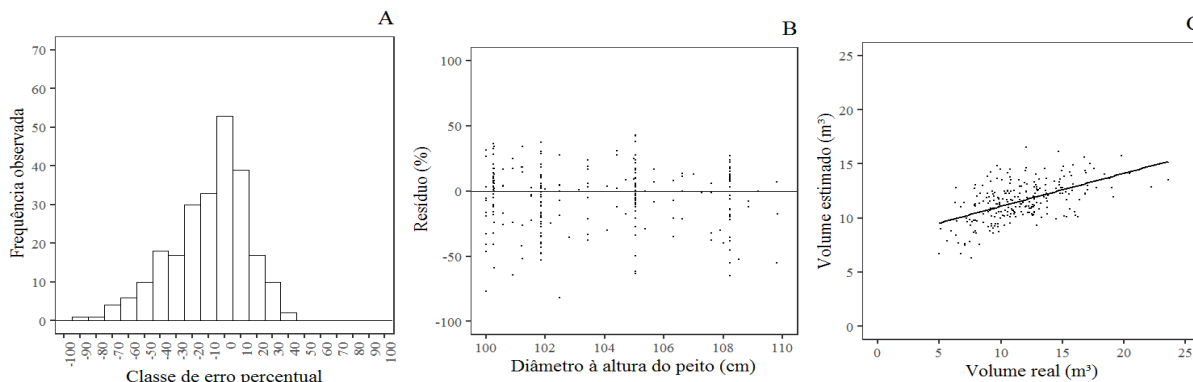
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo P - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 10 cm e classe de 95 cm da espécie *C. guianensis*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



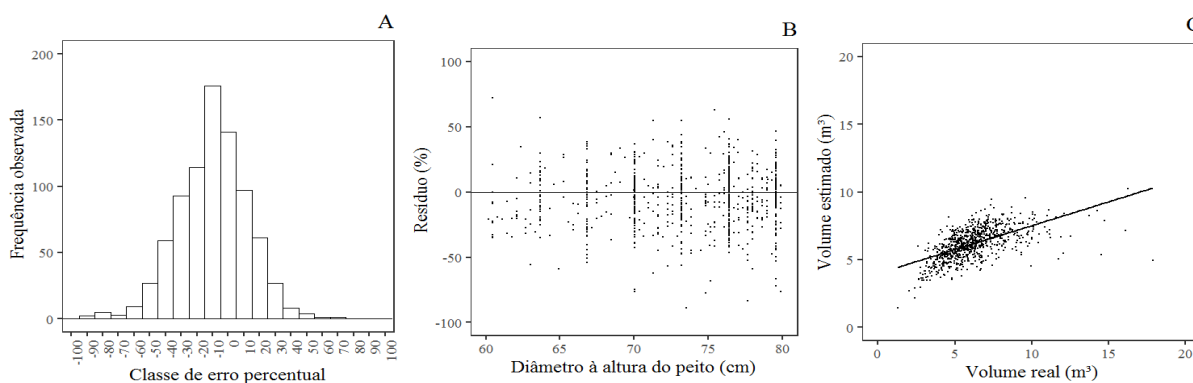
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo Q - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 105 cm da espécie *C. guianensis*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



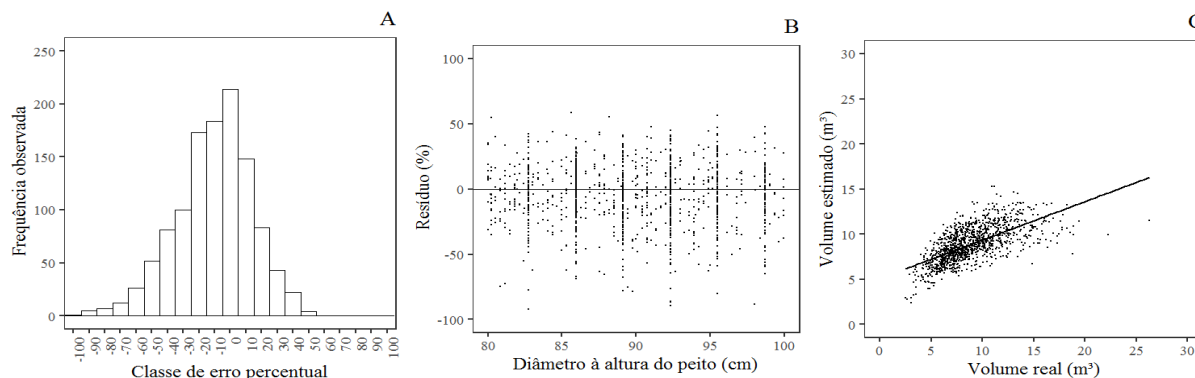
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo R - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 20 cm e classe de 70 cm da espécie *C. guianensis*, na Floresta Nacional do Tapajós, município de Belterra, Para.



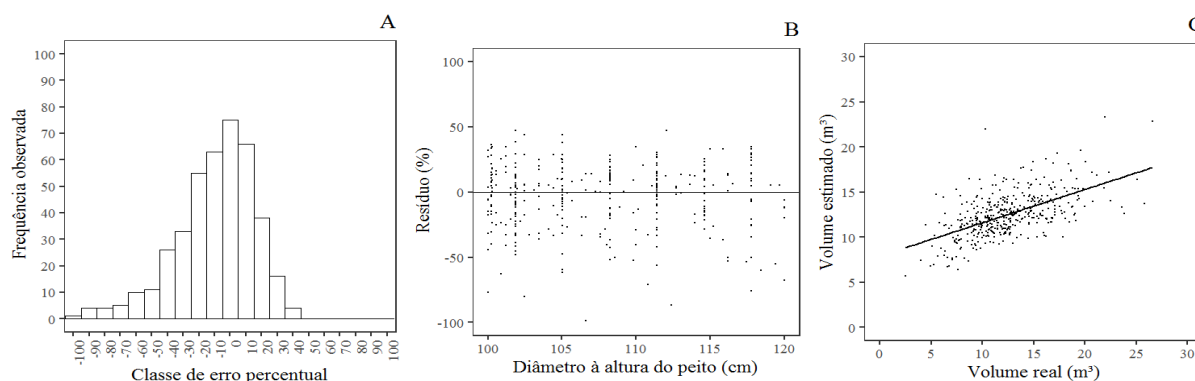
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo S - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 20 cm e classe de 90 cm da espécie *C. guianensis*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



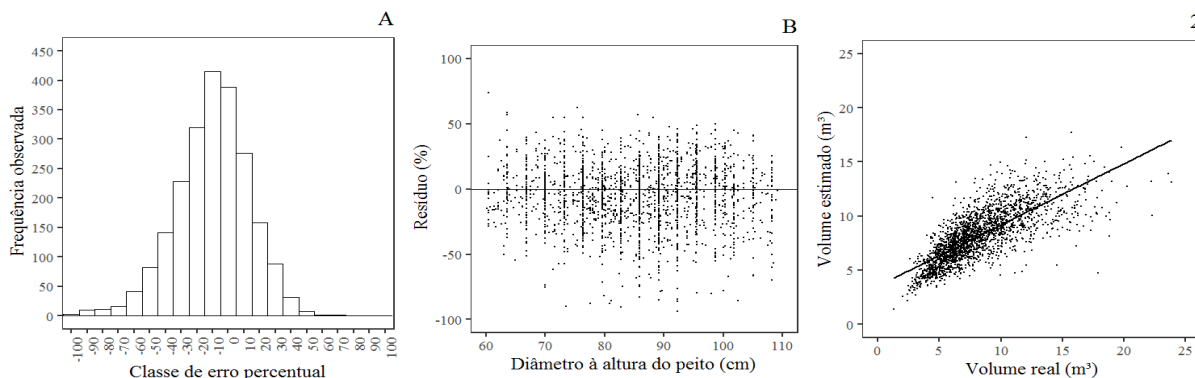
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo T - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 20 cm e classe de 110 cm da espécie *C. guianensis*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



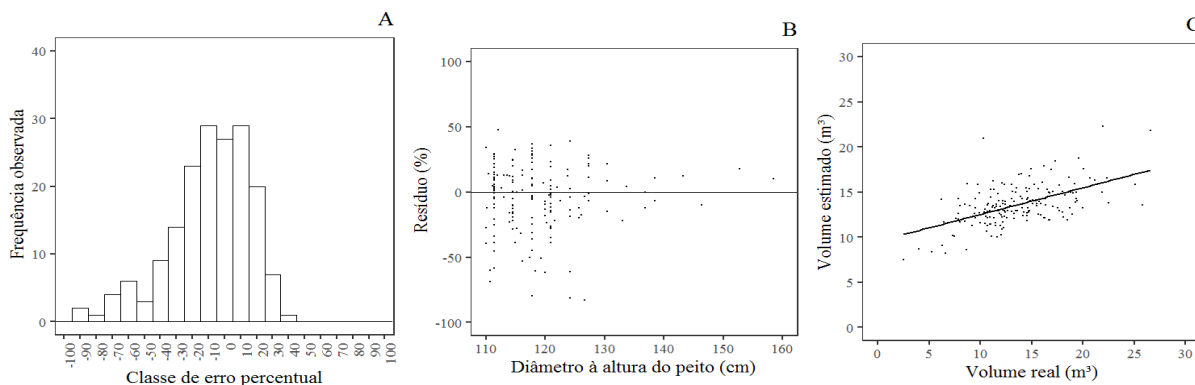
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo U - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 50 cm e classe de 85 cm da espécie *C. guianensis*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



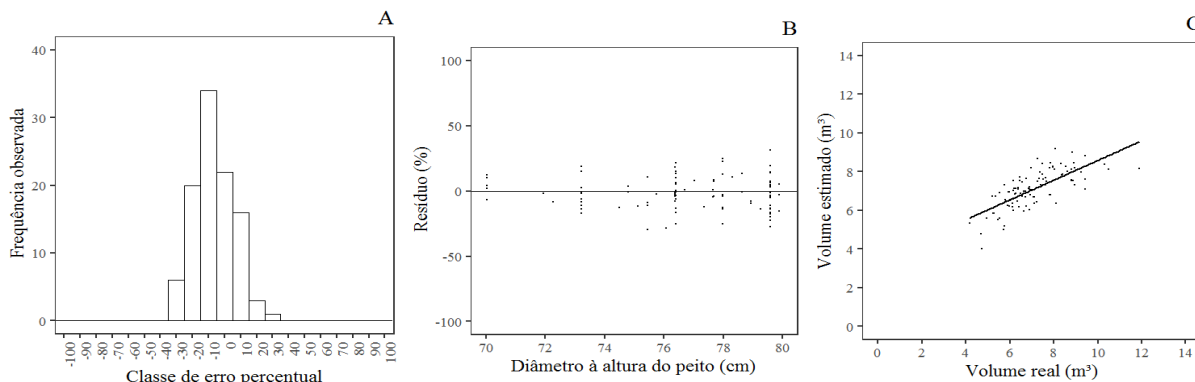
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo V - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 50 cm e classe de 135 cm da espécie *C. guianensis*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



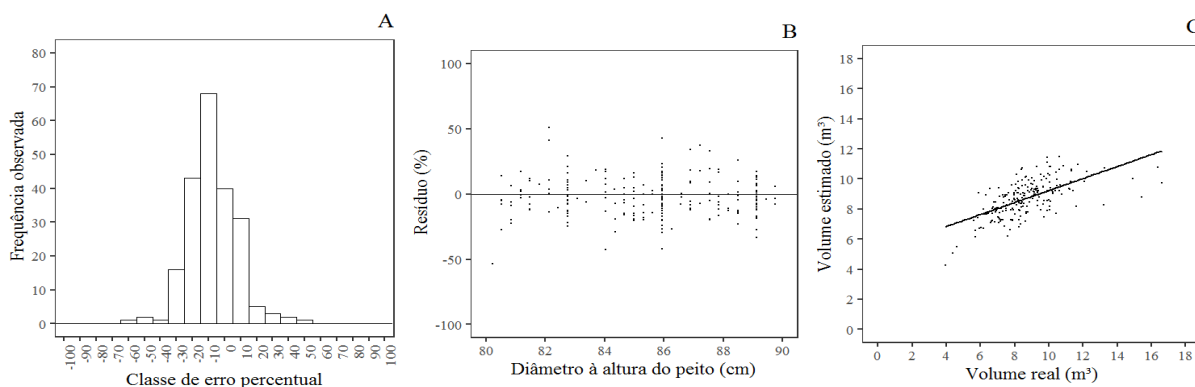
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo W - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 75 cm da espécie *H. courbaril*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



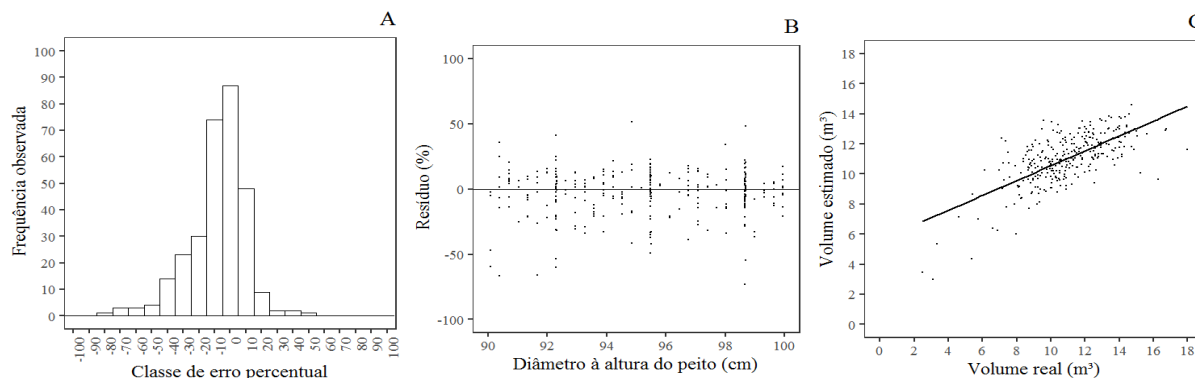
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo X - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 85 cm da espécie *H. courbaril*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



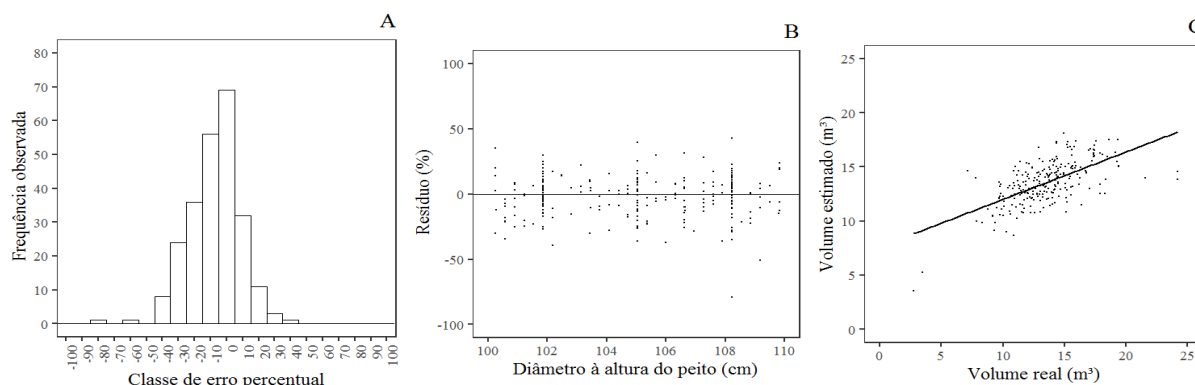
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo Y - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 95 cm da espécie *H. courbaril*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



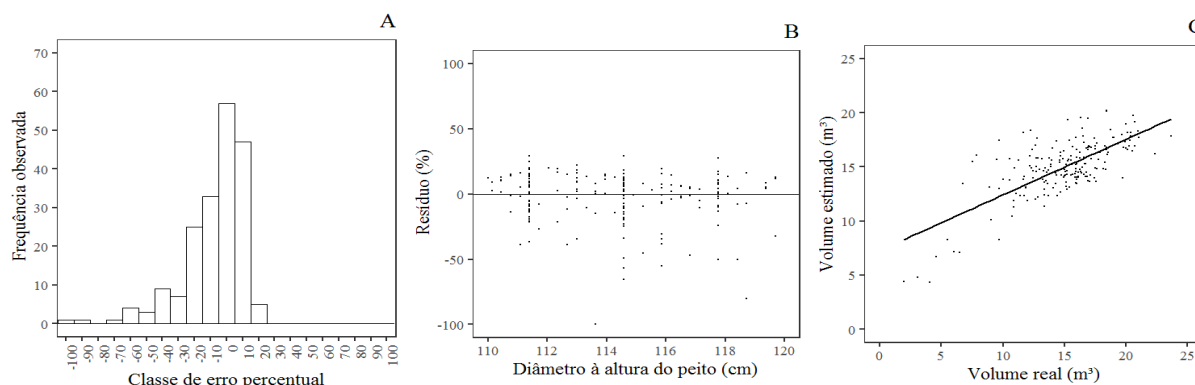
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo Z - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 10 cm e classe de 105 cm da espécie *H. courbaril*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



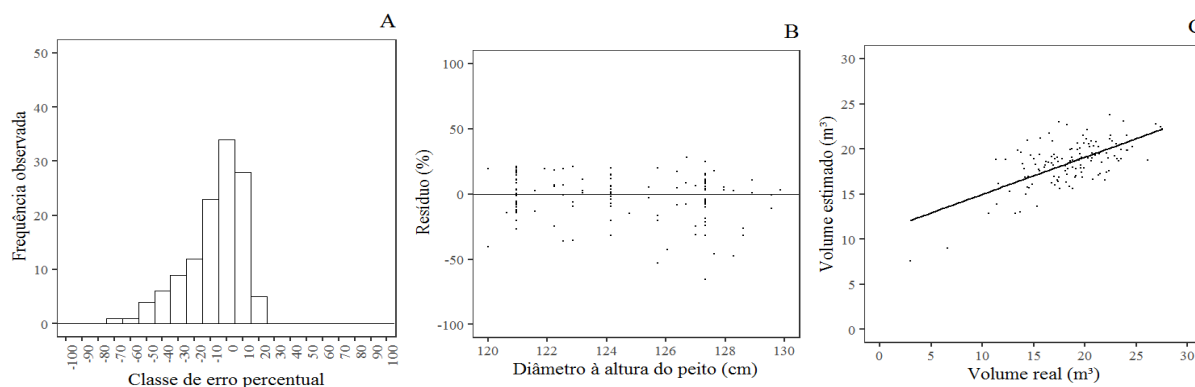
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo AA - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 10 cm e classe de 115 cm da espécie *H. courbaril*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



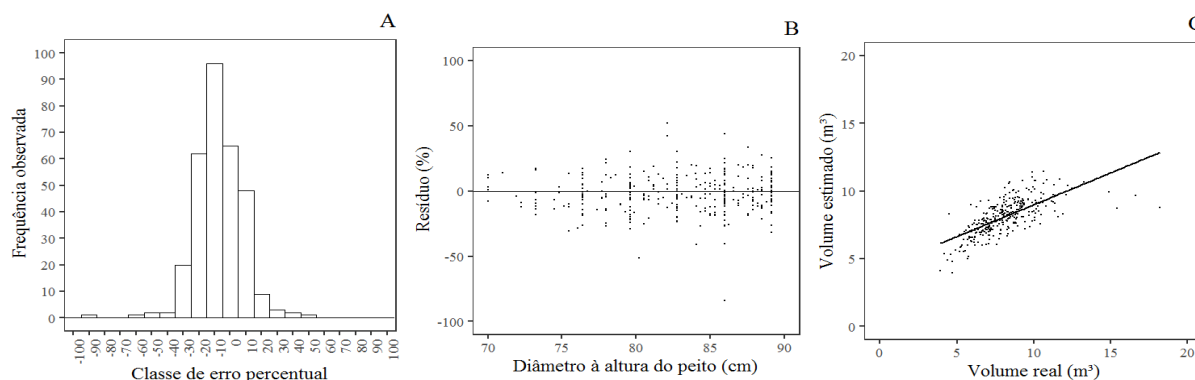
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo BB - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 10 cm e classe de 125 cm da espécie *H. courbaril*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



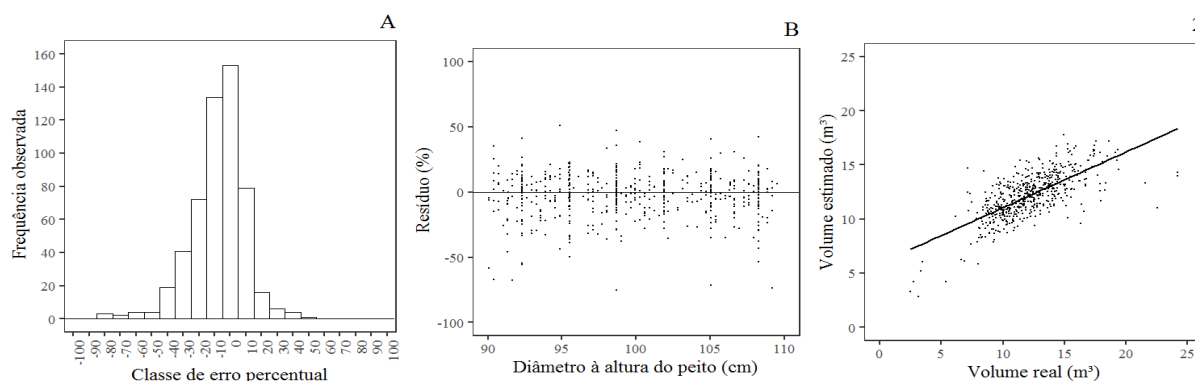
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo CC - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 20 cm e classe de 80 cm da espécie *H. courbaril*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



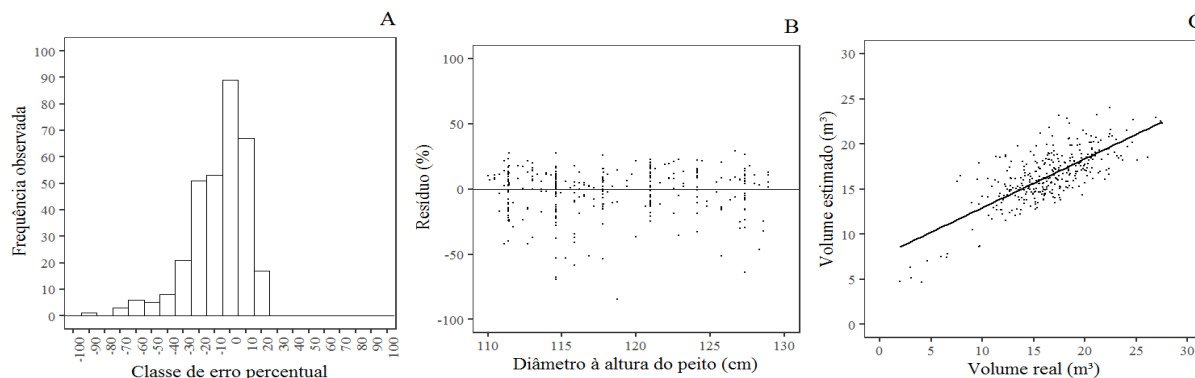
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo DD - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 20 cm e classe de 100 cm da espécie *H. courbaril*, na Floresta Nacional do Tapajós, município de Belterra, Pará.



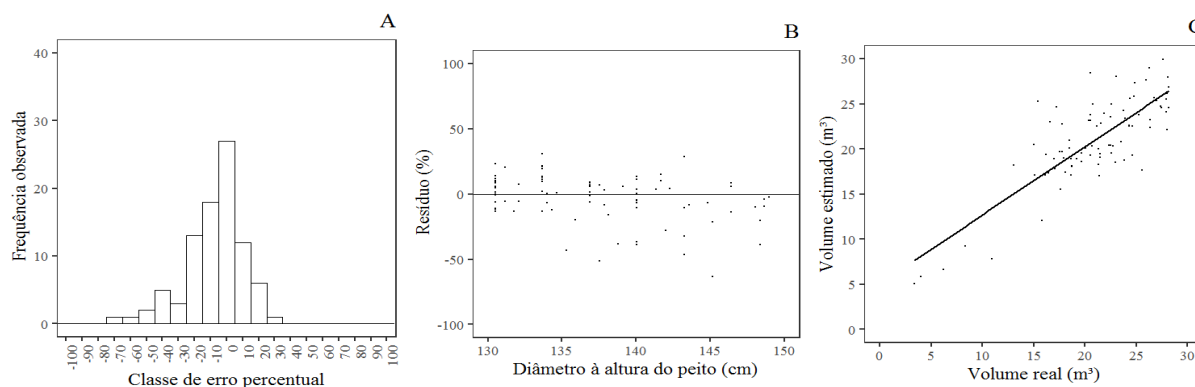
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo EE - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 20 cm e classe de 120 cm da espécie *H. courbaril*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



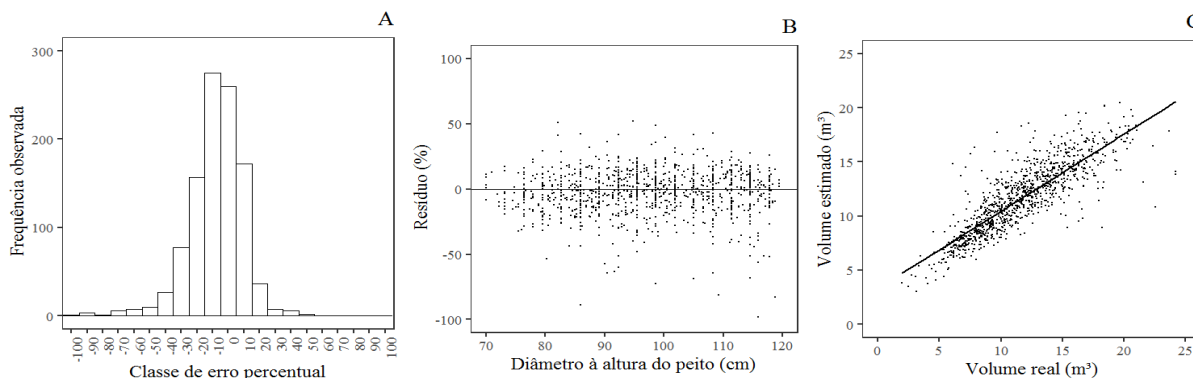
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo FF - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 20 cm e classe de 140 cm da espécie *H. courbaril*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



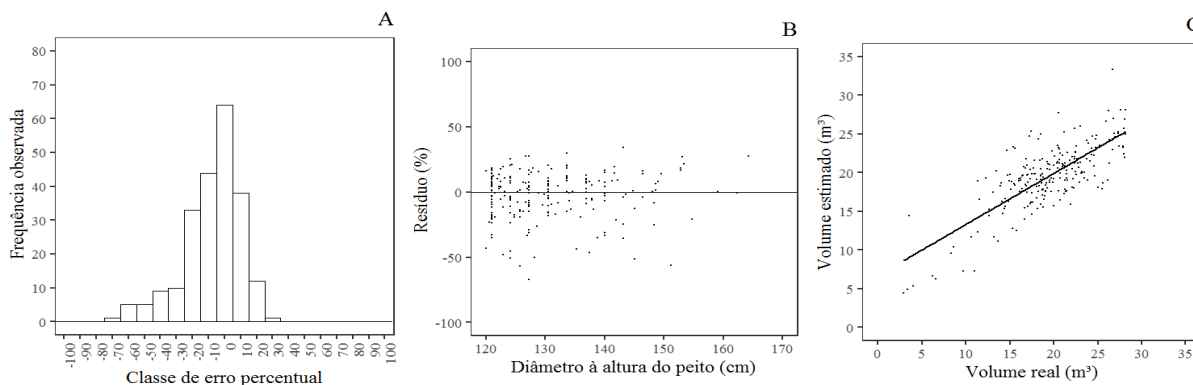
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo GG - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall não linear (10), para a amplitude de 50 cm e classe de 95 cm da espécie *H. courbaril*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



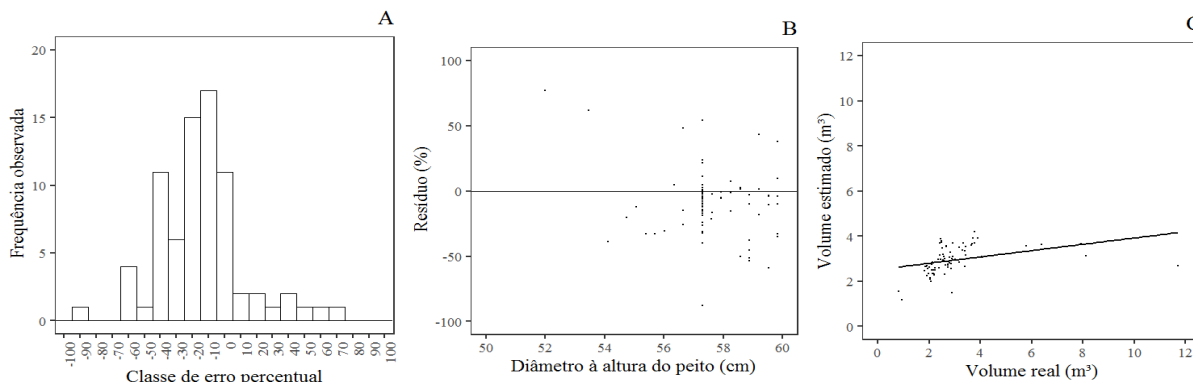
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo HH - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 50 cm e classe de 145 cm da espécie *H. courbaril*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



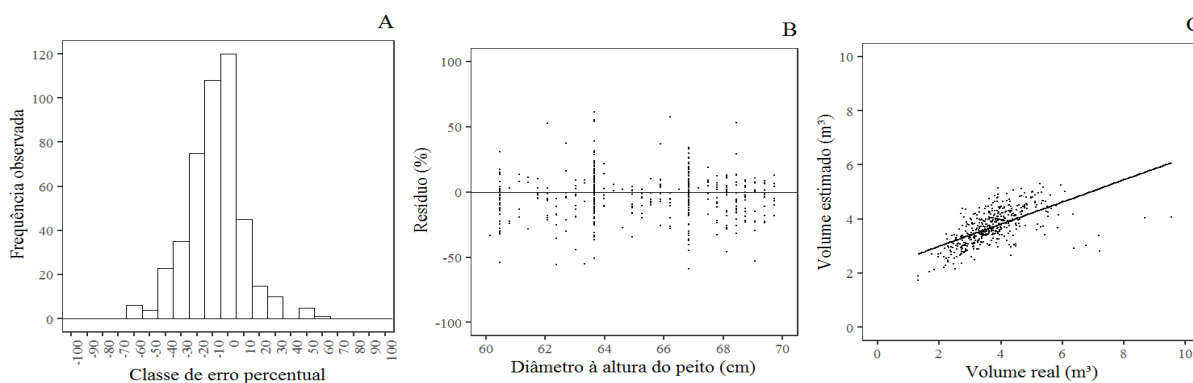
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo II - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 55 cm da espécie *L. lurida*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



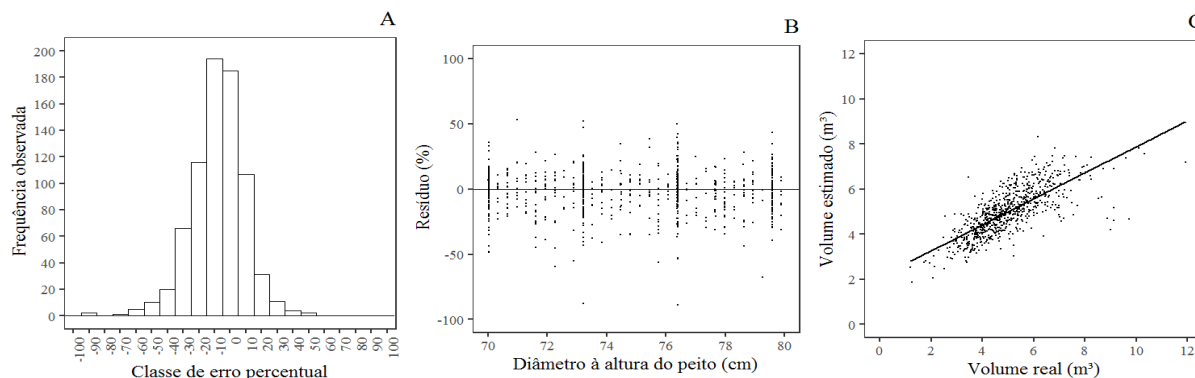
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo JJ - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 10 cm e classe de 65 cm da espécie *L. lurida*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



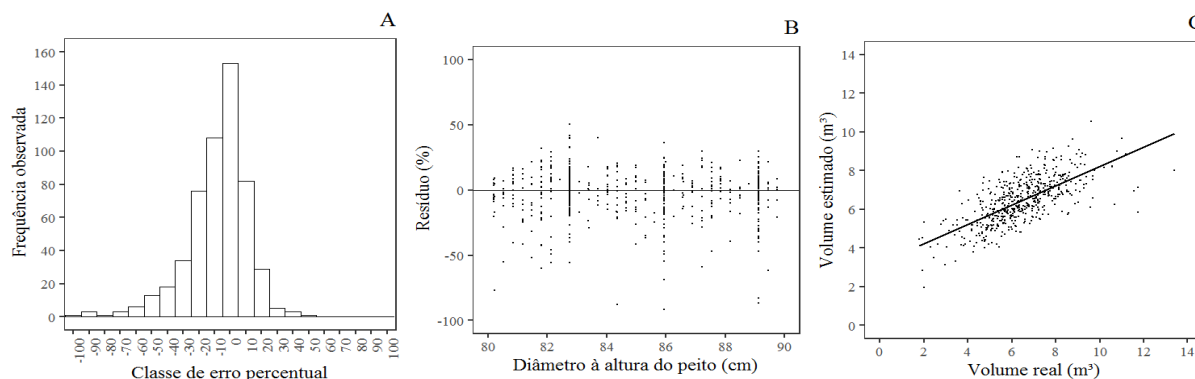
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo KK - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 10 cm e classe de 75 cm da espécie *L. lurida*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



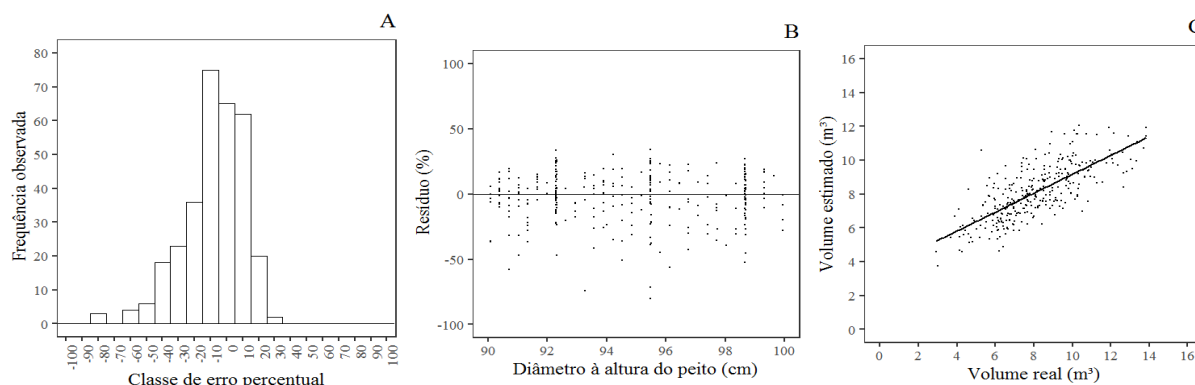
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo LL - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 85 cm da espécie *L. lurida*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



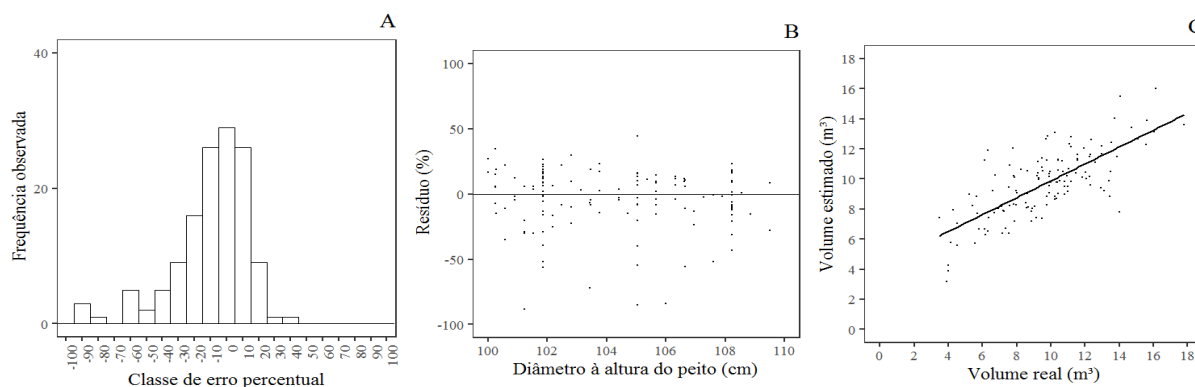
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo MM - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 10 cm e classe de 95 cm da espécie *L. lurida*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



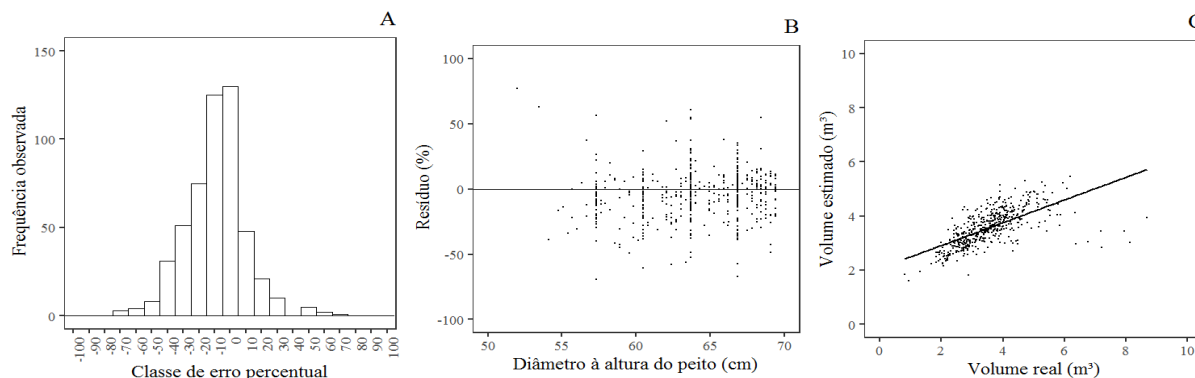
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo NN - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 105 cm da espécie *L. lurida*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



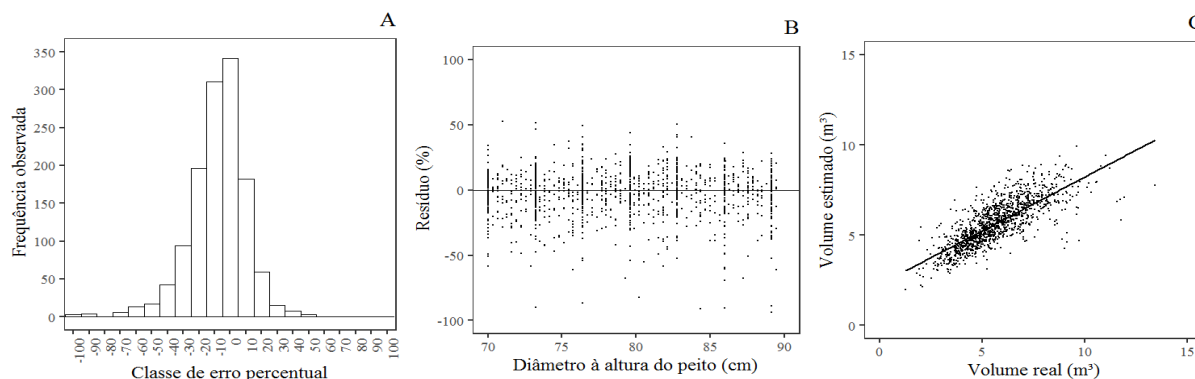
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo OO - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 20 cm e classe de 60 cm da espécie *L. lurida*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



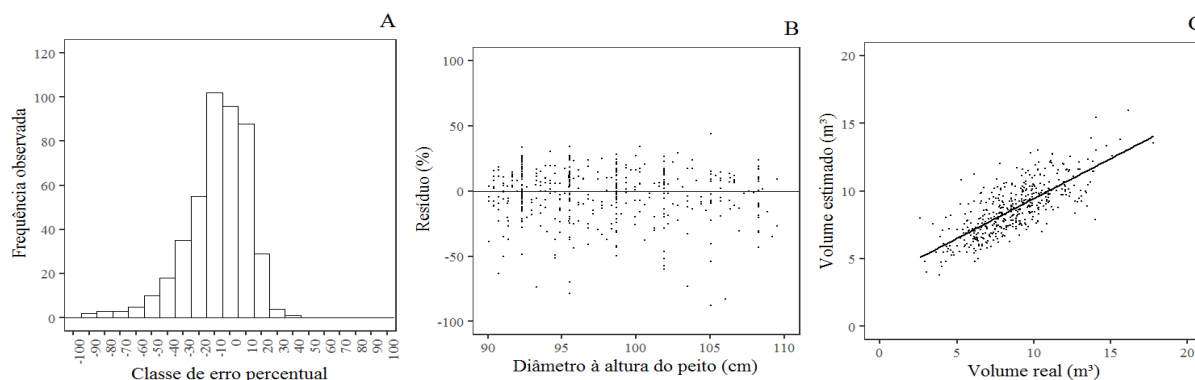
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo PP - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall não linear (10), para a amplitude de 20 cm e classe de 80 cm da espécie *L. lurida*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



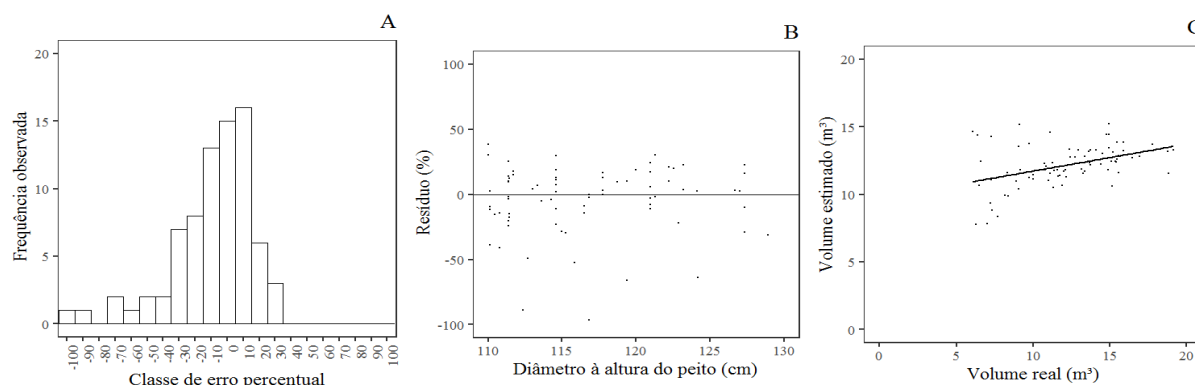
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo QQ - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 20 cm e classe de 100 cm da espécie *L. lurida*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



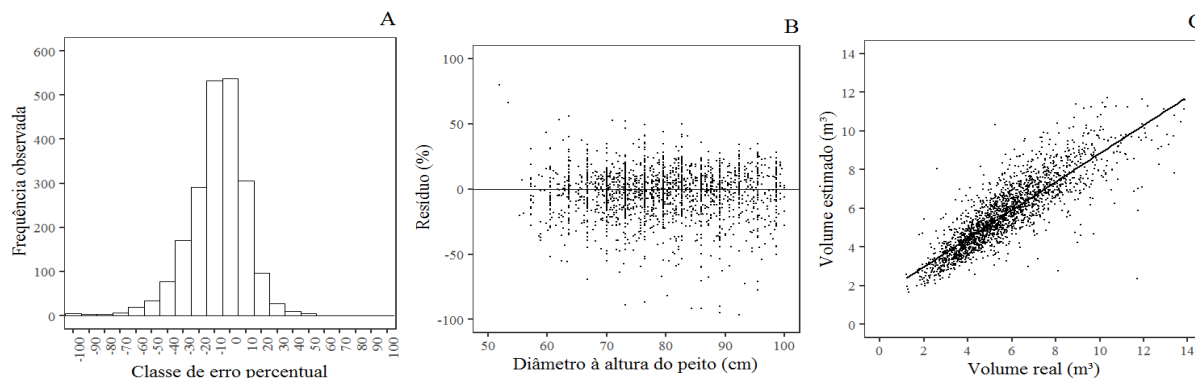
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo RR - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 20 cm e classe de 120 cm da espécie *L. lurida*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



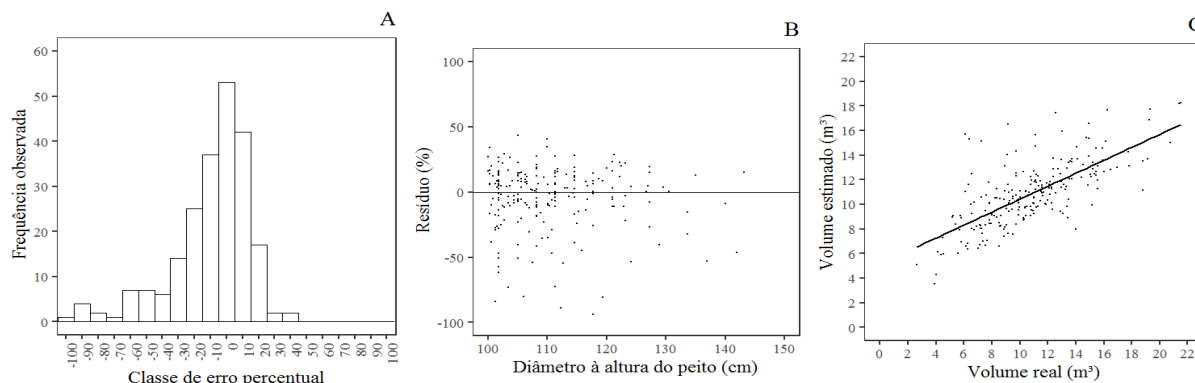
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo SS - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall não linear (10), para a amplitude de 50 cm e classe de 75 cm da espécie *L. lurida*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



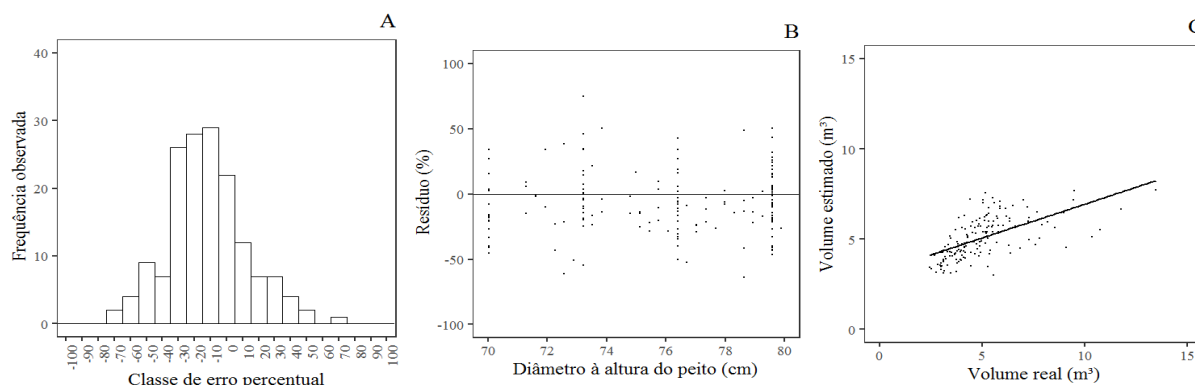
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo TT - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 50 cm e classe de 125 cm da espécie *L. lurida*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



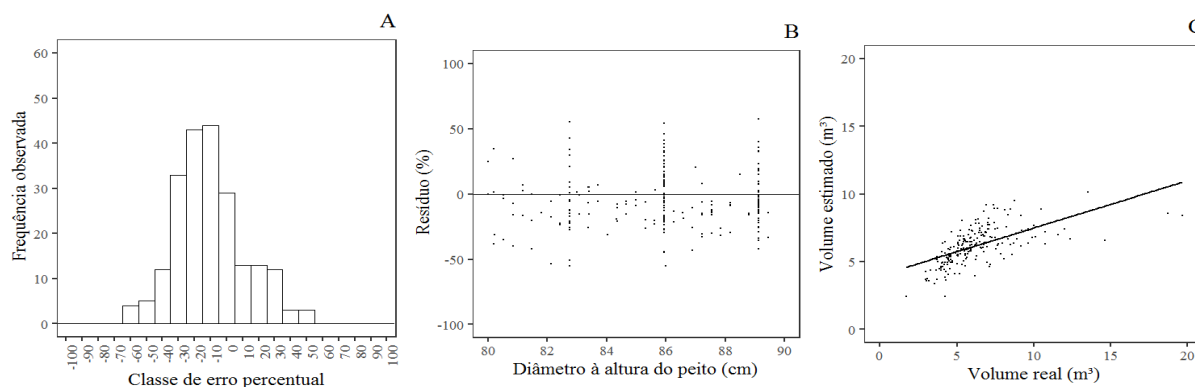
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo UU - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 75 cm da espécie *V. maxima*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



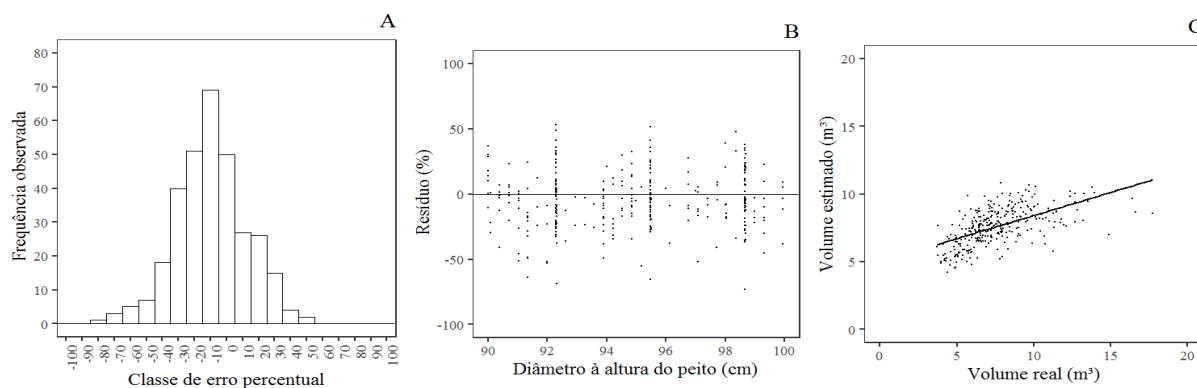
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo VV - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 85 cm da espécie *V. maxima*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



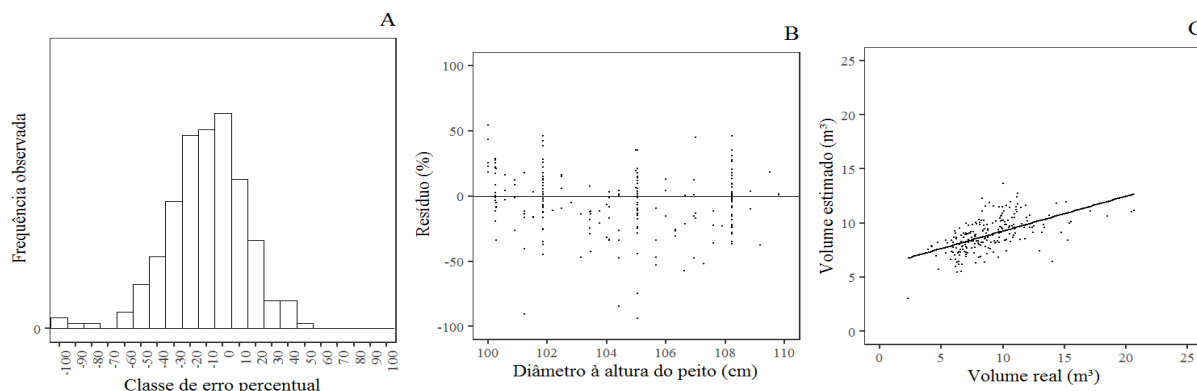
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo WW - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 95 cm da espécie *V. maxima*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



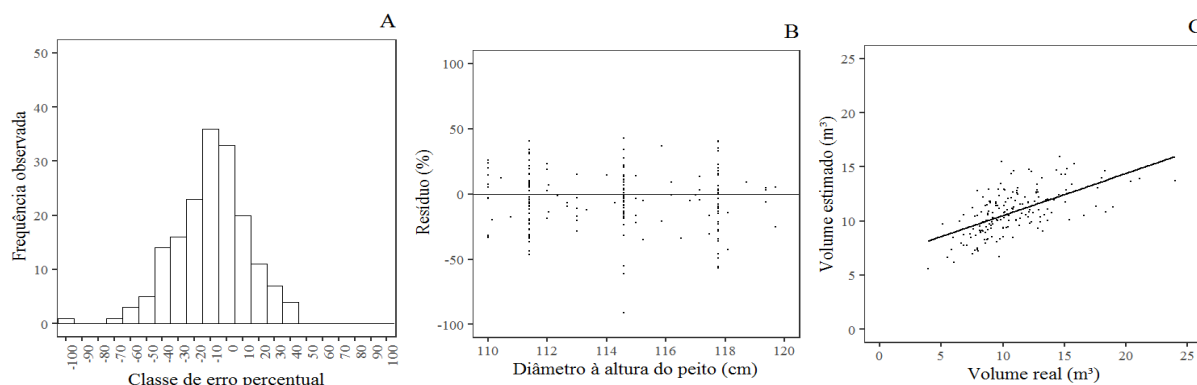
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo XX - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 105 cm da espécie *V. maxima*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



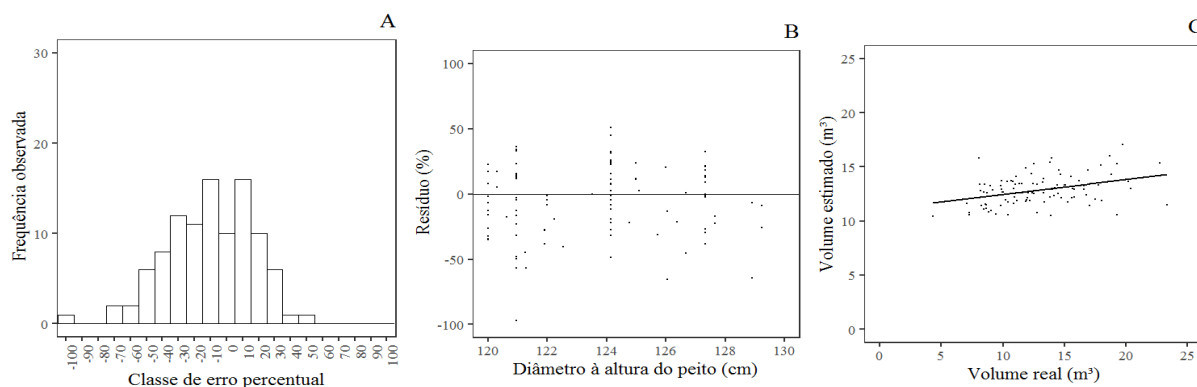
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo YY - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 10 cm e classe de 115 cm da espécie *V. maxima*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



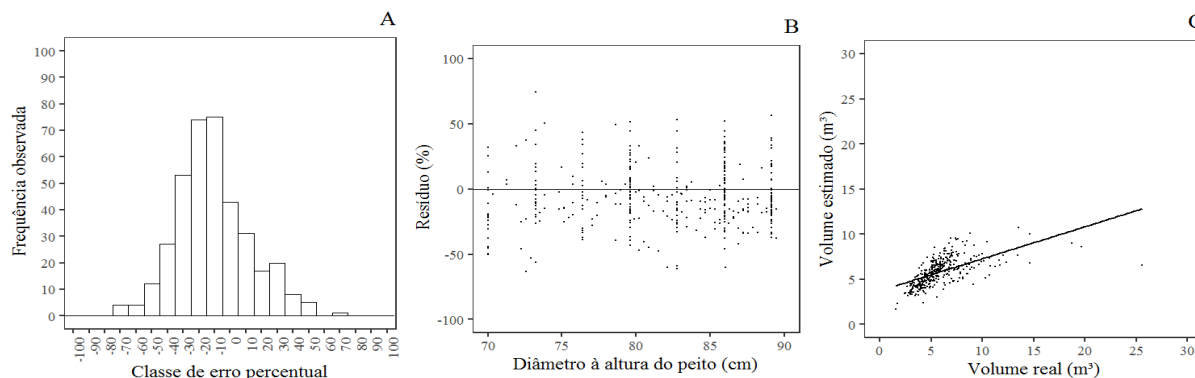
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo ZZ - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr variável combinada (8), para a amplitude de 10 cm e classe de 125 cm da espécie *V. maxima*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



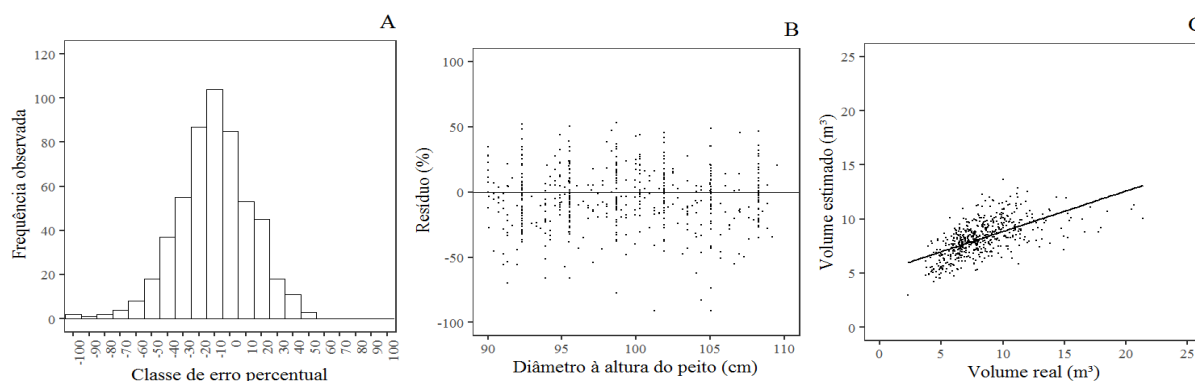
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo AAA - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 20 cm e classe de 80 cm da espécie *V. maxima*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



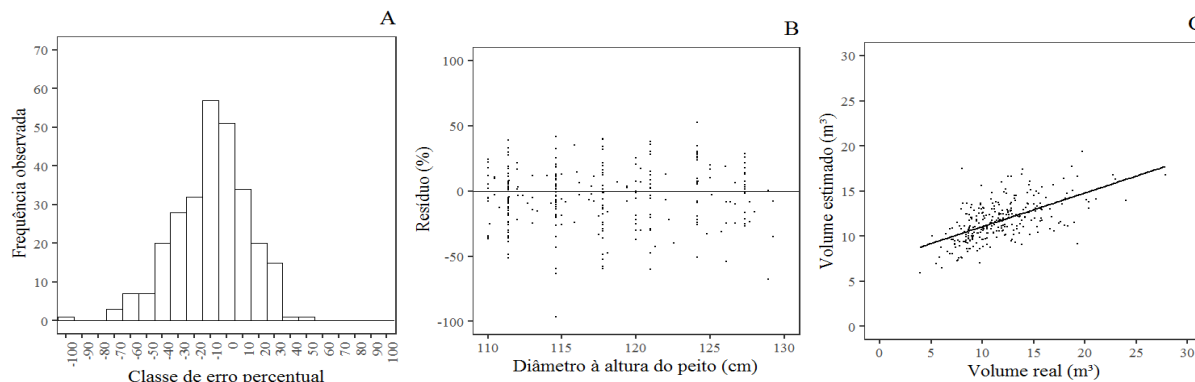
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo BBB - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritmizado (1), para a amplitude de 20 cm e classe de 100 cm da espécie *V. maxima*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



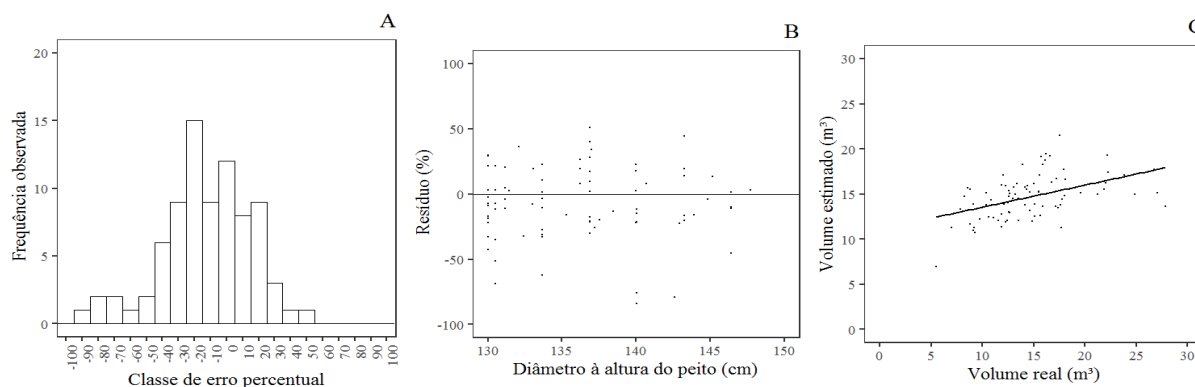
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo CCC - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 20 cm e classe de 120 cm da espécie *V. maxima*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



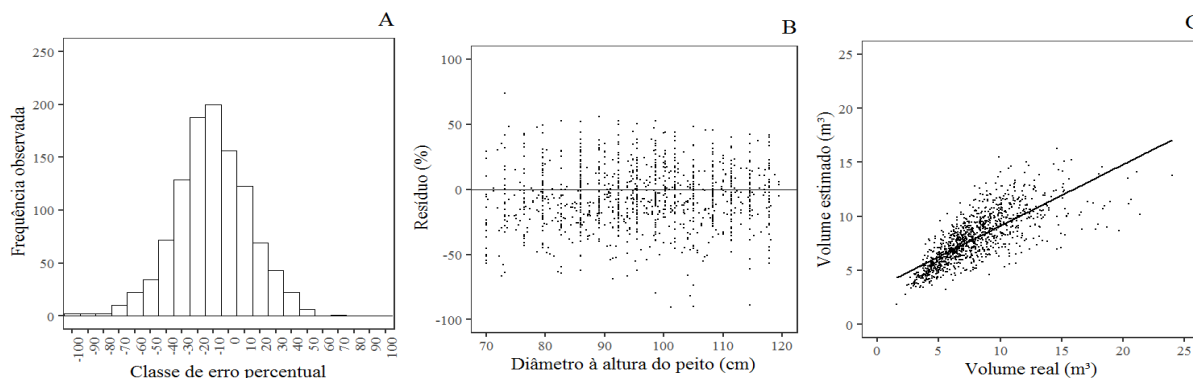
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo DDD - Gráficos da equação proveniente do modelo de Spurr logaritmizado (2), para a amplitude de 20 cm e classe de 140 cm da espécie *V. maxima*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



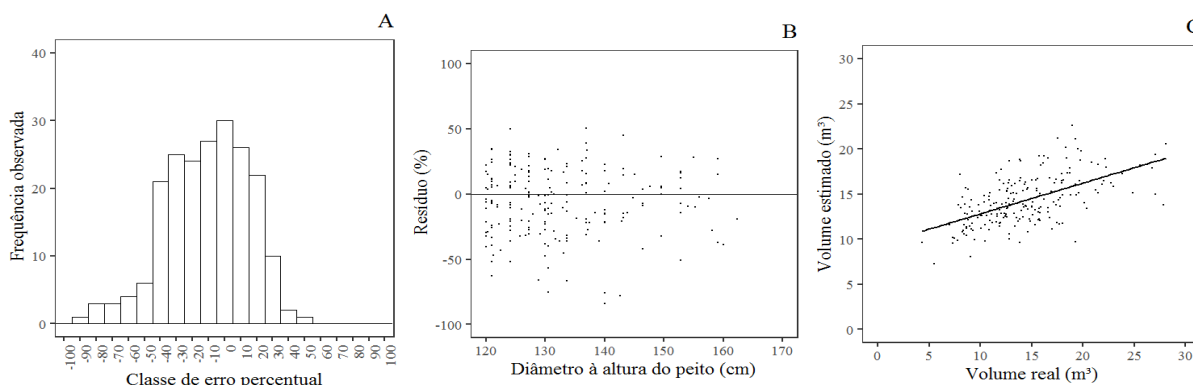
Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo EEE - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall não linear (10), para a amplitude de 50 cm e classe de 95 cm da espécie *V. maxima*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo FFF - Gráficos da equação proveniente do modelo de Schumacher e Hall logaritimizado (1), para a amplitude de 50 cm e classe de 145 cm da espécie *V. maxima*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



Em que: A: histograma de resíduos; B: distribuição gráfica dos resíduos; C: volume observado em função do volume estimado.

Anexo GGG - Validação das melhores equações por cenário, através do Teste *Qui-quadrado* a 95% de probabilidade em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

(Continua)

Espécie	Cenário	Equação	p-valor	Situação
	Ajuste geral	10	0,24	Equação validada ($p \geq 0,05$)
	Ajuste específico	10	0,24	
	Amplitude diamétrica	Centro de classe	-	-
<i>L. lurida</i>	10	55	2	0.23
		65	1	0.24
		75	1	0.24
		85	2	0.24
		95	2	1.00
		105	2	0.23
	20	60	8	0.24
		80	10	1.00
		100	8	0.24
		120	2	0.23
	50	75	10	1.00
		125	2	0.24
	Ajuste específico	10	0,24	
	Amplitude diamétrica	Centro de classe	-	-
<i>H. courbaril</i>	10	75	2	0.23
		85	2	0.24
		95	2	0.24
		105	1	0.24
		115	8	0.24
		125	8	0.23
	20	80	2	0.24
		100	2	0.24
		120	8	0.24
		140	2	0.23
	50	95	10	0.24
		145	1	0.24
	Ajuste específico	10	0,24	
	Amplitude diamétrica	Centro de classe	-	-
<i>M. elata</i>	10	55	8	0.24
		65	1	0.24
		75	8	0.24
		85	2	0.24
		95	2	0.24
		105	8	0.24

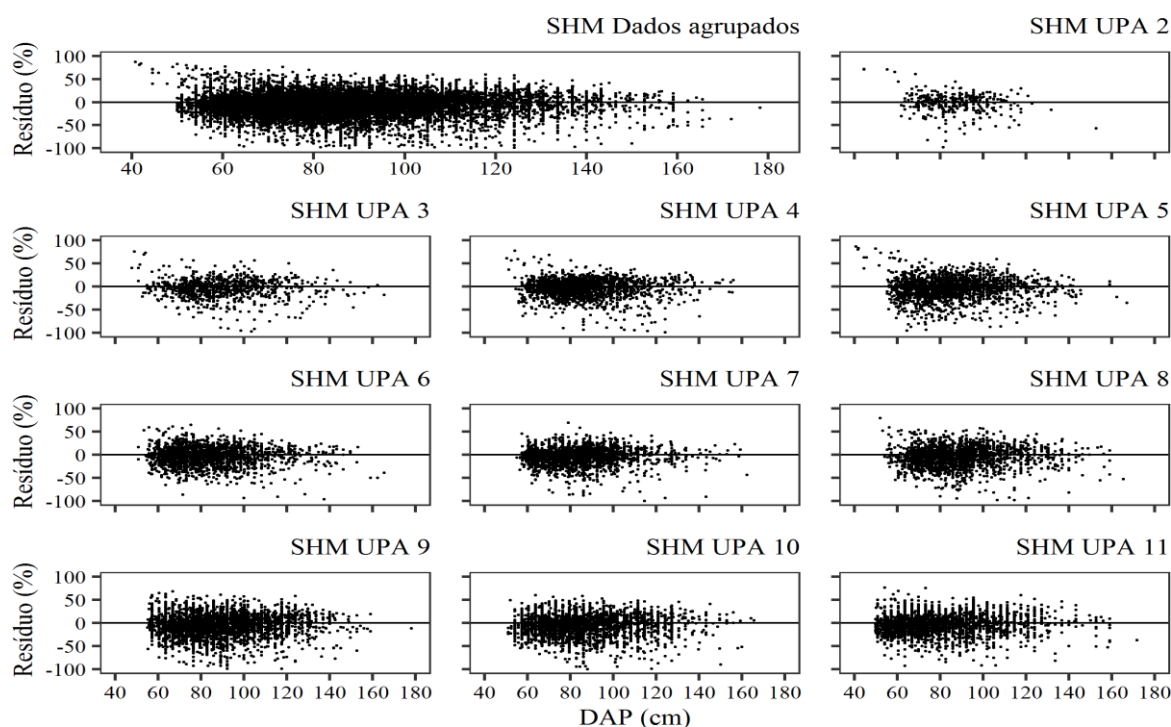
Em que: 1: Modelo de Schumacher e Hall logaritimizado; 2: Spurr logaritimizado; 8: Spurr variável combinada; 10: Modelo de Schumacher e Hall não linear.

Anexo GGG - Validação das melhores equações por cenário, através do Teste Qui-quadrado a 95% de probabilidade em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

(Conclusão)					
Espécie	Cenário		Equação	p-valor	Situação
M. elata	20	60	10	0.24	Equações Validadas (p ≥ 0,05)
		80	10	0.24	
		100	2	0.24	
		120	8	0.24	
	50	75	2	0.24	
		125	1	0.24	
V. maxima	Ajuste específico		10	0,24	Equações Validadas (p ≥ 0,05)
	Amplitude diamétrica	Centro de classe	-	-	
	10	75	2	0.24	
		85	2	0.24	
		95	2	0.24	
	10	105	2	0.24	
		115	2	0.24	
		125	8	0.23	
	20	80	1	0.24	
		100	1	0.24	
		120	2	0.24	
		140	2	0.23	
	50	95	10	0.24	
		145	1	0.24	
C. guianensis	Ajuste específico		10	0,24	Equações Validadas (p ≥ 0,05)
	Amplitude diamétrica	Centro de classe	-	-	
	10	65	2	0.24	
		75	1	0.24	
		85	2	0.24	
	10	95	1	0.24	
		105	2	0.24	
	20	70	1	0.24	
		90	1	0.24	
		110	2	0.24	
	50	85	2	0.24	
		135	8	0.24	

Em que: 1: Modelo de Schumacher e Hall logaritmizado; 2: Spurr logaritmizado; 8: Spurr variável combinada; 10: Modelo de Schumacher e Hall não linear.

Anexo HHH - Dispersão dos resíduos do modelo SHM para as espécies agrupadas com, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



Anexo III - Estimativa dos Parâmetros fixos e aleatórios para a espécie *C. guianensis*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

UPA	G/UPA	Parâmetros			
		β_0	β_1	β_2	φ_2
2	20,42029				-0,01579*
3	58,13780				-0,02529*
4	83,23775				-0,04214*
5	204,97774				0,01117*
6	199,72156				0,02039*
7	138,64826	0,00052*	1,57701*	0,82905*	0,02265*
8	194,42286				0,00041*
9	288,40467				-0,01205*
10	343,68142				-0,00398*
11	109,38908				0,04463*

Em que: UPA: unidade de produção anual, G/UPA: área basal por UPA, em m²/UPA; β_i : coeficientes fixos do modelo; φ_2 : parâmetro aleatório da equação; *: parâmetro significativo de acordo com o teste t à 95% de probabilidade.

Anexo JJJ - Estimativa dos Parâmetros fixos e aleatórios para a espécie *H. courbaril*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

UPA	G/UPA	Parâmetros			
		β_0	β_1	β_2	φ_2
2	7,61595				-0,02465*
3	30,45186				-0,04057*
4	74,06339				0,00241*
5	23,70007				-0,00552*
6	46,72203				0,00155*
7	140,56908	0,00019*	1,76413*	0,88429*	0,01979*
8	176,95451				-0,00408*
9	457,36300				-0,00637*
10	199,60544				0,02215*
11	67,86239				0,03531*

Em que: UPA: unidade de produção anual, G/UPA: área basal por UPA, em m²/UPA; β_i : coeficientes fixos do modelo; φ_2 : parâmetro aleatório da equação; *: parâmetro significativo de acordo com o teste t à 95% de probabilidade.

Anexo KKK - Estimativa dos Parâmetros fixos e aleatórios para a espécie *L. lurida*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

UPA	G/UPA	Parâmetros			
		β_0	β_1	β_2	φ_2
2	37,14441				-0,02900*
3	58,60011				-0,02878*
4	110,22609				-0,03569*
5	97,40640				-0,01889*
6	103,03861				0,02629*
7	191,76702	0,00022*	1,79848*	0,76804*	0,01955*
8	179,74839				0,00065*
9	365,67159				0,00255*
10	158,64744				0,01591*
11	75,30049				0,04741*

Em que: UPA: unidade de produção anual, G/UPA: área basal por UPA, em m²/UPA; β_i : coeficientes fixos do modelo; φ_2 : parâmetro aleatório da equação; *: parâmetro significativo de acordo com o teste t à 95% de probabilidade.

Anexo LLL - Estimativa dos Parâmetros fixos e aleatórios para a espécie *M. elata*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

UPA	G/UPA	Parâmetros			
		β_0	β_1	β_2	φ_2
2	48,94724				-0,03489*
3	117,58957				-0,02881*
4	171,62329				-0,01754*
5	187,27472				-0,01071*
6	211,08301				-0,00001*
7	196,95083	0,00025*	1,74981*	0,77425*	0,01762*
8	54,18048				0,00536*
9	350,00556				-0,01378*
10	635,34516				0,02400*
11	874,75989				0,05875*

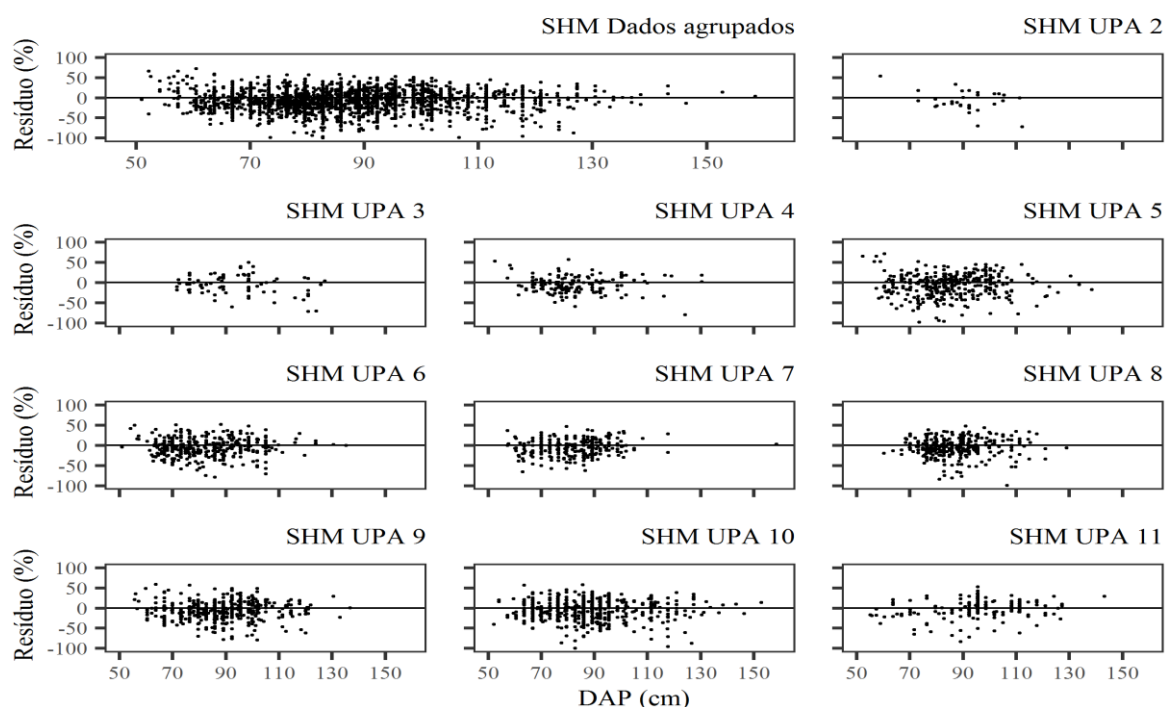
Em que: UPA: unidade de produção anual, G/UPA: área basal por UPA, em m²/UPA; β_i : coeficientes fixos do modelo; φ_2 : parâmetro aleatório da equação; *: parâmetro significativo de acordo com o teste t à 95% de probabilidade.

Anexo MMM - Estimativa dos Parâmetros fixos e aleatórios para a espécie *V. maxima*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

UPA	G/UPA	Parâmetros			
		β_0	β_1	β_2	φ_2
4	83,48781				-0,03789*
7	98,73857				-0,01493*
8	267,85967				-0,02339*
9	573,57923	0,00065*	1,55014*	0,82415*	-0,00016*
10	64,47099				0,00546*
11	133,88142				0,07091*

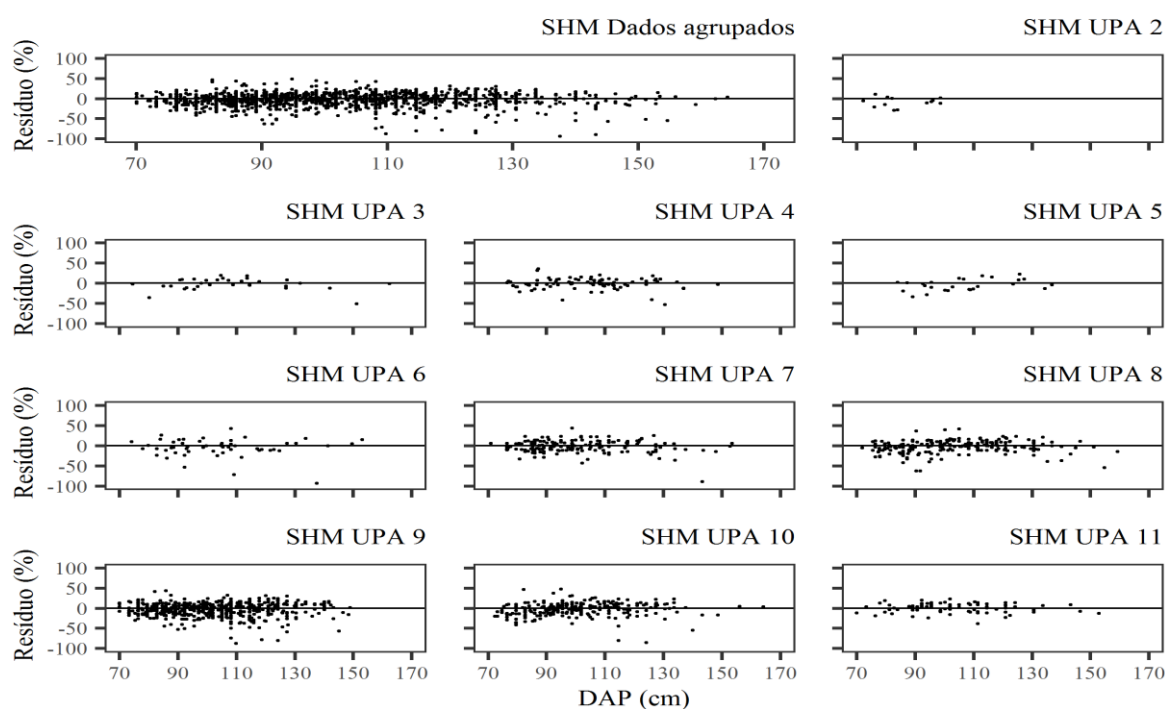
Em que: UPA: unidade de produção anual, G/UPA: área basal por UPA, em m²/UPA; β_i : coeficientes fixos do modelo; φ_2 : parâmetro aleatório da equação; *: parâmetro significativo de acordo com o teste t à 95% de probabilidade.

Anexo NNN - Dispersão dos resíduos do modelo SHM para a espécie *C. guianensis*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



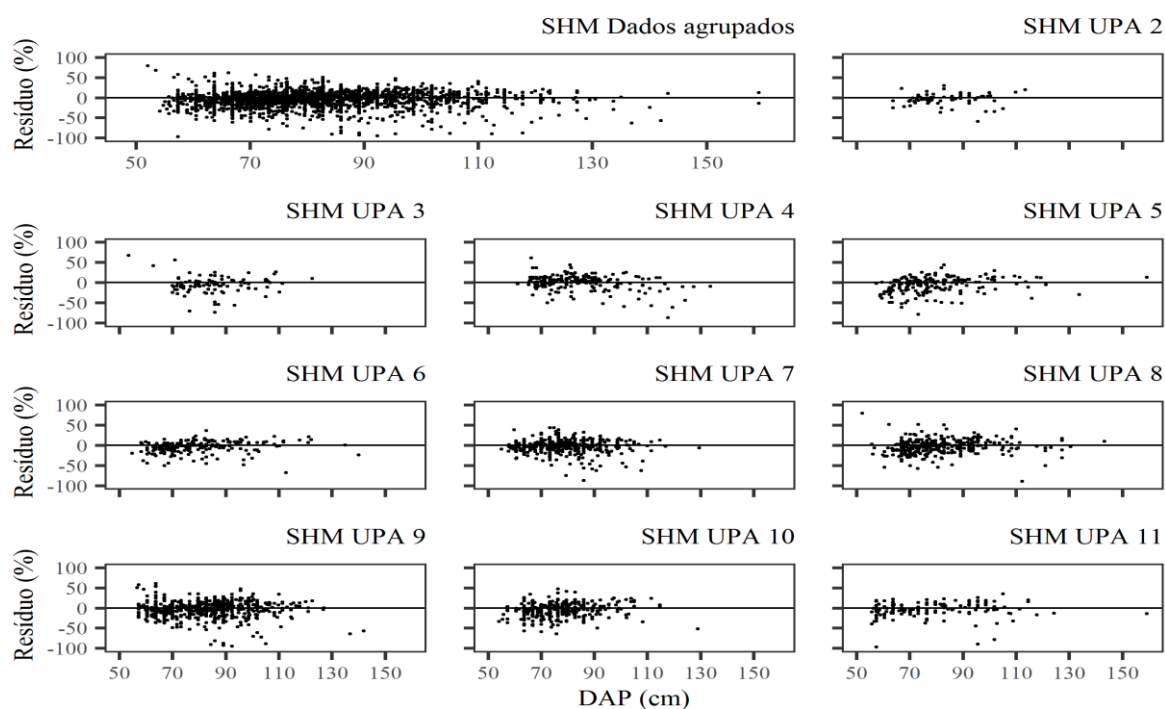
Em que: SHM: Schumacher e Hall Misto; UPA: Unidade de Produção Anual; DAP: diâmetro à altura do peito.

Anexo OOO - Dispersão dos resíduos do modelo SHM para a espécie *H. courbaril*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



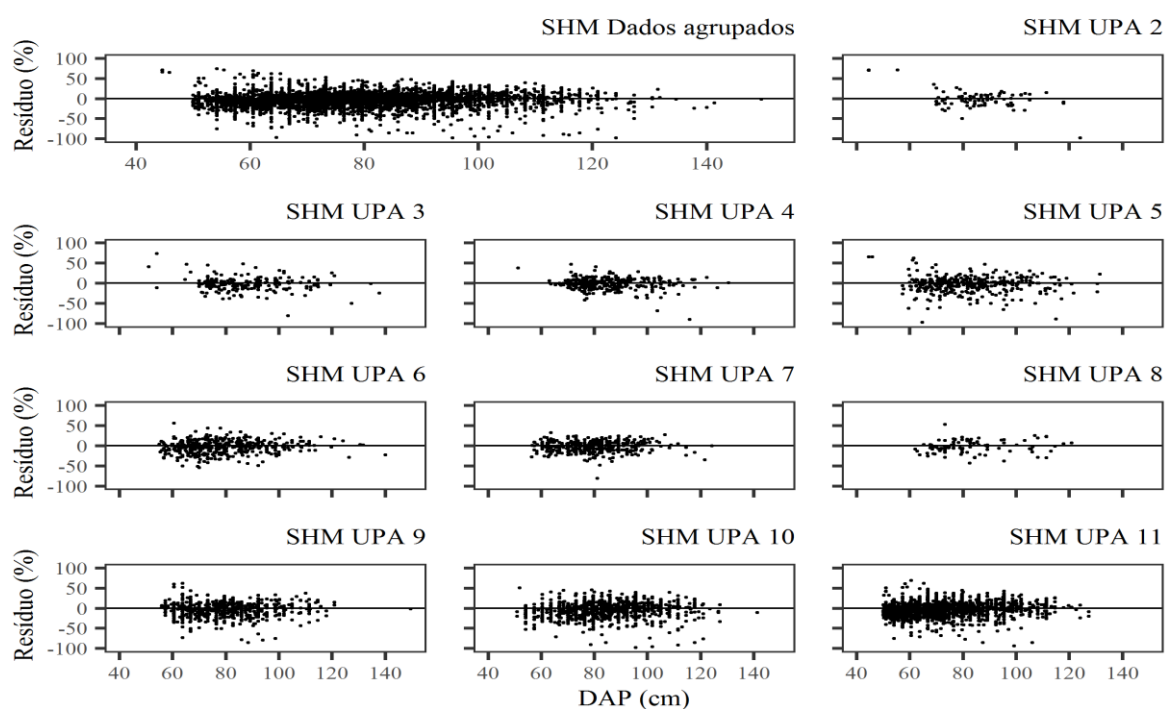
Em que: SHM: Schumacher e Hall Misto; UPA: Unidade de Produção Anual; DAP: diâmetro à altura do peito.

Anexo PPP - Dispersão dos resíduos do modelo SHM para a espécie *L. lurida*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



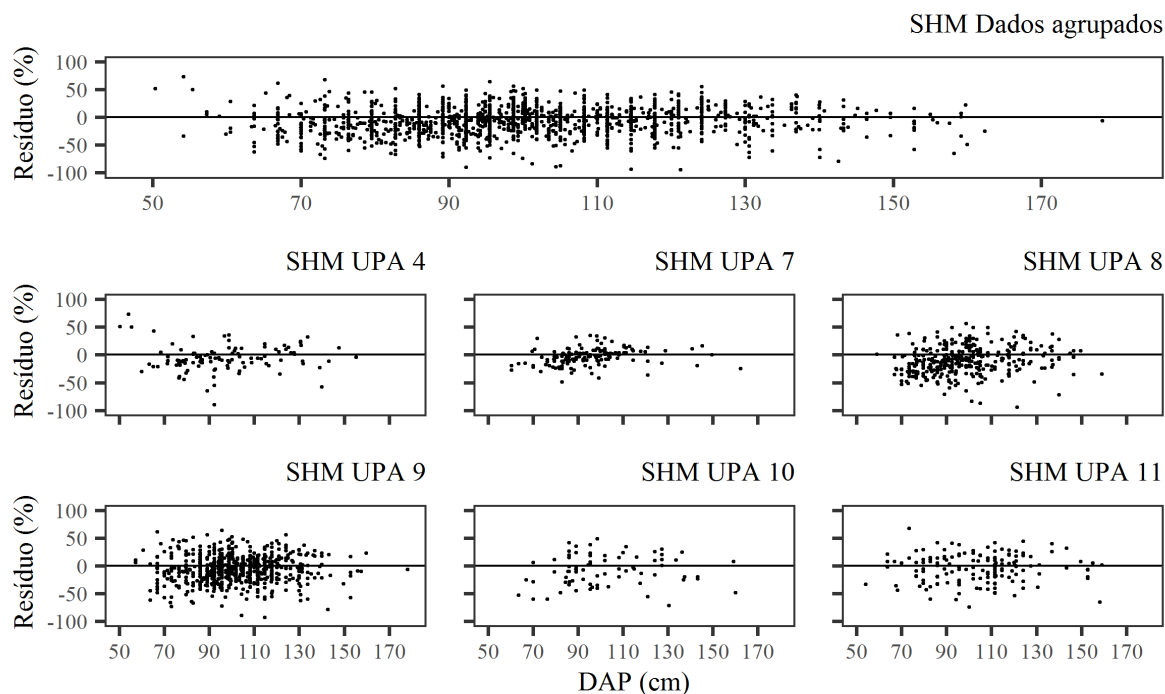
Em que: SHM: Schumacher e Hall Misto; UPA: Unidade de Produção Anual; DAP: diâmetro à altura do peito.

Anexo QQQ - Dispersão dos resíduos do modelo SHM para a espécie *M. elata*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



Em que: SHM: Schumacher e Hall Misto; UPA: Unidade de Produção Anual; DAP: diâmetro à altura do peito.

Anexo RRR - Dispersão dos resíduos do modelo SHM para a espécie *V. maxima*, em dez UPAs, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.



Em que: SHM: Schumacher e Hall Misto; UPA: Unidade de Produção Anual; DAP: diâmetro à altura do peito.