

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VINICIUS COSTA CYSNEIROS

**ESTRATÉGIAS PARA MODELAGEM DO VOLUME COMERCIAL EM  
FLORESTAS TROPICAIS**

CURITIBA

2016

VINICIUS COSTA CYSNEIROS

**ESTRATÉGIAS PARA MODELAGEM DO VOLUME COMERCIAL EM  
FLORESTAS TROPICAIS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado

Co-orientadores: Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari  
Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho

CURITIBA

2016

Ficha catalográfica elaborada pela  
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Cysneiros, Vinicius Costa

Estratégias para modelagem do volume comercial em florestas tropicais / Vinicius Costa Cysneiros. – Curitiba, 2016.

117 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado

Coorientadores: Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari

Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 18/07/2016.

Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Florestas tropicais - Rondônia. 2. Florestas tropicais - Amazônia. 3. Florestas - Medição. 4. Troncos (Botânica) - Medição. 5. Produtividade florestal. 6. Dendrometria. 7. Teses. I. Machado, Sebastião do Amaral. II. Pelissari, Allan Libanio. III. Figueiredo Filho, Afonso. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.524(811.1)

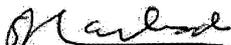


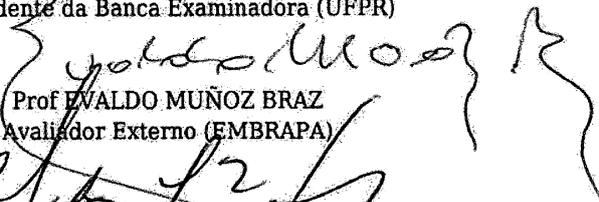
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
Setor CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
Programa de Pós Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL  
Código CAPES: 40001016015P0

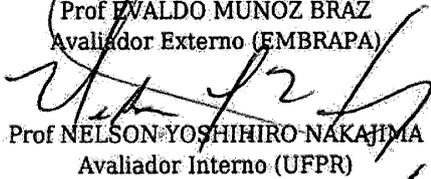
### TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **VINICIUS COSTA CYSNEIROS**, intitulada: "**ESTRATÉGIAS PARA MODELAGEM DO VOLUME COMERCIAL EM FLORESTAS TROPICAIS**", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO.

Curitiba, 18 de Julho de 2016.

  
Prof SEBASTIÃO DO AMARAL MACHADO  
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

  
Prof EVALDO MUÑOZ BRAZ  
Avaliador Externo (EMBRAPA)

  
Prof NELSON YOSHIHIRO NAKAJIMA  
Avaliador Interno (UFPR)



## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais José e Olinéa e aos meus irmãos Rafael e Natália, pelo apoio incondicional em todos os momentos.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado, por todo o empenho e dedicação em todas as etapas da construção desta dissertação e em minha orientação.

Ao meu Co-orientador Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari, por todas as conversas, ideias, sugestões e incessante ajuda na elaboração da dissertação e do processamento dos dados.

À minha companheira Ana Luiza de Rosa Castro, por todo apoio e atenção a mim dedicados nos últimos anos. Sem você nada seria possível!

À empresa Amata e todos os funcionários da Floresta Nacional do Jamari, por me acolherem como amigos no período de coleta de dados, em especial ao Engenheiro Florestal Luizinho de Souza, por todo suporte e ajuda fornecidos.

Ao Co-orientador Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho pelas valiosas correções e ideias que contribuíram para a melhoria deste manuscrito.

Ao amigo Marcelo Bonazza pela grande amizade e incentivo à produção científica.

Ao amigo Edilson Urbano pela convivência, amizade e pelas longas conversas florestais.

Às amigas Luciane Naimeke, Isis Dias e Myrcia Minatti, pela amizade e pelo ótimo convívio neste período.

Aos amigos Otávio Samor, Joaquim Mendonça, Tatiana Gai, Tomaz Lanza, Dalton Valle, Pablo Figueiredo, Juan Rezende, Leandro Abraão, Silfo Neves, Cévio Mendonça, Pedro Otávio e Eduardo Saddi, por todas as conversas, descontrações e dificuldades que tivemos ao adentrar as florestas do Brasil.

Aos professores Carlos Roderjan, Franklin Galvão e Yoshiko Kuniyoshi, por me apresentar as florestas do Sul do Brasil da melhor forma possível.

Ao Prof. Francisco Cavalcanti por despertar minha curiosidade sobre o uso múltiplo das florestas naturais.

Ao amigo Rodrigo Geroni pelas valiosas ideias e conversas sobre a floresta amazônica.

A todos os amigos e amigas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da UFPR.

A minha tia Lyz por despertar todo meu fascínio pelas plantas.

Ao marrom e a amora, por transformarem minhas preocupações em alegria.

Quando eu sou chama, seja você a brasa  
Quando eu sou chuva, seja você água  
Kukukaya, eu quero você aqui  
Kukukaya, mas olha esse cachorro aqui

(Eugênio Avelino “Xangai”)

## RESUMO GERAL

Este trabalho teve como objetivo modelar o volume comercial individual e por unidade de área de uma Floresta Ombrófila Densa de Terra Firme em regime de concessão no Sudoeste da Amazônia, situada na Floresta Nacional do Jamari, estado de Rondônia. Os dados são provenientes do censo florestal de uma Unidade de Produção Anual de 1.596 hectares e da cubagem em romaneio de 5.230 árvores, realizados entre os anos de 2014 e 2015. Com o objetivo de abordar diferentes formas de estimativa do volume, esta dissertação foi dividida em três capítulos. No primeiro capítulo, foi realizada a modelagem do volume comercial das espécies exploradas na FLONA, por meio de modelos genéricos e específicos. A estratificação por classes de diâmetro foi testada para todos os modelos, com objetivo de melhorar a precisão das estimativas. No segundo capítulo, foi testada uma abordagem multivariada em dois estágios, com análises de agrupamento e discriminante, para a formação de grupos de espécies e ajuste de modelos volumétricos. Neste capítulo, o objetivo foi verificar a eficácia da abordagem para: a resolução de problemas de espécies amostradas insuficientemente, redução do número de equações para um número gerenciável e estabilização dos erros de estimativa, por meio da formação dos grupos. O terceiro capítulo tratou da modelagem da produção volumétrica total e explorável por unidade de área, por meio de modelos tradicionais da literatura e de modelos gerados pelo processo *Stepwise*. Para isso, foram testadas variáveis de fácil obtenção comumente mensuradas em inventários florestais e variáveis que consideraram a diversidade e a estrutura das florestas. Assim, foram abordadas diferentes estratégias para a modelagem do volume comercial e da produção volumétrica por unidade de área em florestas tropicais amazônicas. As equações geradas neste trabalho são importantes ferramentas para a quantificação do volume comercial de espécies madeireiras da Amazônia, atendendo diversas necessidades técnicas e legais relacionadas à atividade de manejo florestal ao possibilitar estimativas precisas.

**Palavras-chave:** Floresta tropical, Amazônia, Equações de volume, Volume do povoamento.

## GENNERAL ABSTRACT

This study aims to model the individual and per unit of area commercial volume in a Tropical Rain Forest under concession in the Southwestern Amazon. The study area is located in the Jamari National Forest, Rondonia State, Brazil. The data came from the forest census of an Annual Production Unit of 1,596 hectares and volume scaling of 5,230 trees, performed between the years 2014 and 2015. In order to address different ways of estimating the volume, this work was divided into three chapters. In the first chapter was performed a modeling of the commercial volume of harvested species in this National Forest, through generic and specific models. Stratification by diameter classes was tested for all models, aiming to improve the accuracy of estimates. In the second chapter, a multivariate approach was tested in two stages, with cluster and discriminant analysis for the formation of groups of species and adjustment of volumetric models. In this chapter the objective was to verify the effectiveness of the approach to: solving problems with species sampled insufficiently, reducing the number of equations to a manageable number and stabilization of estimation error, by forming the groups. The third chapter deals with the modeling of the total production and exploitable commercial volume per unit of area, by means of traditional models from the literature and models generated by the stepwise process. For that, variables of ease obtention commonly measured in Forest Inventories and those which consider diversity and structure of the forest were tested. So, different strategies for modeling the commercial volume and production per unit of area in the Amazon rainforest were addressed. The volume equations generated in this study are important tools for quantifying the commercial volume of Amazon timber species, reaching various needs related to forest management activity, through accurate estimates.

**Keywords:** Tropical rainforest, Amazon, Volume equations, Stand volume

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4.1	DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS PARA OS DOIS MELHORES MODELOS DE SIMPLES ENTRADA (1 E 3) E DE DUPLA ENTRADA (7 E 8), TESTADOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME COMERCIAL SEM CASCA PARA TODAS AS ESPÉCIES COMERCIAIS.....	67
FIGURA 4.2	DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA ANGELIM PEDRA...	71
FIGURA 4.3	DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA CAMBARÁ ROSA....	71
FIGURA 4.4	DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA CUMARU.....	72
FIGURA 4.5	DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA CUIÚBA.....	72
FIGURA 4.6	DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA EMBIREIRA.....	72
FIGURA 4.7	DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA FAVEIRA FERRO....	72
FIGURA 4.8	DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA GARAPEIRA.....	72
FIGURA 4.9	DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA GUARIUBA.....	73
FIGURA 4.10	DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA MUIRACATIARA....	73
FIGURA 4.11	DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA MUIRAPIRANGA....	73
FIGURA 4.12	DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA PEQUIARANA.....	73
FIGURA 4.13	DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA ROXINHO.....	73
FIGURA 5.1	MÉTODO GRÁFICO DO COEFICIENTE DE FUSÃO PARA DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE CORTE NAS ANÁLISES DE	

	AGRUPAMENTO.....	92
FIGURA 5.2	DENDROGRAMAS DE SIMILARIDADE GERADOS PELA ANÁLISE DE AGRUPAMENTO UTILIZANDO OS COEFICIENTES DO MODELO AJUSTADO (1) E A COMBINAÇÃO DELES COM AS ESTATÍSTICAS DE AJUSTE (2).	93
FIGURA 5.3	DISPERSÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PARA O MODELO DE SCHUMACHER e HALL AJUSTADO PARA OS GRUPOS FORMADOS PELOS AGRUPAMENTOS UTILIZADOS...	96
FIGURA 6.1	LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA.....	104
FIGURA 6.2	DISPERSÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS DOS MODELOS TRADICIONAIS E GERADOS PELO STEPWISE SELECIONADOS PARA A ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO TOTAL E EXPLORÁVEL.....	112
FIGURA 6.3	DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DA VALIDAÇÃO DOS MODELOS SELECIONADOS PARA A ESTIMATIVA DO ESTOQUE VOLUMÉTRICO COMERCIAL TOTAL E EXPLORÁVEL EM UMA FLORESTA OMBRÓFILA NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA.....	113

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1	QUADRO ESQUEMÁTICO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O TESTE DE IDENTIDADE DE GRAYBILL.....	38
TABELA 4.1	MODELOS VOLUMÉTRICOS TESTADOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME COMERCIAL SEM CASCA NA FLONA DO JAMARI.....	63
TABELA 4.2	ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA POPULAÇÃO TOTAL COM OUTLIERS E APÓS REFINAMENTO SEM OUTLIERS.....	64
TABELA 4.3	COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DOS MODELOS VOLUMÉTRICOS TESTADOS PARA A ESTIMATIVA DO VOLUME COMERCIAL SEM CASCA NA FLONA DO JAMARI....	65
TABELA 4.4	COMPARAÇÃO DAS ESTATÍSTICAS DE AJUSTE E PRECISÃO ENTRE OUTROS TRABALHOS DESENVOLVIDOS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA.....	68
TABELA 4.5	ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS POPULAÇÕES DAS 12 ESPÉCIES AVALIADAS INDIVIDUALMENTE.....	69
TABELA 4.6	COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DOS MELHORES MODELOS VOLUMÉTRICOS TESTADOS PARA A ESTIMATIVA DO VOLUME COMERCIAL SEM CASCA DAS ESPÉCIES COMERCIAIS DA FLONA DO JAMARI.....	70
TABELA 4.7	ESTATÍSTICAS DE VALIDAÇÃO PARA OS MELHORES MODELOS SELECIONADOS POR AGRUPAMENTO.....	74
TABELA 4.8	COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DOS MODELOS TESTADOS PARA ESTIMAR O VOLUME COMERCIAL SEM CASCA COM DADOS NÃO AGRUPADOS EM CLASSES DE DIÂMETRO.....	76
TABELA 4.9	COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DOS MODELOS TESTADOS PARA ESTIMAR O VOLUME COMERCIAL SEM CASCA COM DADOS POR ESPÉCIE EM CLASSES DE DIÂMETRO.....	77
TABELA 4.10	ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TESTE DE GRAYBILL PARA OS MODELOS GERAIS E REDUZIDOS.....	78
TABELA 5.1	COEFICIENTES DE REGRESSÃO E ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DO MODELO VOLUMÉTRICO DE SCHUMACHER e HALL	

	AJUSTADO PARA 32 ESPÉCIES COMERCIAIS DA FLORESTA AMAZÔNICA.....	90
TABELA 5.2	GRUPOS DE ESPÉCIES FORMADOS PELA ANÁLISE DE AGRUPAMENTO E DISCRIMINANTE.....	94
TABELA 5.3	COEFICIENTES DE REGRESSÃO E ESTATÍSTICAS DOS GRUPOS FORMADOS PELA ANÁLISE DE AGRUPAMENTO E DISCRIMINANTE, PARA O MODELO DE SCHUMACHER e HALL.....	95
TABELA 6.1	ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS EMPREGADAS PARA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO TOTAL E EXPLORÁVEL...	106
TABELA 6.2	COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DOS MODELOS AJUSTADOS PARA A ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO TOTAL.....	108
TABELA 6.3	COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DOS MODELOS AJUSTADOS PARA A ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO EXPLORÁVEL.....	109
TABELA 6.4	COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DOS MODELOS GERADOS PELO PROCESSO STEPWISE PARA A ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO TOTAL E EXPLORÁVEL EM SUAS FORMAS PURAS E LOGARÍTMICAS.....	111

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>17</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
2.1. OBJETIVO GERAL.....	20
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
3.1. FLORESTA AMAZÔNICA .....	21
3.2. MANEJO FLORESTAL NA AMAZÔNIA.....	22
3.3. CONCESSÕES FLORESTAIS NA AMAZÔNIA .....	25
3.4. FLORESTA NACIONAL DO JAMARI .....	28
3.5. MÉTODOS DE ESTIMATIVA VOLUMÉTRICA EM FLORESTAS TROPICAIS .....	30
3.5.1. Métodos de obtenção do volume em árvores .....	30
3.5.2. Métodos de estimativa volumétrica.....	32
3.5.3. Critérios de seleção dos modelos .....	34
3.6. PREDIÇÃO DA PRODUÇÃO EM FLORESTAS TROPICAIS .....	38
3.6.1. Modelos de Crescimento e Produção Florestal .....	38
3.6.2. Variáveis para Modelos de Crescimento e Produção Florestal .....	39
3.6.3. Predição da Produção Florestal .....	41
3.7. AGRUPAMENTO DE DADOS EM FLORESTAS TROPICAIS .....	43
3.7.1. Métodos de Estratificação .....	44
3.7.2. Análise de Agrupamento .....	45
3.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	45
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>46</b>
<b>4. MODELAGEM VOLUMÉTRICA DE ESPÉCIES COMERCIAIS EM UMA FLORESTA OMBRÓFILA Densa SOB CONCESSÃO NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA .....</b>	<b>59</b>
RESUMO .....	59
ABSTRACT .....	59

4.1. INTRODUÇÃO.....	60
4.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	61
4.2.1. Área de estudo .....	61
4.2.2. Banco de dados.....	62
4.2.3. Ajuste e seleção dos modelos .....	62
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	63
4.3.1. Análise de <i>outliers</i> .....	63
4.3.2. Ajuste e seleção dos modelos .....	64
4.3.2.1. Equação geral.....	64
4.3.2.2. Equações individuais.....	68
4.3.3. Validação dos modelos selecionados .....	74
4.3.4. Estratificação em classes de diâmetro .....	75
4.3.4.1. Equação geral.....	75
4.3.4.2. Equações individuais.....	76
4.3.5. Identidade dos modelos .....	77
4.4. CONCLUSÕES .....	78
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>79</b>
<b>5. AGRUPAMENTO DE ESPÉCIES COMERCIAIS PARA MODELAGEM VOLUMÉTRICA EM UMA FLORESTA OMBRÓFILA Densa NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA .....</b>	<b>84</b>
RESUMO .....	84
ABSTRACT .....	84
5.1. INTRODUÇÃO.....	85
5.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	86
5.2.1. Área de estudo e coleta de dados.....	86
5.2.2. Análise dos dados .....	87
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	90
5.3.1. Ajuste do modelo de Schumacher e Hall para as espécies individuais .....	90
5.3.2. Análise de agrupamento e discriminante.....	91

5.3.3. Ajuste e comparação das equações volumétricas por grupos de espécies.....	94
5.4. CONCLUSÕES .....	97
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>97</b>
<b>6. MODELAGEM DO VOLUME COMERCIAL POR UNIDADE DE ÁREA DE UMA FLORESTA OMBRÓFILA DENSA SOB CONCESSÃO NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA .....</b>	<b>101</b>
RESUMO .....	101
ABSTRACT .....	101
6.1. INTRODUÇÃO.....	102
6.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	103
6.2.1. Área de estudo .....	103
6.2.2. Base de dados .....	103
6.2.3 Modelagem do estoque volumétrico .....	105
6.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	107
6.3.1. Modelos tradicionais.....	108
6.3.2. Modelos selecionados via <i>Stepwise</i> .....	110
6.3.3. Comparação dos modelos.....	112
6.4. CONCLUSÕES .....	114
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>114</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A floresta natural é o recurso renovável mais valioso e versátil que a natureza proporciona à humanidade, gerando produtos e serviços econômicos, ambientais, sociais, culturais e científicos (SOUZA e SOARES, 2013). Além disso, as florestas tropicais desempenham papel crucial como meio de subsistência a milhões de pessoas que dependem diretamente de seus recursos (PHILLIPS et al., 2004). Se bem manejados, tais recursos constituem um poderoso instrumento de desenvolvimento econômico, sendo decisivo no combate aos problemas sociais (HOSOKAWA et al., 2013), principalmente na Amazônia, onde as formações florestais predominam na paisagem.

Tais florestas são sistemas biológicos dinâmicos e longevos que estão em constante mudança (PENG, 2000). Alguns pontos, como o conhecimento do estoque disponível e da dinâmica de crescimento, incluindo mortalidade, ingresso, regeneração natural e incremento das árvores, são fundamentais para garantir a sustentabilidade da produção madeireira nas florestas tropicais (HIGUCHI, 1987; SILVA et al., 1995; BRIENEN e ZUIDEMA, 2006; PHILLIPS et al., 2004).

Comumente, os engenheiros florestais utilizam modelos matemáticos e estatísticos como forma de descrição da estrutura e da produção de seus povoamentos (NASCIMENTO, 2012). Esses modelos são essenciais para obter predições e previsões precisas sobre a floresta, permitindo a tomada de decisão sobre os níveis de gestão florestal (ATTA-BOATENG e MOSER, 1998). Logo, o manejo florestal sustentável, como um processo de gerenciamento permanente de áreas florestais, será tão eficiente à medida que as estimativas geradas com amostragens na floresta sejam estatisticamente precisas (RANGEL et al., 2006).

A quantificação volumétrica precisa das árvores individuais é um ponto fundamental para atender os aspectos legais concernentes ao manejo florestal, constituindo a principal ferramenta de planejamento, pois, além de dimensionar o estoque e a produtividade da floresta, gera informações que irão direcionar a atividade de colheita e o abastecimento de madeira (HIRAMATSU, 2008). Quando considerada a complexidade e a diversidade das formações florestais amazônicas, a carência de equações específicas para quantificação do volume das árvores comerciais ainda é evidente (MOURA, 1994; ROLIM et al., 2006; HIRAMATSU, 2008), uma vez que a heterogeneidade pronunciada na composição de espécies e estruturas, até mesmo dentro de pequenas áreas, constitui um importante desafio no desenvolvimento de funções de volume para florestas tropicais (AKINDELE e LEMAY, 2006).

Considerando a realidade das florestas nos trópicos, a agregação do conjunto de dados e das espécies resultará em elevada variabilidade, sendo a abordagem por grupos de espécies a mais adequada, pois, além de reduzir o número de equações necessárias, evita-se problemas como a insuficiência de dados por indivíduos de algumas espécies (VANCLAY, 1991; AKINDELE e LEMAY, 2006). Para isso, diversos procedimentos são empregados na classificação de espécies florestais, com destaque para as análises de agrupamento e discriminante (PHILLIPS et al., 2002; AKINDELE e LEMAY, 2006; SOUZA e SOUZA, 2006).

Para Figueiredo Filho (1983), a abundância de espécies florestais das mais variadas dimensões e a grande heterogeneidade etária das florestas tropicais afetam a forma das árvores, conferindo-lhes diversas peculiaridades e dificultando o emprego de fatores de forma e equações de volume individual. Esse autor mencionou que o emprego de equações de volume para o povoamento, com uso de variáveis de fácil obtenção, reduz o tempo dispendido para as medições e simplificam as etapas de processamento aos níveis de precisão aceitáveis, podendo compor uma importante ferramenta de planejamento da atividade florestal.

Outra forma de fundamentar a elaboração e a execução de planos de manejo florestal sustentável é a classificação da área em subgrupos homogêneos quanto à capacidade produtiva (SOUZA e SOUZA, 2006), permitindo a otimização da exploração, por meio da estratificação da produção. Na área florestal, o conceito de produtividade refere-se a uma estimativa quantitativa do potencial de um local em produzir biomassa vegetal (SKOVSGAARD e VANCLAY, 2008), refletindo as características biofísicas locais dos ambientes da floresta (BONTEMPS e BOURIAUD, 2014). A elevada diversidade e a complexidade das florestas tropicais naturais (SUDARSHANA et al., 2012) dificulta a aplicação das técnicas usuais de quantificação da produção (BATISTA et al., 2014), sendo necessário o desenvolvimento de técnicas condizentes com a realidade de tais formações.

Diante da elevada diversidade e complexidade estrutural das formações tropicais, a predição precisa da produção florestal se torna imprescindível para a implementação das atividades de manejo florestal sustentável. Portanto, esta dissertação tem como objetivo propor estratégias para modelagem do volume comercial em uma Floresta Tropical Úmida de Terra Firme no Sudoeste da Amazônia.

No capítulo I, o ajuste e a seleção de modelos foram aplicados para estimativa volumétrica das principais espécies comerciais, testando diversas funções matemáticas e estratégias. No capítulo II, as análises multivariadas de agrupamento e discriminante foram empregadas para agrupar as espécies comerciais de acordo com características dendrométricas

e, assim, desenvolver equações de volume para cada grupo. Por fim, no capítulo III, o volume comercial por unidade de área foi modelada por meio de variáveis de fácil obtenção e de outras que consideraram a diversidade e a estrutura das florestas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Avaliar estratégias para modelagem do volume comercial em uma Floresta Ombrófila Densa de Terra Firme em regime de concessão no Sudoeste da Amazônia.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Ajustar e selecionar modelos genéricos e específicos para a estimativa do volume comercial das espécies passíveis de exploração;
- Agrupar as espécies comerciais de acordo com características dendrométricas e ajustar equações de volume por grupo;
- Modelar o volume comercial por unidade de área por meio de medidas de fácil obtenção, usualmente mensuradas em inventários florestais e de variáveis que considerem a diversidade e a estrutura das florestas.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. FLORESTA AMAZÔNICA

A Floresta Amazônica é o maior *continuum* de floresta tropical úmida existente, detendo a segunda maior extensão em área florestal do mundo, atrás apenas da Rússia (HIGUCHI et al., 2006). No Brasil, a Floresta Amazônica ocupa cerca de 61% do território, correspondendo a aproximadamente 5 milhões de km<sup>2</sup> (FEARNSIDE et al., 1990; SFB, 2007), enquanto na América do Sul, essa formação florestal estende-se entre as Guianas e a Bolívia, totalizando cerca de 7 milhões de km<sup>2</sup> no continente (RIBEIRO et al., 1999).

No território nacional, a delimitação política da Amazônia Legal inclui os estados do Pará, Amazonas, Roraima, Amapá, Rondônia, Acre, e parte ao Norte dos estados do Mato Grosso, Maranhão e Tocantins (RIBEIRO et al., 1999; IBGE, 2012). A Floresta Amazônica está inserida na Bacia Amazônica, onde fluem cerca de 20% da água doce não congelada disponível no planeta e cerca de 80% da água disponível no território nacional (ITTO, 2006; SILVA et al., 2009).

A origem das florestas tropicais, e, portanto, da Amazônia, remonta à cerca de dois bilhões de anos atrás, quando a América e África formavam um continente único, denominado de Pangea (RIBEIRO et al., 1999; PUIG, 2008). Durante a separação dos dois continentes, e o consequente soerguimento dos Andes, a rede de drenagem atual da Bacia Amazônica começou a se formar (AB'SABER, 1982; BIGARELLA e FERREIRA, 1985; RIBEIRO et al., 1999).

A região florística Amazônica, composta principalmente pelas formações Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Estacional Sempre Verde e Campinarana, é caracterizada por apresentar vegetação com predomínio de famílias de dispersão pantropical, como Sapotaceae, Fabaceae, Lecythidaceae, Vochysiaceae, Caricaceae e Humiriaceae (IBGE, 2012). Dentre os elementos florísticos típicos desse Bioma, destacam-se as espécies florestais de interesse comercial como: a castanheira (*Bertholletia excelsea* Bonpl.), o pau-rosa (*Aniba roseodora* Ducke), a copaíba (*Copaifera multijuga* Hayne), o mogno (*Swietenia macrophylla* King), os angelins (*Dinizia excelsea* Ducke, *Zygia racemosa* (Ducke) Barneby e J. W. Grimes, *Andira surinamensis* (Bondt) Spligt. ex Amshoff, *Hymenolobium petraeum* Ducke, *H. modestum* Ducke, *H. excelsum* Ducke), a maçaranduba (*Manilkara huberi* (Ducke) A. Chev.), a andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.), o cumaru (*Dipteryx odorata* (Aubl) Willd.), a cerejeira (*Amburana acreana* (Ducke) A. C. Sm., os

jatobás (*Hymenaea courbaril* L., *H. intermedia* Ducke), os ipês (*Handroanthus serratifolius* (Vahl.) S. Grose, *H. incanus* (A. H. Gentry) S. Grose) e a itaúba (*Mezilaurus itauba* (Meisn.) Taub. ex Mez (INA, 1991; RIZZINI, 1990; IBAMA/LPF, 1997; FERREIRA e HOPKINS, 2004; CUNHA, 2013; IBGE, 2012), além de diversas espécies sem uso potencial conhecido.

Na Amazônia, as palmeiras desempenham importante papel econômico e social, principalmente quando considerado o uso da floresta por comunidades tradicionais (HENDERSON, 1995; MIRANDA e RABELLO, 2008), sendo citadas como um dos principais elementos das florestas na região amazônica, com maior destaque nas formações abertas (KAHN e GRANVILLE, 1992; MIRANDA e RABELLO, 2008; IBGE, 2012). O açai (*Euterpe oleracea* Mart.) é a espécie de palmeira de maior importância na economia da Amazônia, desempenhando papel fundamental na economia regional de populações tradicionais, sendo comercializado em vários países. Outras espécies de palmeiras têm grande destaque na economia regional, como o tucumã (*Astrocaryum vulgare* Mart., *A. aculeatum* G. Mey.), o babaçu (*Attalea speciosa* Mart. ex. Spreng), o buriti (*Mauritia flexuosa* L. f.), o inajá (*Attalea maripa* (Aubl.) Mart.), a jarina (*Phytelephas macrocarpa* Ruiz e Pav.), a bacaba (*Oenocarpus bacaba* Mart.), o batauí (*Oenocarpus bataua* Mart.) e o açai-solteiro (*Euterpe precatoria* Mart.).

Os principais ambientes que compõem as formações florestais na Amazônia estão relacionados a um gradiente de distância dos corpos d'água, associado à posição no relevo e topografia. De forma geral, os ambientes florestais são divididos em “terra-firme” e “várzea” ou “igapó”, em que a primeira se aplica às florestas que não são sazonalmente inundadas pela cheia dos rios, se diferenciando, assim, das várzeas ou igapós (RIBEIRO et al., 1999). De acordo com os mesmos autores, as formações florestais amazônicas podem ser divididas ainda quanto às características dos solos e relevos, refletindo em florística e em estrutura específicas para cada situação: platô, vertente, campinarana e baixio, em ordem decrescente de elevação. Relacionando as classificações citadas, as florestas de terra-firme equivalem às formações de platô e vertente, enquanto as florestas de várzea ou igapós correspondem à formação de baixio, e a campinarana, a uma região de transição.

### 3.2. MANEJO FLORESTAL NA AMAZÔNIA

Diversas definições sobre o manejo florestal foram utilizadas ao longo da história na ciência florestal. Um conceito clássico foi apresentado em 1958 pela Sociedade Norte Americana de Engenheiros Florestais, que, após a Conferência das Nações Unidas sobre Meio

Ambiente e Desenvolvimento (1992), agregou-se o termo sustentável, incorporando-o aos muitos instrumentos legais publicados a partir de então (ROSOT, 2007).

O manejo florestal pode ser definido como a parte da ciência florestal que trata do conjunto de princípios, técnicas e normas e que tem por fim organizar as ações necessárias para ordenar os fatores de produção e controlar sua produtividade e eficiência, visando alcançar objetivos definidos (HIGUCHI, 1994). De acordo com Scolforo (1998), o manejo florestal está centrado no conceito da utilização de forma sensata e sustentada dos recursos florestais, de modo que as gerações futuras possam usufruir pelo menos os mesmos benefícios das gerações presentes.

Segundo Higuchi (1987; 1994), o manejo florestal de rendimento sustentado se apresenta como a forma mais inteligente de uso do solo para a Amazônia brasileira, sendo aplicável a diversas sub-regiões desse bioma. Para Hosokawa et al. (2013), a floresta amazônica possui grande potencial florestal, que se manejado de maneira adequada, constitui um poderoso instrumento de combate a fome, de desenvolvimento econômico e de bem-estar social das comunidades nativas.

Por outro lado, sistema silvicultural é definido por Soares e Souza (2013) como o conjunto de regras e ações necessárias para conduzir a floresta a uma nova colheita, englobando, sobretudo, a colheita de madeira, a regeneração natural e os tratamentos silviculturais aplicados ao estoque remanescente. A escolha do sistema silvicultural obedece aos critérios fundamentados na experiência e na base científica, como o conhecimento da estrutura e da dinâmica da floresta, além de fatores sociais, econômicos e políticos (QUEVEDO, 1990; PELAEZ, 1985 *apud* SOUZA e SOARES, 2013).

De uma forma geral, entende-se por tratamento silvicultural todas as intervenções realizadas na floresta que visem aumentar sua qualidade e produtividade (SOUZA e SOARES, 2013). Segundo Azevedo et al. (2008), os tratamentos silviculturais podem acelerar as taxas de crescimento e envolvem dois tipos: i) liberação ou desbaste seletivo, que consiste na remoção de indivíduos competidores não desejáveis; ii) refinamento ou desbaste sistemático, que consiste na redução de área basal de indivíduos não-desejáveis, visando reduzir a competição. Assim, os principais tratamentos silviculturais aplicados ao manejo de florestas naturais compreendem o corte de cipós, a exploração florestal, o corte de refinamento, o corte de liberação e os plantios de enriquecimento com espécies de interesse (LAMPRECHT, 1990; SOUZA e JARDIM, 1993; AZEVEDO, 2006).

A partir das primeiras experiências silviculturais em florestas tropicais, originaram o Sistema Uniforme Malaio (SUM) e o Sistema Tropical de Cobertura (STC) (LAMPRECHT,

1990; SOUZA e JARDIM, 1993; SOUZA e SOARES, 2013). Com base no conhecimento adquirido ao longo dos anos, esses sistemas evoluíram e são aplicados, geralmente em versões modificadas, no manejo para produção madeireira em florestas tropicais (SOUZA e SOARES, 2013). No Brasil, as experiências pioneiras conduzidas na Floresta Amazônica objetivaram, principalmente, verificar o comportamento da produção sustentada, definir um sistema de colheita que não comprometa o funcionamento do ecossistema, estudar os parâmetros de sustentabilidade do ecossistema sob manejo, avaliar a eficácia dos tratamentos silviculturais e analisar o impacto da exploração sobre a estrutura da floresta remanescente, da regeneração natural e dos solos (HIGUCHI, 1987; SILVA, 1989; HIGUCHI et al., 1991; LOPES, 1993; SOUZA e JARDIM, 1993; JARDIM, 1995; HIGUCHI et al., 1997; SCOLFORO, 1998; YARED et al., 2000; COSTA et al., 2001; SOUZA et al., 2002; MARTINS et al., 2003; SILVA, 2004; OLIVEIRA, 2005; AZEVEDO, 2006; MUNIZ et al., 2007; SOUZA e SOARES, 2013). Esses estudos encontraram importantes resultados sobre a dinâmica das florestas manejadas, gerando informações para o norteamento e a tomada de decisão pertinentes ao manejo sustentável das florestas naturais, tornando possível manejar a Amazônia brasileira.

Os resultados obtidos com as experiências silviculturais conduzidas na Amazônia inspiraram dois sistemas policíclicos de manejo para a região, o Sistema Silvicultural Brasileiro para Florestas de Terra Firme da Amazônia e o Sistema de Seleção de Espécies Listadas (AZEVEDO et al., 2008; SOUZA e SOARES, 2013). Esses sistemas se baseiam na regeneração natural da floresta, que produzirá árvores comercializáveis em ciclos de corte sucessivos. Por se assemelharem com os processos naturais de sucessão em clareiras, os sistemas policíclicos são mais apropriados para o manejo das florestas tropicais (SOUZA e SOARES, 2013).

Diante do exposto, o manejo florestal é preconizado como um conjunto de ferramentas capazes de lidar com os grandes desafios da região amazônica, ao passo que as discussões sobre o futuro da Amazônia convergem para o reconhecimento da vocação florestal dessa ampla região (HIGUCHI, 1994; HOLMES et al., 2002; ITTO, 2006; HOSOKAWA et al., 2008; SILVA et al., 2009). Logo, o conhecimento dos aspectos silviculturais das florestas e das espécies de interesse, bem como as informações sobre a composição florística, estrutura, estoque potencial, dinâmica de crescimento e dos impactos gerados pela exploração, são fundamentais para o manejo das florestas em regime sustentável, juntamente com estudos sobre a viabilidade técnica e econômica (BATISTA, 1989; CALEGÁRIO, 1998; SOUZA et al., 2002; NASCIMENTO, 2012; HOSOKAWA et al., 2013; SOARES e SOUZA, 2013), pois

a questão fundamental parte do pressuposto de que as florestas devam gerar produtos para novas colheitas, sendo o princípio básico do rendimento sustentável (HOSOKAWA et al. 1998; MARTINS et al., 2003).

No entanto, algumas problemáticas concernentes com a implementação das atividades de manejo florestal no Brasil ainda são explícitas, como: ausência de conhecimento técnico-científico sobre a floresta e as espécies que a compõe; número restrito de espécies exploráveis, devido principalmente à falta de conhecimento sobre as madeiras nativas; deficiência de corpo técnico nos órgãos ambientais para fiscalização e monitoramento das atividades; exploração ilegal, que gera oferta de madeira com preços aquém da realidade; falta de recurso para aplicação da legislação; e engessamento da legislação (ITTO, 2006; SILVA et al., 2009; CAVALCANTI et al., 2010). Para a reversão dessa situação, Cavancanti et al. (2010) citaram que, além do aprimoramento de sistemas de controle e fiscalização, há a necessidade da implementação de sistemas de desenvolvimento econômico e social baseados no uso e na conservação das florestas.

A certificação florestal aparece como instrumento de análise da qualidade do manejo florestal, auxiliando a verificação do cumprimento de questões ambientais, econômicas e sociais previstas na Instrução Normativa nº 05 de 11 de dezembro de 2006 e pelo Conselho de Manejo Florestal (SILVA et al., 2009). Na Amazônia Legal, há um crescente aumento de áreas exploradas legalmente e certificadas (CARNEIRO, 2011; CUNHA, 2013), evidenciando uma mudança no setor florestal brasileiro, que se torna mais competitivo em nível internacional e nos mercados mais exigentes. No entanto, diversas dificuldades ainda envolvem a certificação florestal no Brasil (SCHULZE et al., 2008; SILVA et al., 2009), sobretudo a vasta extensão territorial envolvida.

### 3.3. CONCESSÕES FLORESTAIS NA AMAZÔNIA

No Brasil, a legislação vigente estabelece três modalidades de gestão para a produção florestal sustentável: a criação de Unidades de Conservação, o estímulo ao Uso Comunitário das Florestas e as Concessões Florestais pagas baseadas em licitações públicas (SILVA et al., 2009).

O contexto das concessões florestais no Brasil teve como marco legal a Lei de Gestão de Florestas Públicas (Lei 11.284/2006), que instituiu o Serviço Florestal Brasileiro, gerando, assim, a possibilidade de concessões de áreas de florestas públicas (SFB, 2015). Essa Lei tem como desígnio principal a proteção e a conservação das florestas Federais, Estaduais e

Municipais, possibilitando a oferta de benefícios econômicos, sociais e ambientais (Brasil, 2008), sendo fornecido ao concessionário apenas o direito de praticar o manejo florestal para a extração de produtos madeireiros, não madeireiros, serviços de ecoturismo e outros produtos submetidos à exploração especial.

De acordo com a Lei 11.284/06, o Serviço Florestal Brasileiro (SFB) foi estabelecido como o órgão responsável pela gestão das florestas públicas e das concessões estabelecidas em áreas de florestas públicas federais (SFB, 2015). Conseqüentemente, cabe a esse órgão a responsabilidade pelo monitoramento das concessões, bem como dos compromissos assumidos pelos concessionários no contrato. Os itens contemplados no monitoramento estão dispostos no Decreto nº 6.063/2007, sendo os principais: implementação de Plano de Manejo Florestal Sustentável; proteção da floresta e das espécies que a compõem, em especial as ameaçadas de extinção; proteção dos corpos d'água; minimização dos impactos ambientais, sociais e econômicos que possam afetar a segurança pública e defesa nacional.

Dentre os mecanismos de controle adotados pelo SFB no monitoramento das concessões em florestas públicas federais, estão: sistema de controle da produção por meio de sensoriamento remoto e rastreamento do transporte da madeira; validação da implementação das atividades concernentes ao contrato de concessão florestal; avaliação da dinâmica de desenvolvimento da floresta sob manejo; e avaliação dos impactos de natureza ambiental, social e econômica, além de auditorias florestais independentes, monitoramento da legislação trabalhista e análise de toda cadeia de custódia.

Atualmente, no Brasil estão vigentes cinco contratos de concessão florestal, em ordem crescente de criação: Floresta Nacional do Jamari (RO), FLONA de Saracá-Taquera (PA), FLONA de Jacundá (RO), FLONA do Crepori (PA) e FLONA de Altamira (PA), estando ainda em processo para concessão futura a FLONA de Itaituba (PA), FLONA de Caxiuanã e FLONA do Amana (PA). Considerando as áreas atuais de concessão, é totalizado um montante de cerca de 840.000 hectares de floresta no território nacional, sendo previsto a duplicação da extensão de florestas sob concessão para os próximos anos somente no estado do Pará (SFB, 2015).

Para as áreas sob concessão florestal, são previstos diversos benefícios ambientais e sociais, justificando, assim, sua implantação e implementação em regime de rendimento sustentado. Dentre os principais benefícios, destaca-se a manutenção da cobertura florestal e dos serviços ambientais prestados, em harmonia com o fornecimento de diversos produtos madeiráveis e não madeireiros. Os benefícios diretos e indiretos fornecidos pelas florestas à sociedade estão vastamente descritos na literatura, variando desde serviços ecossistêmicos e

ambientais até produtos econômicos de valoração direta, como a madeira (FAO, 1971; LAMPRECHT, 1990; HIGUCHI, 1994; SCOLFORO, 1998; ROTHERMEL, 2002; FAO, 2004; CAVALCANTI, 2007; HIGUCHI et al., 2008; SOUZA e SOARES, 2013; BATISTA et al., 2014).

Segundo Roma e Andrade (2013), a junção entre a estabilidade de oferta, a fácil rastreabilidade e a ausência de conflitos de direito de propriedade, geradas pelas concessões florestais, poderia facilitar o acesso do Brasil em mercados internacionais mais rigorosos quanto a certificação do manejo florestal e da cadeia de custódia. Ainda, Lentini et al. (2005) acrescentaram que a certificação oferece uma série de vantagens fiscais e econômicas, tornando o manejo florestal no Brasil mais competitivo em nível internacional.

Diversas problemáticas envolvendo o uso da terra, como desmatamentos ilegais, queimadas e problemas fundiários por consequência da expansão da fronteira agrícola, têm resultado em conflitos e forte pressão sobre as terras públicas em diferentes níveis na Amazônia Legal (SILVA et al., 2009; ROMA e ANDRADE, 2013). Em contradição a esse cenário, a Floresta Amazônica abriga inúmeras potencialidades naturais, propiciando um leque de possibilidades ao desenvolvimento sustentável da região (HIGUCHI, 1987; CAVALCANTI, 2007; BRASIL, 2008). No entanto, a maioria do seu território é constituída de terras devolutas e sem regulamentação legal, sendo alvo das problemáticas citadas que podem ocasionar impactos ambientais, sociais e econômicos (SFB, 2007; SILVA et al., 2009) às vezes de forma irreversível. Quanto aos problemas concernentes às concessões, Silva et al. (2009) citaram que a fiscalização e o monitoramento das atividades previstas nos contratos são as mais frágeis, agravadas principalmente pela complexidade, diversidade e extensão da Floresta Amazônica.

A viabilidade econômica das concessões florestais no Brasil é tema de diversas discussões, porém há escassez de literaturas científicas, devido principalmente ao início recente dos contratos de concessão no país. Nesse sentido, Arima e Barreto (2002) avaliaram a rentabilidade potencial da exploração madeireira em florestas públicas e privadas, com foco nas Florestas Nacionais do Jamari (RO), Bom Futuro (RO), Caxiuanã (PA), Tapajós (PA) e Tefé (AM), os quais basearam na comparação entre os valores mínimos da madeira em pé explorável e da madeira manejada, entre florestas públicas e privadas, apontando a lucratividade da exploração na maioria dos locais estudados. No entanto, a exploração ilegal pode alterar significativamente esse cenário, devido à oferta de madeira com custo inferior, devendo ser alvo de ações estratégicas de fiscalização (SILVA et al., 2009).

Nesse contexto, as concessões florestais surgem como instrumento legal de ordenamento do uso e conservação das florestas públicas por meio da gestão ao longo prazo (Lei 11. 284/06), fornecendo subsídios ao planejamento e ao zoneamento do território, de acordo com as vocações e especificidades de cada região.

### 3.4. FLORESTA NACIONAL DO JAMARI

Criada em 25 de setembro de 1984 por meio do Decreto 90.224/84, a Floresta Nacional do Jamari está localizada no Norte do estado de Rondônia, nos municípios de Candeias do Jamari, Itapuã do Oeste e Cujubim, entre as coordenadas geográficas 09° 00' 00'' a 09° 30' 00'' S e 62° 44' 05'' a 63° 16' 64'' W (ZACHOW, 1991; MMA/IBAMA, 2005; AMATA, 2013). Ocupa uma área de aproximadamente 220.000 hectares, com principal acesso por meio da capital Porto Velho pela BR 364 no sentido Sul, percorrendo cerca de 110 km (AMATA, 2013).

Em quase toda sua extensão, a FLONA do Jamari apresenta relevo entre plano a suavemente ondulado, com declividade acentuada apenas na parte Leste entre os rios Jacundá e Preto (ZACHOW, 1991). A área está inserida no planalto rebaixado da Amazônia, sendo encontradas cinco feições geomorfológicas predominantes: superfícies tabulares; agrupamentos de morros e colinas; superfície de aplainamento; planícies inundáveis; e vales, depressões, lagos e deltas (ZACHOW, 1991; RADAMBRASIL, 1988; MMA/IBAMA, 2005). Quanto à geologia, o estado de Rondônia está inserido no Sudoeste do Cráton Amazônico; especificamente, a região da FLONA está localizada no Terreno Jamari, nos domínios Ariquemes – Porto Velho e Central Rondônia, onde as coberturas Fanerozóicas são comuns (MMA/IBAMA, 2005). Na área da FLONA são encontradas unidades pedológicas formadas por associações de Latossolos Amarelo, Vermelho e Vermelho Amarelo, Cambissolos distróficos, além de Podzóis (RADAM, 1988; MMA/IBAMA, 2005).

A FLONA está inserida na grande região hidrográfica do Rio Madeira, principal afluente do estado de Rondônia, nas Bacias Hidrográficas dos Rios Jamari, Candeias, Preto e Jacundá (ZACHOW, 1991; MMA/IBAMA, 2005). Existem na área vários igarapés, sendo que a maioria não apresenta condições de navegabilidade, atuando como canais de drenagem do excesso hídrico, com destaque para os igarapés: Bom Retiro, Japim, Crente, Rico, da Raiz, Cantina, Taboquinha, Tabocão, Cachoeirinha, da Queimada e Bom Futuro (ZACHOW, 1991).

De acordo com a classificação global dos tipos climáticos proposta por Köppen, o clima da região é o Tropical Chuvoso do tipo Aw, com período seco bem definido na estação do inverno, precipitação média anual em torno de 2.400 mm e temperatura média anual de 25°C (MMA/IBAMA, 2005). Na região, o período de maior precipitação está concentrado no verão e entre os meses de outubro a abril e o de menor, de junho a agosto, durante o inverno. No entanto, há na região uma variação constante na temperatura e uma grande irregularidade na precipitação anual (ZACHOW, 1991).

Em sua extensão, predominam as tipologias da Floresta Ombrófila, variando de Aberta à Densa quanto à fisionomia, composição e estrutura (RADAM, 1978; ZACHOW, 1991; MMA/IBAMA, 2005; IBGE, 2012). As Florestas Ombrófilas são caracterizadas por fatores climáticos tropicais, como elevadas temperaturas e precipitações abundantes e bem distribuídas ao longo do ano (MMA/IBAMA, 2005; IBGE, 2012). O termo Ombrófila, de origem Grega, substituiu o termo Pluvial de origem Latina usado em classificações anteriores (IBGE, 2012), porém ambas têm o significado de “amigo das chuvas”, em alusão a ausência de períodos secos.

A Floresta Ombrófila Densa é caracterizada pelo predomínio de fanerófitos nas subformas de vida macro e mesofanerófitos, além de herbáceas e epífitas em abundância (IBGE, 2012). Nessas formações, o volume de material lenhoso é maior, devido à maior densidade de espécies arbóreas (ZACHOW, 1991). Nas formações abertas, predominam cipós, palmeiras e bambus, com grande expressividade das palmeiras babaçu (*Attalea speciosa* Mart. ex. Spreng.), patauá (*Oenocarpus bataua* Mart.) e inajá (*Attalea maripa* (Aubl.) Mart.), de bambus do gênero *Guadua* e da sororoca (*Phenakospermum guyannense* (A. Rich.) Endl. ex Miq.) (ZACHOW, 1991; IBGE, 2012). Por consequência, a densidade de indivíduos arbóreos é menor (MMA/IBAMA, 2005), originando, assim, o termo “floresta aberta”.

Quanto ao ambiente e relevo, as formações florestais encontradas na FLONA do Jamari podem ser classificadas em aluviais e de terra firme, orientadas em um gradiente topográfico a partir dos cursos d’água (RIBEIRO et al., 1999; MMA/IBAMA, 2005); sendo as aluviais divididas em Florestas de Várzea, Baixio e Veredas (ou Buritizais), e as de terra firme em Ombrófila de Terras Baixas e Ombrófila Submontana (MMA/IBAMA, 2005; IBGE, 2012).

Segundo o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), a FLONA está inserida na categoria de uso sustentável, tendo como principal objetivo, compatibilizar a conservação da natureza com o uso sustentável de uma parcela dos seus recursos naturais

(BRASIL, 2000). O histórico do uso do solo na FLONA do Jamari foi marcado por décadas de atividades de mineração, que exploravam basicamente a cassiterita. As descrições das atividades de mineração desenvolvidas na FLONA, bem como o histórico e as principais problemáticas envolvidas, estão pormenorizadamente descritas em Zachow (1991).

A FLONA do Jamari foi a primeira floresta pública no Brasil a entrar em regime de concessão florestal (BARBOSA et al., 2009; MONTEIRO et al., 2013; ROMA e ANDRADE, 2013), sendo dividida em três Unidades de Manejo Florestal (UMF) independentes, licitadas individualmente à empresas privadas do setor (SFB, 2015). De sua área total, cerca de 96.000 hectares foram destinados ao manejo florestal sustentável via concessão florestal (AMATA, 2012; MONTEIRO et al., 2013), sendo o restante destinado principalmente a conservação e ao uso por comunidades tradicionais. Segundo o estudo realizado por Arima e Barreto (2002), a FLONA do Jamari foi apontada como uma das regiões em que a produção de madeira manejada teria a maior lucratividade na Amazônia Legal, evidenciando a viabilidade econômica da exploração florestal e justificando a sua destinação à concessão.

### 3.5. MÉTODOS DE ESTIMATIVA VOLUMÉTRICA EM FLORESTAS TROPICAIS

#### 3.5.1. Métodos de obtenção do volume em árvores

A variável volume é a principal característica para a avaliação do potencial produtivo de uma floresta. Logo, a quantificação do estoque volumétrico se torna o objetivo fundamental na maioria dos levantamentos florestais (MOURA, 1994; BAIMA et al., 2001; MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2014). Ao considerar a árvore e todos os seus componentes, o tronco é o que possui o maior valor comercial, sendo foco dos estudos de determinação do volume em florestas (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2014).

No entanto, a obtenção do volume das árvores é influenciada primordialmente pela forma do tronco (SPURR, 1952; SOARES et al., 2011; CAMPOS e LEITE, 2013; BATISTA et al., 2014). Para as espécies arbóreas tropicais, as formas características do fuste são: neilóide, cone, parabolóide e cilindro; variando de acordo com uma série de fatores, tais como: espécie, sítio, tratamentos silviculturais, idade e características genéticas (LOETSCH et al., 1973; HUSCH et al., 1982). Os padrões do fuste podem variar intensamente em florestas naturais, pois, além dos fatores citados, são influenciadas também pela competição intra e interespecífica com espécies arbóreas e outras formas de vida, como lianas e cipós. Machado e Figueiredo Filho (2014) citaram que à medida que a forma do tronco se afasta de uma

condição regular, maior é a dificuldade em aplicar modelos matemáticos para estimativa precisa do volume.

A madeira apresenta diversas utilidades comerciais e, com isso, a quantificação do volume lenhoso pode ser realizada de várias maneiras, como por volume total ou comercial, com ou sem casca, e por volume sólido ou empilhado (BATISTA et al., 2014). Considerando os métodos utilizados para a obtenção do volume real de árvores, os mais precisos envolvem técnicas destrutivas, como o abatimento e o seccionamento dos seus componentes. Segundo Batista et al. (2014), há duas possíveis abordagens para a determinação do volume do fuste de árvores: a medição indireta e a cubagem rigorosa; a primeira envolve um princípio físico de associação do volume de uma seção com uma grandeza que pode ser medida diretamente, com destaque para o método do deslocamento de água ou xilômetro e o método do empuxo; a segunda abordagem visa a divisão e a mensuração de diversas seções ao longo do tronco.

A cubagem rigorosa, embora um pouco menos precisa que os métodos diretos que utilizam o xilômetro, é o procedimento mais utilizado, devido à maior facilidade de execução e o menor custo envolvido. Como anteriormente mencionado, para a cubagem rigorosa, o abate e o seccionamento em  $n$  seções ou toras são necessários para, posteriormente, medir o diâmetro ou a circunferência e o comprimento de cada seção (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2014). Para tal, foram desenvolvidas expressões matemáticas para a determinação do volume com e sem casca, como as de Smalian (Eq. 3.1), Huber (Eq. 3.2), Newton (Eq. 3.3) e Hohenadl (Eq. 3.4), que fornecem estimativas do volume de seções individuais da árvore (LOETSCH et al., 1973; HUSCH et al., 1982; CLUTTER et al., 1983; AVERY e BURKHART, 1994; PRODAN, 1997; SOARES et al., 2011; BATISTA et al., 2014; MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2014). Porém, Soares et al. (2011) afirmaram que os três métodos propiciam estimativas volumétricas diferentes, concluindo que quanto menor o comprimento da seção, menor a diferença entre as estimativas. Outros métodos de cubagem estão disponibilizados em Machado e Figueiredo Filho (2014).

$$v = \left( \frac{g_1 + g_2}{2} \right) \cdot l \quad \text{Smalian (3.1)}$$

$$v = gm \cdot l \quad \text{Huber (3.2)}$$

$$v = \left( \frac{g_1 + 4gm + g_2}{6} \right) \cdot l \quad \text{Newton (3.3)}$$

$$v = \frac{h}{5} (g_{0,1} + g_{0,3} + g_{0,5} + g_{0,7} + g_{0,9}) \quad \text{Hohenadl (3.4)}$$

Em que:  $v$  = volume da tora ou seção;  $g_1$  = área transversal na base da tora;  $g_2$  = área transversal no topo da tora;  $l$  = comprimento da seção;  $gm$  = área transversal no meio da seção;  $h$  = altura total da árvore; e  $g_i$  = áreas transversais calculadas a 10, 30, 50, 70 e 90% de  $h$ .

Por fim, independentemente do método de cubagem adotado, recomenda-se sempre a medição do diâmetro à altura do peito medido a 1,3 m do solo ( $d$ ), da altura total ( $ht$ ) e comercial ( $hc$ ) das árvores. Outra recomendação refere-se ao tamanho das seções, de 1 a 2 m, com seções menores apenas na base, onde a forma pode variar abruptamente.

### 3.5.2. Métodos de estimativa volumétrica

Na Amazônia Brasileira, por muito tempo utilizou-se o fator de forma 0,7 (Eq. 3.5) proposto por Heinsdijk e Bastos (1963) de forma generalizada, para diferentes espécies, sítios, formações e tipologias florestais, ocasionando sérios erros nas estimativas volumétricas (ROLIM et al., 2006; HIRAMATSU, 2008). No início da década de 1980, aflorou a necessidade pelo aprimoramento das técnicas para estimar o volume de árvores, visando à obtenção de estimativas mais confiáveis. Desde então, diversos trabalhos foram realizados na Amazônia com esse objetivo, tais como: Fernandes et al. (1983); Figueiredo Filho (1983); Silva e Araújo (1984); Silva e Carvalho (1984); Silva et al. (1984); Higuchi e Ramm (1985); Moura (1994); Baima et al. (2001); Rolim et al. (2006); Hiramatsu, (2008); Barros e Silva Júnior (2009); Colpini et al. (2009); Leite e Resende (2010); Lima (2010); Thaines et al. (2010); Barreto et al. (2014); Gimenez et al. (2015); e Tonini e Borges (2015).

$$v = \frac{\pi \cdot d^2}{40.000} \cdot ht \cdot f \quad \text{Volume com fator de forma médio (3.5)}$$

Em que:  $\pi = 3,1416\dots$ ;  $d^2$  = diâmetro a altura do peito em centímetros, medido a 1,3 m do nível do solo;  $ht$  = altura total da árvore em metros; e  $f$  = fator de forma médio.

Um importante paradigma na ciência florestal é o fato de que algumas variáveis importantes, como o volume e a biomassa das árvores, serem obtidas apenas por meio de métodos destrutivos. Para contornar esse problema, a solução é simples: a partir de uma

amostra destrutiva se constrói uma relação empírica, que permita determinar as medidas destrutivas com uso de medidas não destrutivas, aplicando às árvores em pé, uma predição da medida destrutiva de interesse (BATISTA et al., 2014).

Uma vez obtidas amostras destrutivas, a relação empírica entre as variáveis dependentes e independentes pode ser alcançada de diversas maneiras, dentre os principais estão o método gráfico e o analítico. O método gráfico consiste em plotar, em um sistema de coordenadas cartesianas, os valores de ambas variáveis e buscar a equação que descreva a linha média por entre os pontos observados. Enquanto o método analítico, foco do presente estudo, envolve o uso de modelos matemáticos funcionais (funções de volume), ajustados por meio de regressão linear, não linear, técnica dos mínimos quadrados, método matricial e equações normais. Com o desenvolvimento das tecnologias computacionais, as tabelas de volume evoluíram para a forma de equações lineares ou não lineares, e continuam evoluindo a partir do aprimoramento de técnicas computacionais, como as análises multivariadas (*stepwise*, *backward* e *forward*) e as redes neurais artificiais.

A equação de volume é a forma mais usual de predição da volumetria das árvores (BATISTA et al., 2014). Esse tipo de equação se apresenta de forma algébrica, relacionando o volume da árvore (variável dependente) com outros atributos de fácil mensuração, como diâmetro e altura (variáveis independentes). Os modelos matemáticos para estimativa de volume são fartamente descritos na literatura, podendo ser classificados em: modelos de variável combinada, de simples entrada e de dupla entrada, conforme as características das variáveis independentes (LOETSCH et al., 1973; HUSCH et al., 1982; CLUTTER et al., 1983; AVERY e BURKHART, 1994; PRODAN, 1997; SOARES et al., 2011; CAMPOS e LEITE, 2013; BATISTA et al., 2014; MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2014).

Quanto ao ajuste desses modelos, as técnicas de análise de regressão têm se consagrado pela fácil aplicabilidade e pelos bons resultados gerados (DRAPER e SMITH, 1998; CAMPOS e LEITE, 2013). Essas técnicas são aplicadas basicamente para a obtenção dos coeficientes da regressão, que substituídos nos modelos, dão origem às equações de volume. A lógica da análise de regressão consiste em expressar expectativas sobre uma variável dependente, sempre em função da variável independente (LATTIN et al., 2011). De acordo com Nascimento (2012), um problema associado ao uso dessa técnica consiste na determinação da função ou modelo matemático que melhor expresse a relação entre as variáveis, que pode ser realizada por meio de critérios estatísticos de seleção.

O procedimento de seleção de variáveis por *Stepwise* se inicia selecionando a variável explicativa mais correlacionada com a variável dependente para, em seguida, testar a

significância dessa variável pelo teste  $F$  e, assim, incorporar no modelo as de maior correlação (MACHADO et al., 2008). Logo, esse procedimento potencializa a estruturação do modelo volumétrico, por meio da escolha das variáveis independentes de maior correlação com a variável dependente de interesse. Para Draper e Smith (1998), o método da regressão múltipla por *Stepwise* é o mais recomendado para seleção criteriosa de variáveis independentes em um modelo explicativo. Nas mesmas linhas de seleção de variáveis, existem na literatura outros procedimentos para esse fim, como o *Backward* e o *Forward*, utilizados por Figueiredo Filho (1983) em seu estudo de modelagem matemática para a estimativa volumétrica por unidade de área em uma floresta tropical úmida na Amazônia.

Uma alternativa à aplicação de equações para a estimativa do volume de árvores ou de florestas tem sido o emprego de redes neurais artificiais, que justificam o seu uso devido aos favoráveis resultados gerados e pela economicidade envolvida (SILVA et al., 2009; CAMPOS e LEITE, 2013; BINOTI et al., 2014a). Essa técnica pode ser caracterizada como uma representação bruta da rede de neurônios encontrada no cérebro humano (BINOTI, 2010), consistindo em um sistema de processamento em paralelo constituído de várias unidades de processamento simples (neurônios artificiais) conectadas entre si, que computam funções matemáticas e armazenam conhecimento experimental, tornando-o disponível para uso (BINOTI, 2010; BINOTI et al., 2014b; LIMA, 2014). Alguns estudos têm evidenciado a superioridade dessa técnica em relação às outras mais usuais, como as equações de volume, no entanto, ela envolve um aparato computacional mais complexo.

### 3.5.3. Critérios de seleção dos modelos

Diversos critérios de seleção de modelos de regressão estão disponíveis na literatura, baseados principalmente na diferença gerada entre valores reais e estimados. Dentre os mais utilizados para modelos volumétricos, estão o erro padrão da estimativa e o coeficiente de determinação, além da análise gráfica dos resíduos, do teste  $F$  e do índice de Furnival (FIGUEIREDO FILHO, 1983; GOMES e GARCIA, 1993; MOURA, 1994; DRAPER e SMITH, 1998; ROLIM et al., 2006; SCOLFORO, 2006; HIGUCHI et al., 2008; HIRAMATSU, 2008; SOARES et al., 2011).

O erro padrão da estimativa (Eq. 3.6 e 3.7) é uma medida de precisão que indica o erro médio associado ao uso de uma equação, representando o quão próximo os valores estimados estão dos observados e, assim, quanto menor o seu valor maior será a acuidade da estimativa pela equação, podendo ainda ser calculado em termos absolutos ou relativos (MOURA, 1994;

HIRAMATSU, 2008). O coeficiente de determinação (Eq. 3.8) indica a variabilidade total da variável dependente que é explicada pelas variáveis independentes, por meio da equação de regressão ajustada (DRAPER e SMITH, 1998). Esse coeficiente varia no intervalo de 0 a 1, sendo a variável dependente melhor explicada quanto mais próximo de 1 for o valor de  $R^2$  (HIRAMATSU, 2008). Para comparação de modelos, cujo número de coeficientes ou variáveis é diferente, usualmente utiliza-se o coeficiente de determinação ajustado (Eq. 3.9), que pondera o  $R^2$  pelos graus de liberdade da regressão (GOMES e GARCIA, 1993; MOURA, 1994; HIRAMATSU, 2008). Uma revisão sobre os tipos de coeficiente de determinação aplicados para a avaliação de modelos volumétricos é apresentada por Silva et al. (2008).

$$S_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sqrt{(n-p)}} = \sqrt{\frac{(SQResiduos)}{(n-p)}} \quad \text{Erro Padrão da Estimativa (3.6)}$$

$$S_{yx\%} = \frac{S_{yx}}{\bar{y}} \cdot 100 \quad \text{Erro Padrão da Estimativa Relativo (3.7)}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \frac{SQRegressão}{SQTotais} \quad \text{Coeficiente de Determinação (3.8)}$$

$$R_{aj.}^2 = 1 - \left[ (1 - R^2) \left( \frac{n-1}{n-p-1} \right) \right] \quad \text{Coeficiente de Determinação Ajustado (3.9)}$$

Em que:  $S_{yx}$  = erro padrão da estimativa;  $S_{yx\%}$  = erro padrão da estimativa em porcentagem;  $R^2$  = coeficiente de determinação;  $R_{aj.}^2$  = coeficiente de determinação ajustado;  $y_i$  = valor real observado;  $\hat{y}_i$  = valor estimado pelo modelo;  $n$  = número de observações;  $p$  = número de coeficientes do modelo;  $\bar{y}$  = média dos valores observados da variável dependente;  $SQRes$  = soma dos quadrados dos resíduos;  $SQReg$  = soma dos quadrados da regressão; e  $SQTotais$  = soma dos quadrados totais.

De acordo com Meyer (1938), estimativas volumétricas com uso de equações logarítmicas geram erros sistemáticos definidos como discrepâncias logarítmicas, que ocorrem devido à aplicação do *antilog* na variável dependente estimada pela equação, correspondente à média geométrica dos valores e não a média aritmética, gerando erros de subestimativa (FIGUEIREDO FILHO, 1983). O erro advindo da discrepância logarítmica

pode ser corrigido por meio do fator de correção de Meyer (Eq. 3.10), que ajusta a média geométrica para a aritmética, a partir de sua multiplicação pelo valor do volume individual de todas as árvores presentes na amostra (HIRAMATSU, 2008; MACHADO et al., 2008).

$$FM = e^{0,5 \cdot (S_{yx})^2} \quad \text{Fator de Correção de Meyer (3.10)}$$

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

A análise gráfica dos resíduos (Eq. 3.11), embora sendo um exame subjetivo, indica a qualidade de um ajuste, pois permite concluir se o ajuste foi adequado ao longo de toda linha de regressão, se há tendenciosidade aparente, se os resíduos são independentes e se há problemas de heterocedasticidade da variância (ALDER, 1980; FIGUEIREDO FILHO, 1983; HIRAMATSU, 2008). De acordo com Draper e Smith (1998), a utilização dos resíduos em sua forma relativa, em função da unidade de medida da variável dependente, é a mais adequada para o dimensionamento das sub ou superestimativas em relação ao valor real, permitindo a comparação entre diversos modelos ajustados. Essa análise deve ser determinante na escolha do modelo de regressão, mesmo que os demais critérios estatísticos indiquem a seleção de outro modelo.

$$Res \% = \left( \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right) \cdot 100 \quad \text{Resíduos relativos (3.11)}$$

Para a comparação de modelos logarítmicos com aritméticos, é necessária a transformação do erro padrão da estimativa para escala original da variável dependente, em que uma das formas é por meio do Índice de Furnival (IF), apresentado na Eq. 3.12 (GOMES e GARCIA, 1993; ROLIM et al., 2006). Além disso, sendo amplamente utilizado em diversas análises estatísticas, o teste  $F$  de Graybill avalia a significância de um determinado ajuste em um nível de probabilidade específico, verificando, assim, a validade das estimativas pelos modelos volumétricos (ROLIM et al., 2006; THAINES et al., 2010).

$$IF = \exp \left( \frac{\sum_{i=1}^n \ln(y_i)}{n} \right) \cdot S_{yx} \quad \text{Índice de Furnival (3.12)}$$

Uma recomendação de diversos autores em processos de ajuste e seleção de modelos volumétricos para espécies arbóreas é a etapa de validação da equação selecionada, por meio da separação de uma amostra independente de árvores cubadas (PRODAN, 1997; MACHADO et al., 2008a). Para a validação, estima-se o volume da amostra independente, por meio da equação selecionada, e compara-se com o volume real obtido na cubagem. Para isso, pode ser aplicado o erro padrão da estimativa (Eq. 3.6 e 3.7) e o teste de aderência Qui-quadrado (Eq. 3.13), estabelecendo um nível de confiança para verificar a existência de diferenças significativas entre os valores reais e estimados (MACHADO et al., 2008a; MACHADO et al., 2008b).

$$x^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{\hat{y}_i} \quad \text{Qui-quadrado calculado (3.13)}$$

A identidade dos modelos volumétricos pode ser avaliada pelo teste estatístico proposto por Graybill (1976), que verifica a existência de diferenças entre as equações ajustadas para cada situação específica e para todo conjunto de dados (MACHADO et al., 2015). Nesse teste, a redução da soma do quadrado da regressão possibilita aceitar ou rejeitar uma hipótese estatística, permitindo avaliar o comportamento de variáveis de interesse para condições específicas. O teste de identidade de Graybill pode ainda ser usado na tentativa de agrupar classes de idade e possibilitar o emprego de um menor número de modelos, simplificando o processo de estimativa volumétrica. Na área florestal, esse teste é utilizado para testar a identidade de uma série de modelos matemáticos, como de funções de afilamento, relações hipsométricas e, principalmente, curvas de índice de sítio (QUEIROZ et al., 2008).

Por meio do teste  $F$ , a significância da diferença entre o total das somas dos quadrados das regressões ajustadas é verificada para cada caso individualmente (modelo completo) e para todo o conjunto de dados (modelo reduzido). Partindo da hipótese de nulidade ( $H_0$ ), em que o modelo reduzido não apresenta diferença entre os modelos completos, a não rejeição dessa hipótese permite concluir que há significância para um determinado nível de probabilidade e, com isso, é indicado que as equações não diferem significativamente entre si, possibilitando ajustar apenas uma para representar o conjunto de dados (MACHADO et al., 2015). Os cálculos das somas dos quadrados do modelo completo e reduzido são apresentados no quadro de análise de variância da Tabela 3.1.

TABELA 3.1 - QUADRO ESQUEMÁTICO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O TESTE DE IDENTIDADE DE GRAYBILL

Fontes de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Modelo Completo	(C*p)	$SQ_{(completo)}$		
Modelo Reduzido	p	$SQ_{(reduzido)}$		
Redução ( $H_0$ )	(C-1)p	$SQ_{(completo)} - SQ_{(reduzido)}$	$SQ_{(redução)} / GL_{(redução)}$	$QM_{(redução)} / QM_{(resíduo)}$
Resíduos	N-(C*p)	$SQ_{(total)} - SQ_{(completo)}$	$SQ_{(resíduo)} / GL_{(resíduo)}$	
Total	N	$SQ_{(total)}$		

Em que: G.L. = grau de liberdade; S.Q. = soma dos quadrados dos resíduos; Q.M. = quadrado médio; F = teste F; C = número de classes; p = número de parâmetros do modelo reduzido; e N = número de observações do modelo completo.

### 3.6. PREDIÇÃO DA PRODUÇÃO EM FLORESTAS TROPICAIS

O termo predição deriva do latim *praedictio* e se refere à antecipação de algo que supostamente está implícito ou que irá acontecer, de acordo com a análise das condições presentes. Na área florestal, essa palavra é comumente utilizada de forma errônea como sinônimo de projeção e prognose, uma vez que na projeção os parâmetros da distribuição estatística são correlacionados com os parâmetros da floresta, ao passo que na prognose os parâmetros são estimados em função de observações em idades anteriores (CLUTTER et al., 1983; LEITE et al., 2013). Scolforo (2006) citou que o termo predição presente não envolve a projeção da densidade, se diferenciando, portanto, da predição futura.

#### 3.6.1. Modelos de Crescimento e Produção Florestal

Uma maneira lógica de expressar o crescimento e a produção florestal é por meio de um modelo, que pode representar diferentes sistemas silviculturais em diversos níveis de complexidade matemática (SCOLFORO, 2006). A área florestal tem longa tradição no uso de métodos quantitativos e de modelagem, sobretudo no inventário, manejo e crescimento florestal, fundamentando a prognose de recursos futuros, a escolha de alternativas silviculturais e apoiando a tomada de decisão no manejo e na política florestal (SPATHELF e NUTTO, 2000; PENG et al., 2002). Nas florestas homogêneas e nos plantios puros, existe vasta experiência quanto as técnicas de modelagem (CLUTTER et al., 1983), enquanto nas florestas tropicais inequidêneas e heterogêneas, em razão de sua complexidade e diversidade,

esses modelos ainda são escassos. Para as florestas brasileiras, destacam-se os trabalhos desenvolvidos por: Silva et al. (1995); Scolforo et al. (1996); Resende (2002); Phillips et al. (2004); Rossi et al. (2007); Chassot (2009); Cunha (2009; 2013) e Nascimento et al. (2013; 2014).

Diversas classificações são adotadas para os modelos de crescimento e produção florestal, estando disponível uma ampla gama de literaturas sobre o tema (VANCLAY, 1994; PENG, 2000; BURKHART e TOMÉ, 2012). As principais classificações consideram o nível de abrangência e o tipo de abordagem, sendo utilizados de acordo com as necessidades do gestor florestal e com o banco de dados disponível sobre a dinâmica de crescimento da floresta. Por fim, a escolha de um tipo de modelo de crescimento e produção ou do enfoque da modelagem depende diretamente dos objetivos e dos dados disponíveis (CAMPOS e LEITE, 2013), sendo a complexidade matemática, o nível de interação entre os diferentes atributos da floresta, bem como o propósito de cada categoria de modelo, determinados pela finalidade a que se destinam.

### 3.6.2. Variáveis para Modelos de Crescimento e Produção Florestal

A modelagem do crescimento e da produção florestal busca prognosticar a produção volumétrica, em função de uma série de variáveis possíveis de serem quantificadas na floresta (SCOLFORO, 2006). A natureza dos componentes de cada modelo depende principalmente do tipo de floresta e da abordagem utilizada na modelagem, em que a escolha das variáveis não deve ser fundamentada na existência de correlação com o crescimento e a produção florestal, garantindo previsões realistas em diversas condições (VANCLAY, 1994).

De acordo com Vanclay (1994), a compreensão dos fenômenos e dos processos biológicos que afeta o crescimento da floresta pode ajudar a formular hipóteses e a selecionar variáveis potencialmente explicativas e úteis para o desenvolvimento de modelos. Dentre as principais variáveis de modelos de crescimento e produção, se destacam a idade, a qualidade do sítio e a densidade (CLUTTER et al., 1983; CAMPOS e LEITE, 2013; BATISTA et al., 2014). Para os modelos mais detalhados, como os por classe diamétrica e por árvore individual, é necessário a inserção de variáveis mais específicas, como os diâmetros mínimo e máximo, o diâmetro médio quadrático, a amplitude diamétrica, os índices de competição e até algumas variáveis ambientais quando os modelos contemplam seus efeitos (SCOLFORO, 2006).

A idade é citada como a primeira variável independente em estudos de crescimento e produção florestal em povoamentos equiâneos, refletindo a definição implícita desses fatores no tempo (SCOLFORO, 2006). Tradicionalmente, o sítio tem sido empregado como a segunda variável em estudos dessa natureza, sendo definido para fins de manejo como o conjunto de fatores ecológicos que influem o desenvolvimento de uma determinada espécie em um local específico (SCOLFORO, 2006). Enquanto a densidade fornece um diagnóstico de ocupação de um povoamento ou floresta (CLUTTER et al., 1983), utilizada basicamente para explicitar a produção acumulada por área ou indiretamente aludir a competição.

No entanto, as variáveis idade e qualidade de sítio limitam-se aos estudos de florestas equiâneas e homogêneas (BATISTA et al., 2014). Em florestas tropicais naturais, a idade e o sítio são variáveis de difícil obtenção (FIGUEIREDO FILHO, 1983), inviabilizando o uso dessas em modelos de crescimento e produção florestal. Com isso, surge a necessidade do desenvolvimento de modelos específicos para as florestas tropicais, que considerem variáveis mensuráveis no processo de inventário florestal e que possuam correlação com a capacidade produtiva e a produção dessas florestas, gerando estimativas mais realistas do crescimento e produção.

De acordo com Scolforo (2006), embora pouco considerada em modelos de produção, a variância dos diâmetros contribui para o melhor desempenho do sistema, uma vez que se apresenta como uma boa indicadora da uniformidade do povoamento. Nascimento (2012), com a finalidade de classificar a produção florestal de diferentes regimes de manejo em uma floresta tropical de terra firme na Amazônia, propôs o Índice de Variação Diamétrica de Espécies Pioneiras como uma nova variável para a modelagem de florestas multiâneas e heterogêneas. Sua proposição está concisamente fundamentada em teorias de sucessão e dinâmica de florestas tropicais, surgindo como uma importante ferramenta para a modelagem das florestas naturais no Brasil.

No bojo da demanda pelo aprimoramento das técnicas de modelagem para estudo da dinâmica de crescimento em florestas tropicais, novas variáveis devem ser continuamente inseridas nos modelos de produção. Para isso, elas devem atender ao requisito de se correlacionar com a produção florestal e de serem mensuradas em inventários florestais para fins de manejo, como a distribuição espacial de espécies de interesse, os padrões de distribuição diamétrica das espécies e da floresta, as classificações ecológicas das principais espécies e os índices de competição espaciais e não espaciais, além de outros relacionados com a estrutura horizontal e vertical das florestas e de seus compartimentos.

### 3.6.3. Predição da Produção Florestal

A produção nas florestas tropicais é afetada por uma série de fatores, como a intensidade luminosa, as condições climáticas, a capacidade produtiva dos sítios, as características genéticas e ecológicas das espécies, a competição inter e intraespecífica (KIRA, 1969; WHITTAKER e MARKS, 1975; MACHADO, 1977; CLAWSON, 1979; HERRERA et al., 1999; BATISTA et al., 2014; BONTEMPS e BOURIAUD, 2014), além de diversos outros cuja mensuração se torna mais complexa. Comparando a produção em diversas tipologias florestais e regiões do mundo, Machado (1977) citou que as florestas tropicais apresentam produção bruta superior às temperadas. No entanto, quando se considera a produção de madeira utilizável, as florestas temperadas apresentam vantagem, devido principalmente à homogeneidade estrutural.

Conforme explicado no início deste tópico, o termo predição da produção refere-se à correlação de parâmetros de distribuições estatísticas com atributos da floresta usualmente mensurados nos inventários florestais, permitindo a estimativa direta da produção florestal em volume ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ). Os modelos ou teorias que predizem a produção em ecossistemas são de fundamental importância para os estudos e investigações ecológicas (DOWNING e WEBER, 1984), principalmente quando objetiva-se o manejo sustentado dos recursos. Para Batista et al. (2014), a predição dos atributos de uma árvore é realizada por meio de modelos essencialmente empíricos, que podem ser desenvolvidos e aplicados com base nas informações obtidas pela mensuração de atributos de fácil obtenção.

Nesse contexto, dois aspectos são muito importantes quanto à predição da produção: 1) os modelos preditivos podem tornar os procedimentos de mensuração mais eficientes, no sentido de obter informações precisas e de baixo custo, sobre as florestas; e 2) as informações provenientes dos modelos de predição são complementares àquelas obtidas nos levantamentos florestais, sendo ambas necessárias ao manejo das florestas (BATISTA et al., 2014). Para Figueiredo Filho (1983), as equações de volume para o povoamento excluem a necessidade de avaliação do volume individual de cada árvore, apresentando como vantagem a redução considerável do tempo despendido para medições em campo, principalmente de cubagem das árvores, além de simplificar os trabalhos de processamento de dados, tornando os custos mais acessíveis aos níveis de precisão aceitáveis. Brandeis et al. (2006) enfatizaram que o desenvolvimento dessas equações preditivas é um meio de melhorar as estimativas e predições, encontrando resultados satisfatórios em florestas subtropicais de Porto Rico.

No entanto, a modelagem da produção florestal apresenta algumas dificuldades, pois é afetada por diversos fatores, como: variáveis ambientais, precipitação, intensidade de radiação solar, evapotranspiração, duração da estação de crescimento, disponibilidade de nutrientes, fatores bióticos, idade da floresta, densidade de indivíduos arbóreos, além dos fatores específicos de sítio (WHITTAKER, 1966; WHITTAKER e MARKS, 1975; CLAWSON, 1979; HERRERA et al., 1999).

Downing e Weber (1984) citaram o Modelo de Miami (Eq. 3.14), que prediz a produção da vegetação terrestre em função das variáveis: temperatura média anual e precipitação anual total. Em seu estudo, esses autores propuseram novas equações para predição, avaliando o efeito da inserção das variáveis idade e biomassa florestal presente. Jiang et al. (1999), ao modelarem os padrões espaciais da produtividade primária em florestas chinesas, utilizaram três modelos empíricos, dentre eles o Modelo de Miami. Esses autores concluíram que os padrões espaciais de produtividade das florestas chinesas são resultados de suas interações com os padrões de uso da terra e das atividades antrópicas, além de dependerem dos fatores ambientais locais, os quais citaram os resultados realistas advindos da aplicação do modelo.

$$PPL = 3000 \cdot (1 - e^{-0,000664 \cdot R}) \quad \text{Modelo de Miami (3.14)}$$

$$PPL = 3000 / (1 + e^{1,315 - 0,119 \cdot T})$$

Em que:  $PPL$  = produção primária líquida;  $R$  = precipitação anual;  $T$  = temperatura média anual; e  $e$  = constate de Euler (2,718281...).

Clark et al. (2001), ao estudarem a produção primária em floresta tropicais, encontraram uma boa relação preditiva entre a produção anual de serapilheira e o incremento de biomassa acima do nível do solo. Para as condições de complexidade e diversidade da floresta amazônica, esses modelos se mostraram insuficientes, sendo necessária a inserção de variáveis específicas sobre as condições locais, estrutura e aspectos ecológicos da floresta alvo do estudo.

Spurr (1951), ao testar vários modelos para volume por unidade de área em função de atributos estruturais e dendrométricos da floresta, identificou a variável área basal ( $m^2 \text{ ha}^{-1}$ ) como a mais fortemente correlacionada com o volume total. Esse autor mencionou que a adição da idade e do sítio trouxe pouco ganho de precisão ao modelo, sendo o melhor

composto pelas variáveis independentes área basal ( $G$ ) e altura dominante ( $h_{dom}$ ). Posteriormente, esse modelo foi denominado de fórmula Australiana (Eq. 3.15), sendo modificada por alguns autores para condições específicas (FIGUEIREDO FILHO, 1983).

$$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot G + \beta_2 \cdot h_{dom} + \beta_3 \cdot G \cdot h_{dom} \quad \text{Fórmula Australiana (3.15)}$$

Em que:  $V$  = volume total por unidade de área;  $G$  = área basal total por unidade de área;  $h_{dom}$  = altura dominante; e  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  e  $\beta_3$  = parâmetros dos modelos a serem estimados.

Nas florestas tropicais brasileiras, esse tema foi abordado no trabalho de Figueiredo Filho (1983), onde foram descritos diversos modelos de predição da produção para florestas no mundo, bem como as possíveis variáveis a serem empregadas. Em seu estudo, esse autor avaliou modelos matemáticos para estimativa direta do volume por unidade de área, por meio de variáveis de fácil obtenção, em uma Floresta Tropical Úmida na Amazônia brasileira, propondo uma alternativa ao método clássico de avaliação individual do volume das árvores existentes. Como resultado, o melhor modelo foi construído com base no produto do quadrado da área basal pela altura média (Eq. 3.16), gerando erros inferiores a 5%.

$$\log V = \beta_0 + \beta_1 \cdot \log G^2 \cdot H \quad \text{Fórmula de Figueiredo Filho (3.16)}$$

Em que:  $\log$  = logarítmico;  $V$  = volume total por unidade de área;  $G$  = área basal total por unidade de área;  $H$  = altura média; e  $\beta_0$  e  $\beta_1$  = parâmetros dos modelos a serem estimados.

A estrutura complexa das florestas inequidâneas, heterogêneas e compostas por várias espécies, torna a construção de modelos uma tarefa mais complexa, demandando maior conhecimento matemático e estatístico. Além disso, a grande diversidade de espécies nas florestas tropicais faz com que sua composição seja muito variável, mesmo dentre populações em uma mesma floresta. Assim, para esse tipo de abordagem, recomenda-se a formação de grupos de espécies conforme uma classificação ecológica ou interesse comercial (BATISTA et al., 2014).

### 3.7. AGRUPAMENTO DE DADOS EM FLORESTAS TROPICAIS

A gestão, a conservação e a compreensão teórica das florestas tropicais estão diretamente relacionadas com a interpretação dos dados coletados sobre elas (PHILLIPS et al., 2002). Os estudos sobre formações florestais tropicais geram bancos de dados extensos e com grande variabilidade e, conseqüentemente, com elevados erros de amostragem e de estimativa, sendo necessária a estratificação em grupos mais homogêneos e uniformes. Outra vantagem do agrupamento de dados é a redução do tempo de computação e ajuste de modelos (BATISTA, 1989). Na literatura florestal, diversos métodos e técnicas de agrupamento e estratificação de dados são citados, com destaque aos trabalhos realizados por: Vanclay (1991), Péllico Netto e Sanquetta (1994), Phillips et al. (2002), Akindele e LeMay (2006) e Souza e Souza (2006).

### 3.7.1. Métodos de Estratificação

Os métodos de estratificação são amplamente empregados na área florestal, principalmente em inventários e estudos sobre a estrutura de comunidades. Para Péllico Netto e Sanquetta (1994), a estratificação de populações florestais constitui parte relevante dos inventários florestais contínuos, sendo a redução da variação dentro dos estratos ou subpopulações o principal propósito, aumentando a precisão dos estimadores estatísticos. Esses autores propuseram uma forma de determinar o número adequado de estratos em reflorestamentos e florestas naturais, considerando o estoque volumétrico.

A estratificação vertical das florestas naturais é alvo de diversos trabalhos como: Calegário et al. (1994), Sanquetta et al. (2002), Souza et al. (2003), Curto et al. (2013) e Souza e Soares (2013). Esses autores destacaram a importância de seus estudos ao citarem inúmeras utilidades, como: identificação do comportamento ecológico e hábito das populações, maior compreensão do processo sucessional e da dinâmica da floresta e das espécies que a compõem. Curto et al. (2013) mencionaram que, apesar da disponibilidade de vários métodos, a diferenciação segura dos estratos em uma comunidade florestal com base estatística ainda é um desafio.

Outro emprego comum de métodos de estratificação são os estudos de distribuição diamétrica, que utilizam valores empíricos ou se apoiam em fórmulas matemáticas para a definição do número e da amplitude adequados de classes, de acordo com características da amostra. Para esse fim, a fórmula mais difundida tem sido a de Sturges (Eq. 3.17, 3.18 e 3.19):

$$K = 1 + 3,3 \text{ Log}N \quad (3.17)$$

$$IC = A/K \quad (3.18)$$

$$A = d_{max} - d_{min} \quad (3.19)$$

Em que:  $K$  = número de classes;  $N$  = número total de indivíduos;  $IC$  = intervalo de classe;  $A$  = amplitude diamétrica total; e  $d_{max}$  e  $d_{min}$  = diâmetros máximo e mínimo.

### 3.7.2. Análise de Agrupamento

Segundo Souza e Souza (2006), as técnicas estatísticas multivariadas têm sido amplamente empregadas em estudos que envolvem simultaneamente variáveis, como: clima, solo, relevo, vegetação e geologia, na classificação de áreas florestais, visando principalmente o ordenamento. Para Chuman e Romportl (2010), essas técnicas geram classificações objetivas, excluindo os aspectos subjetivos existentes em outros métodos de ordenamento.

Dentre as técnicas de estatística multivariada, as análises de agrupamento, ou *cluster analysis*, apresentam grande aptidão para estudos de classificação de dados florestais. Nessas análises, os objetos analisados são interligados por meio de uma hierarquia de níveis, onde os mais semelhantes se unem formando grupos e subgrupos, até que todos os objetos estejam unidos, sendo a distância existente entre os objetos e os grupos reflexo da maior ou da menor similaridade (LEPS e SMILAUER, 1999). Esses métodos são encontrados na literatura florestal para diversas aplicações, como: Phillips et al. (2002), que agruparam espécies arbóreas quanto ao crescimento e produção, em florestas tropicais mistas em Kalimantan na Indonésia; Akindele e LeMay (2006), que agruparam espécies comerciais para o desenvolvimento de equações de volume em florestas tropicais na Nigéria; e Souza e Souza (2006), que propuseram uma forma de estratificar o estoque volumétrico de uma Floresta Ombrófila Densa de Terra Firme na Amazônia Oriental.

### 3.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos de volume comercial e de predição da produção por unidade de área são importantes ferramentas para a quantificação do potencial madeireiro das florestas, para a avaliação e a classificação de terras em florestas naturais quanto à produtividade e para a

definição de unidades de produção e de colheita. As estimativas geradas por esses modelos podem fundamentar as licitações das florestas destinadas à concessão por meio da avaliação de seu potencial madeireiro, de forma que os interessados possam fazer suas ofertas. Logo, novos estudos focados na implementação de estratégias de modelagem do volume e da produção para as florestas tropicais naturais são necessários, visando a obtenção de estimativas precisas a um baixo custo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SABER, A. N. The Paleoclimate and Paleoecology of Brazilian Amazonia. In: PRANCE, G.T. (ed.) **Biological diversification in the tropics** (Nova York: Columbia University Press), p. 41-59. 1982.

ALDER, D. **Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento com referencia especial a los trópicos**. Estudios FAO Montes. Roma, Itália. 1980. 118 p.

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

AMATA. **Plano Operacional Anual 03**. Unidade de Manejo Florestal III – Floresta Nacional do Jamari, Unidade de Produção Anual 03 – 2012/2013. 2013. 312 p.

ARIMA, E.; BARRETO, P. **Rentabilidade da produção de madeira em terras públicas e privadas na região de cinco florestas nacionais da Amazônia**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2002. 49p.

ATTA BOATENG, J.; MOSER, J. W. Growth and yield model application in tropical rain forest management. In: **Integrated tool for natural resources inventories in the 21st century**; Boise: USDA, p. 473 - 480. 2000.

AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. **Forest measurements**. New York: McGraw-Hill, 1994. 408 p.

AZEVEDO, C. P. **Dinâmica de florestas submetidas a manejo na Amazônia Ocidental: experimentação e simulação**. 2006. 234 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná.

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

AZEVEDO, C. P.; SANQUETTA, C. R.; SILVA, J. N. M.; MACHADO, S. A.; SOUZA, C. R.; OLIVEIRA, M. M. Simulação de estratégias de manejo florestal na Amazônia com o uso do modelo SYMFOR. **Acta Amazonica**, v. 38, n.1, p. 51 – 70. 2008.

BAIMA, A. V.; SILVA, S. M. S.; SILVA, J. N. M. Equações de volume para floresta tropical de terra firme em Moju, PA. In: SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P.; YARED, J. A. G. (eds). **A Silvicultura na Amazônia Oriental: contribuições do projeto silvicultura tropical** (Embrapa/DFID). Vol. 2. Embrapa Amazônia Oriental, Belém. p. 367-392. 2001.

BARBOSA, A. D.; SALUM, M. R.; ALMEIDA, C. A.; VALERIANO, D. M. Identificação multitemporal da exploração seletiva de madeira na Floresta Nacional do Jamari – RO. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 5625 – 5632. 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 Anapu, Pará. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 80, p. 321 – 329, 2014.

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

BATISTA, J. L. F. **A função Weibull como modelo para a distribuição de diâmetros de espécies arbóreas tropicais**. 1989. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo, Piracicaba.

BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z.; SILVA FILHO, D. F. **Quantificação de recursos florestais: árvores, arvoredos e florestas**. 1º Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 384p.

BIGARELLA, J. J.; FERREIRA, A. M. M. Amazonian geology and the Pleistocene and the Cenozoic environments and paleoclimates. In: PRANCE, G. T. e LOVEJOY, T. E. (eds.). *Amazonia Pergamon*, p. 49 – 71. 1985.

BINOTI, M. L. M. S. **Redes neurais artificiais para prognose da produção de povoamentos não desbastados de eucalipto**. 2010. 54f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG.

BINOTI, M. L. M. S.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G.; GARCIA, S. L. R.; FERREIRA, M. Z.; RODE, R.; SILVA, A. A. L. Redes neurais artificiais para estimação do volume de árvores. **Revista árvore**, v. 38, n. 2, p. 283 – 288, 2014a.

BINOTI, M. L. M. S.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G.; SILVA, A. A. L.; PONTES, C. Redes neurais artificiais para projeção da distribuição diamétrica de povoamentos equiâneos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 283 – 288, 2014b.

BONTEMPS, J. D.; BOURIAUD, O. Predictive approaches to forest site productivity: recent trends, challenges and future perspectives. **Forestry**, v. 87, p. 109 -128, 2014.

BRANDEIS, T. J.; DELANEY, M.; PARRESOL, B. R.; ROYER, L. Development of equations for predicting Puerto Rican subtropical dry forest biomass and volume. **Forest Ecology and Management**, v. 233, p. 133 – 142, 2006.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de Julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 18 de Julho de 2000.

BRASIL. Presidência da República. (2008a). Plano Amazônia Sustentável-PASl: diretrizes para o desenvolvimento sustentável da Amazônia Brasileira. Disponível em: <[www.integracao.gov.br/](http://www.integracao.gov.br/)>. (acesso: 10 jun. 2015).

BRIENEN, R. J. W.; ZUIDEMA, P. A. The use of tree rings in tropical forest management: projecting timber yields of four Bolivian tree species. **Forest Ecology and Management**, v. 226, p. 256–267. 2006.

BURKHART, E. H.; TOMÉ, M. **Modeling Forest Trees and Stands**. Springer, New York, NY, USA. 2012. 458 p.

CALEGÁRIO, N. Estudo da regeneração natural visando à recuperação de áreas degradadas e o manejo florestal. In: SCOLFORO, J. R. S. **Manejo florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE. p. 301 – 303, 1998.

CALEGÁRIO, N.; SCOLFORO, J. R. S.; SOUZA, A. L. Estratificação em alturas para floresta natural heterogênea: uma proposta metodológica. **Cerne**, v. 1, n. 1, p. 58-63. 1994.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 4. ed., atualizada e ampliada. Viçosa-MG, Editora UFV, 2013, 605 p.

CARNEIRO, M. S. Da certificação para as concessões florestais: organizações não governamentais, empresas e a construção de um novo quadro institucional para o desenvolvimento da exploração florestal na Amazônia brasileira. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi de Ciências Humanas**, v. 6, n. 3, p. 525 – 541. 2011.

CAVALCANTI, F. J. B. **Metodologia e sistema computacional para uso múltiplo e integrado de florestas tropicais da Amazônia**. 2007. 139 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná.

CAVALCANTI, F. J. B.; MACHADO, S. A.; HOSOKAWA, R. T. Metodologia para uso múltiplo e integrado de florestas tropicais na Amazônia. **Floresta**, v. 40, n. 2, p. 405-418, 2010.

CLARK, D. A.; BROWN, S.; KICKLIGHTER, D. W.; CHAMBERS, J.; THOMLINSON, J. R.; NI, J.; HOLLAND, E.A. Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. **Ecological Applications**, v. 11, n. 2, p. 371 – 384. 2001.

CLAWSON, M. 1979. Forests in the long sweep of American history. **Science**, v. 204, p. 1168-1174. 1979.

CLUTTER, J.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V. BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: a quantitative approach**. New York, John Wiley e Sons, 1983, 333 p.

CHASSOT, T. **Modelos de crescimento em diâmetro de árvores individuais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze na Floresta Ombrófila Mista**. 2009. 49 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria.

CHUMAN, T.; ROMPORTL, D. Multivariate classification analysis of cultural landscapes: An example from the Czech Republic. **Landscape And Urban Planning**, v. 98, n. 3 – 4, p. 200 – 209, 2010.

COLPINI, C.; TRAVAGIN, D. P.; SOARES, T. S.; SILVA, V. S. M. Determinação do volume, do fator de forma e da porcentagem de casca de árvores individuais em uma Floresta Ombrófila Aberta na região noroeste de Mato Grosso. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 1, p. 97-104, 2009.

COSTA, D. H. M.; SILVA, S. M. A. da; SILVA, J. N. M. Efetividade e custo do desbaste com aplicação de arboricida em floresta natural na região do Tapajós, Pará e Jarí, Amapá. In: SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P. de; YARED, J. A. G. (Ed.) **A silvicultura na Amazônia Oriental: contribuições do projeto Embrapa/DFID**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental/DFID, p.339-352, 2001.

CUNHA, T. A. Modelagem do incremento de árvores individuais de *Cedrela odorata* L. na Floresta Amazônica. 2009. 88 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria.

CUNHA, T. A. **Crescimento de espécies florestais madeiráveis como subsídio para o manejo florestal na Amazônia Ocidental**. 2013. 105 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria.

CURTO, R. A.; SILVA, G. F.; PEZZOPANE, J. E. M.; CHICHORRO, J. F.; MÔRA, R. Métodos de estratificação vertical em floresta estacional semidecidual. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 4, p. 643-654, 2013.

DOWNING, J. A.; WEBER, L. A. The prediction of forest production from inventory and climatic data. **Ecological Modelling**, v. 23, p. 227 – 241, 1984.

DRAPPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3º Ed. New York, EUA:John Wiley e Sons, Inc. 1998. 704 p.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Silvicultural Research in the Amazon**. Roma, 1971. 192 p.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Global Forest Resources Assessment Update 2005: terms and definitions (final version)**. Roma: FAO, 2004. (Working Paper, n. 83/E).

FARRELLY, N.; FEALY, R. M.; RADFORD, T. The use of site factors and site classification methods for the assessment of site quality and forest productivity in Ireland. **Irish Forestry**, n. 6, p. 21-39. 2009.

FEARNSIDE, P. M.; TARDIN, A. T.; MEIRA FILHO, L. G. **Deforestation Rate in Brazilian Amazon**. 1990, 8 p.

FERNANDES, N. P., JARDIM, F. C. S.; HIGUCHI, N. Tabelas de Volume para a Floresta de Terra-firme da Estação Experimental de Silvicultura Tropical. **Acta Amazonica**, v. 13, n. 3/4, p. 537-545, 1983.

FERREIRA, G. C.; HOPKINS, M. J. G. **Manual de Identificação botânica e anatômica – angelim**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2004, 101 p.

FIGUEIREDO FILHO, A. **Estudos de modelos matemáticos para estimar o volume por unidade de área em uma floresta tropical úmida na Amazônia brasileira**. 1983. 176 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

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.

GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. **A determinação de equações volumétricas na Engenharia Florestal**. IPEF Série Técnica, v. 9, n.26, p. 1 -36. 1993.

GRAYBILL, F. A. **Theory and application of the linear model**. Massachusetts: Ouxburg Press, 1976. 704 p.

HEINSDIJK, D.; BASTOS, A. M. **Inventários florestais na Amazônia**. Boletim do Serviço Florestal, v. 6, 1963. 100p.

HENDERSON, A. **The palms of the Amazon**. New York: Oxford University Press, 1995. 232 p.

HERRERA, B.; CAMPOS, J. J.; FINEGAN, B.; ALVARADO, A. Factors affecting site productivity of a Costa Rican secondary rain forest in relation to *Vochysia ferruginea*, a commercially valuable canopy tree species. **Forest Ecology and Management**, v. 118, p. 73 – 81, 1999.

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

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

HIGUCHI, N. Utilização e Manejo de recursos madeireiros das Florestas Tropicais Úmidas. **Acta Amazônica**, v. 24, n. 3/4, p. 275-288, 1994.

HIGUCHI, N.; VIEIRA, G.; MINETTE, L. J.; FREITAS, J. V.; JARDIM, F. C. S. Sistema SEL (Seleção de Espécies Listadas) para Manejar a Floresta Tropical Úmida de Terra-Firme da Amazônia In VAL. A.L.R. FRIGLIOULO e E. FELDBERG (eds). **Bases Científicas para Estratégias de Preservação e Desenvolvimento – Fatos e Perspectivas**, v. 1, p.197-206. 1991.

HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; FREITAS, J. V.; VIEIRA, G.; COIC, A. R.; MINETTE, L. J. Crescimento e incremento de uma floresta Amazônica de terra-firme manejada experimentalmente. In: **Workshop Bionte - Aspectos Silviculturais e ecológicos do Manejo Florestal**, INPA - Manaus- AM. 1997.

HIGUCHI, N.; SANTOS, J. ; TEIXEIRA, L. M.; LIMA, A. J. N. O mercado internacional de madeira tropical está à beira do colapso. **SBPN** (São Paulo), v. 1-2, p. 33-41, 2006.

HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; SILVA, R. P. da; LIMA, A. N.; TEIXEIRA, L. M.; CARNEIRO, V. M. C.; FELSEMBURGH, C. A.; TRIBUZY, E. S. **Noções básicas sobre manejo florestal. Grupo de pesquisas em manejo florestal/INPA**. 2008, 270 p (APOSTILA).

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

HOLMES, T. P.; BLATE, G. M.; ZWEEDE, J. C.; PEREIRA JÚNIOR, R.; BARRETO, P.; BOLTZ, F. **Custos e benefícios financeiros da exploração florestal de impacto reduzido em comparação à exploração florestal convencional na Amazônia Oriental**. Belém: Fundação Floresta Tropical, 2002. 69 p.

HOSOKAWA, R. T. **Manejo de florestas tropicais úmidas em regime de rendimento sustentado**. Curitiba: CNPq/IBDF/UFPR, 1981. 125 p. (Relatório Final).

HOSOKAWA, R. T.; MOURA, J. B.; CUNHA, U. S. **Introdução ao Manejo e Economia de Florestas**. 2ª Reimpressão Atualizada, Curitiba: Ed. UFPR, 2013. 164p.

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

IBAMA/LPF. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Laboratório de Produtos Florestais. **Madeiras das Amazônia Características e Utilização**. V.3 – Amazônia Oriental. 1997 Brasília.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2ª ed. revisada e ampliada. 2012. 271p.

INA. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - Coordenação de Pesquisa em Produtos Florestais – CPPF **Catálogo de Madeiras da Amazônia: Característica Tecnológica; Área da Hidrelétrica de Balbina**, 1º, 1991. Manaus.

ITTO - International Tropical Timber Organization. (2006). **Status of tropical forest management 2005**. Technical Series, n. 24. Available from: <[www.itto.org.jp](http://www.itto.org.jp)>. (acessado em 08/09/2015).

JARDIM, F. C. S. **Comportamento da regeneração natural de espécies arbóreas em diferentes intensidades de desbaste por anelamento**. 1995. 169 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG.

JIANG, H.; APPS, M. J.; ZHANG, Y.; PENG, C.; WOODARD, P. M. Modelling the spatial pattern of net primary productivity in Chinese forests. **Ecological Modelling**, n. 122, p. 275–288. 1999.

KAHN, F.; GRANVILLE, J. J. **Palms in forest ecosystems of amazonian**. Berlin, Heidelberg; New York: Springer Verlag, Ecological Series 95, 1992. 226p.

KIRA, T. Primary productivity in tropical rain forest. **Malaysian Forest**, v. 32, n.4, p. 375 – 384, 1969.

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas – possibilidades e métodos de aproveitamento sustentado**. Eschborn: GTZ, 1990. 343p.

LATTIN, J.; CARROLL, J. D.; GREEN, P. E. **Análise de dados multivariados**. São Paulo: Cengage Learning. 2011. 455 p.

LEITE, F. S.; RESENDE, A. V. Estimativa do volume de madeira partindo do diâmetro da cepa em uma área explorada de floresta amazônica de terra firme. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 1, p. 69-79, 2010.

LEITE, H. G.; ALCÂNTARA, A. E. M.; BINOT, D. H. B.; OLIVEIRA NETO, R. R.; SILVA, M. L. M. Comparação entre predição e projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de Eucalipto submetidos a desbastes. **Revista Arvore**, v. 37, n. 2, p. 321 – 328. 2013.

LENTINI, M.; PEREIRA, D.; CELENTANO, D.; PEREIRA, R. **Fatos florestais da Amazônia 2005**. Belém: Imazon, 2005. 110p.

LEPS, J.; SMILAUER, P. **Multivariate Analysis of Ecological Data**. Faculty of Biological Sciences, University of South Bohemia Ceské Budejovice, 1999. 110 p.

LIMA, A. J. N. **Avaliação de um sistema de inventário florestal contínuo em áreas manejadas e não manejadas do estado do Amazonas (AM)**. 2010. 181 p. Tese (Doutorado em Ciências de Florestas Tropicais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus.

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

LOPES, J. C. A. **Demografia e flutuações temporais da regeneração natural após uma exploração florestal: Flona Tapajós/PA**. 1993. 133p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo.

MACHADO, S. A. Produtividade em Florestas Tropicais. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 8, n. 2, p. 47 – 53, 1977.

MACHADO, S. A.; FIGURA, M. A.; SILVA, L. C. R.; TÉO, S. J.; STOLLE, L.; URBANO, E. Modelagem volumétrica para bracatinga (*Mimosa scabrella*) em povoamentos da Região Metropolitana de Curitiba. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n.56, p. 17-19, 2008a.

MACHADO, S. A.; AGUIAR, L. P.; FIGUEIREDO FILHO, A.; KOEHLER, H. S. Modelagem do volume do povoamento para *Mimosa scabrella* Benth. na região metropolitana de Curitiba. **Revista Árvore**, v. 32, n. 3, p. 465 – 478, 2008b.

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

MACHADO, S. A.; ACCIOLY, Y.; NASCIMENTO, R. G. M.; SILVA, L. C. R.; CARDOZO, C. C. Influência do comprimento de copa na relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 83, p. 343 – 351, 2015. Nota Científica.

MARTINS, S. S.; COUTO, L.; MACHADO, C. C.; SOUZA, A. L. Efeitos da Exploração Seletiva em uma Floresta Estacional Semidecidual. **Revista Árvore**, v.27, n.1, p.65-70, 2003.

MCEVOY, T. J. **Positive impact forestry: a sustainable approach to managing woodlands**. Washington, DC: Island Press, 2004. 268 p.

MEYER, W. H. **Yield of evenage stands of ponderosa pine**. U.S.D.A. Forest Service Technical, Bulletin. Washington D.C, 1938. 630p.

MIRANDA, I. P. A.; RABELO, A. **Guia de Identificação das Palmeiras de Porto de Trombetas – PA**. Manaus: Editora da Universidade Federal do Amazonas, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, 2008, 365p.

MMA/IBAMA. **Plano de Manejo da Floresta Nacional do Jamari**. 2005. 156 p.

MONTEIRO, A. L. S.; CRUZ, D. C.; CARDOSO, D. R. S.; SOUZA JÚNIOR, C. M. Monitoramento remoto de concessões florestais na Amazônia – Floresta Nacional do Jamari, Rondônia. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 6433 – 6440. 2013.

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

MUNIZ, A. L. V.; ESQUERDO, L. N.; RIBEIRO, M. S.; SILVA, M. F. F.; PINHEIRO, K. A. O.; ALVINO, F. A.; ARAÚJO, E. L. S.; CARDOSO-JÚNIOR, R. C. Dinâmica da floresta secundária com e sem tratamento silvicultural para fins de manejo no nordeste paraense. **Amazônia: Ciência e Desenvolvimento**, v. 2, n.4, p. 53 – 65. 2007.

NASCIMENTO, R. G. M. **Modelagem e prognose da produção em uma floresta tropical úmida densa de terra-firme na Amazônia Central**. 2012. 155 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

NASCIMENTO, R. G.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; HIGUCHI, N. Modelo de projeção por classe diamétrica para florestas nativas: enfoque na função probabilística de Weibull. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 70, p. 209- 219. 2012.

NASCIMENTO, R. G. M.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; HIGUCHI, N. Modelagem da sobrevivência, mortalidade e recrutamento de uma floresta na Amazônia Central. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 319 – 330. 2013.

NASCIMENTO, R. G. M.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; HIGUCHI, N. A growth and yield projection system for a tropical rainforest in the Central Amazon, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 327, p. 201-208, 2014.

OLIVEIRA, L. C. **Efeito da exploração da madeira e de diferentes intensidades de desbastes sobre a dinâmica da vegetação de uma área de 136 ha na Floresta Nacional do Tapajós**. Piracicaba, 2005. 195 p. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

PÉLLICO NETTO, S.; SANQUETTA, C. R. Determinação do número de estratos em estratificação volumétrica de florestas naturais e plantadas. **Floresta**, v. 24, n. 1/2, p. 49 – 58, 1994.

PENG, C. Growth and yield models for uneven-aged stands: past, present and future. **Forest Ecology and Management**, v. 132, n. 1-3, p. 259 – 279. 2000.

PENG, C.; LIU, J.; DANG, Q.; APPS, M. J.; JIANG, H. TRIPLEX: a generic hybrid model for predicting forest growth and carbon and nitrogen dynamics. **Ecological Modelling**, n. 153, p. 109 – 130. 2002.

PHILLIPS, P.D.; YASMAN, I.; BRASH, T.E.; van GARDINGEN, P. R. Grouping tree species for analysis of forest data in Kalimantan (Indonesian Borneo). **Forest Ecology and Management**, n. 157, p. 205–216. 2002.

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.

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. **Mensura forestal**. San José, Costa Rica. GTZ, IICA. 1997, 586 p.

PUIG, H. **Floresta Tropical Úmida**; tradução de Maria Leonor Frederico Rodrigues Loureiro. Universidade Estadual Paulista, São Paulo; Imprensa Oficial do estado de São Paulo, São Paulo; Institut de Recherche pour le Développement, França, 2008, 496p.

QUEIROZ, D.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E.; KOEHLER, H. S. Identidade de modelos em funções de afilamento para *Mimosa scabrella* Benth em povoamentos nativos da região metropolitana de Curitiba/PR. **Floresta**, v. 38, n. 2, p. 339 – 349. 2008.

QUEVEDO, L. **Principales sistemas silviculturales empleados em los bosques naturales tropicales**. Santa Cruz de la Sierra: UAGRM, 1990. 25p.

RADAMBRASIL. **Levantamento de Recursos Naturais**. Rio de Janeiro. 1988. 644p

RANGEL, M. S.; CALEGARIO, N.; MELLO, A. A.; LEMOS, P. C. Melhoria na Prescrição do Manejo para Floresta Natural. Lavras: **Cerne**, v. 12, n. 2, p. 145 – 156, 2006.

REZENDE, A.V. **Diversidade, estrutura, dinâmica e prognose do crescimento de um cerrado sensu stricto submetido a diferentes distúrbios por desmatamento.** 2002. 243p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002

RIBEIRO, J. E. L da S.; HOPKINS, M. J. G.; VICENTINI, A.; SOTHERS, C. A.; COSTA, M. A. da S.; BRITO, J. M. de; SOUZA, M. A. D. de; MARTINS, L. H. P.; LOHMANN, L. G.; ASSUNÇÃO, P. A. C. L.; PEREIRA, E. da C.; SILVA, C. F. da; MESQUITA, M. R.; PROCÓPIO, L. C. **Flora da Reserva Ducke: guia de identificação das plantas vasculares de uma floresta de terra-firme na Amazônia Central.** Manaus: INPA. 1999, 816 p.

RIZZINI, C.T. **Árvores e Madeiras Úteis do Brasil – Manual de Dendrologia Brasileira.** – 2.ed. – São Paulo. Edgard Blucher Ltda, 1990. 296 p.

ROLIM, S. G.; COUTO, H. T. Z.; JESUS, R. M.; FRANÇA, J. T. Modelos volumétricos para a Floresta Nacional do Taipé-Aquirí, Serra dos Carajás. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 36, n. 1, p. 106-114, 2006.

ROMA, J. C.; ANDRADE, A. L. C. Economia, Concessões Florestais e a Exploração Sustentável de Madeira. IPEA, **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, n. 8, p 91 – 96. 2013.

ROSOT, M. A. D. Manejo florestal de uso múltiplo: uma alternativa contra a extinção da floresta com Araucária? **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n. 55, p. 75-85, 2007.

ROSSI, L. M. B.; KOHELER, H. S.; SANQUETA, C. R.; ARCE, J. E. Modelagem de mortalidade em florestas naturais. **Floresta**, v. 37, n. 2, p. 275–291. 2007.

ROTHERMEL, H. S. **Economía del manejo sustentable: una alternativa para el bosque nativo.** Ediciones Universidad Mayor, Serie Libros, 2002, 173 p.

SANQUETTA, C.R. 1996. **Fundamentos biométricos dos modelos de simulação florestal.** Brasil. FUPEF, 1996. 49p.

SANQUETTA, C. R. PIZATTO, W.; PÉLLICO NETTO, S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; EISFELD, R. L. Estrutura vertical de um fragmento de floresta Ombrófila Mista no Centro-sul do Paraná. **Floresta**, v. 32, n. 2, p. 267-276, 2002.

SCHULZE, M.; GROGAN, J. e VIDAL, E. O manejo florestal como estratégia de conservação e desenvolvimento socioeconômico na Amazônia: quanto separa os sistemas de exploração madeireira atuais do conceito de manejo florestal sustentável? In: BENSUNSAN, N. e ARMSTRONG, G. (Org.). **O manejo da paisagem e a paisagem do manejo.** Brasília: Instituto Internacional de Educação do Brasil. p.161-213, 2008.

SCOLFORO, J. R. S.; PULZ, F. A.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA FILHO, A. T. Modelo de produção para floresta nativa como base para manejo sustentado. **Cerne**, v. 2, n.1, p. 112 – 137. 1996.

SCOLFORO, J. R. S. **Manejo florestal.** Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 110 p.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal: modelos de crescimento e produção florestal**. Lavras, MG: UFLA/FAEPE, 2006, 393 p.

SFB - SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. (2007). **Plano anual de outorga florestal 2007-2008**. Brasília. Disponível em: <www.sfb.gov.br>. (acesso: maio 2015).

SFB - SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. (2015). **Lei 11.184/06**, que dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável. Disponível em: <www.sfb.gov.br>. (acesso: setembro de 2015).

SILVA, J. N. M. **The behaviour of the tropical rain Forest of the Brazilian Amazon after logging**. 1989. 302 p. Tese (Doutorado) – Oxford University.

SILVA, J. N. M.; CARVALHO, M. S. P. DE. Equações de volume para uma floresta secundária no planalto do Tapajós, Belterra, Pará. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 8 / 9, p. 26 - 34. 1984.

SILVA, J. N. M.; ARAÚJO, S. M. A. Equação de volume para árvores de pequeno diâmetro na Floresta Nacional do Tapajós. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 8/9, p. 16-25. 1984.

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

SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P.; LOPES, J. C. A.; ALMEIDA, B. F.; COSTA, D. H.; OLIVEIRA, L. C.; VANCLAY, J. K.; SKOVSGAARD, J. P. Growth and yield of a tropical rain forest in the Brazilian Amazon 13 years after logging. **Forest Ecology and Management**, v. 71, n. 3, p. 267-274. 1995.

SILVA, E. J. V. **Dinâmica de florestas manejadas e sob exploração convencional na Amazônia oriental**. 2004. 171p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Universidade de São Paulo.

SILVA, G. F.; LEITE, V. R.; CURTO, R. A.; MORA, R.; MARTINS, L. T.; SANTOS, E. M.; SOARES, C. P. B. Cuidados com o uso de coeficiente de determinação na análise do ajuste de modelos volumétricos. In: 4º Simpósio Latino-americano sobre Manejo Florestal. **Anais do Simpósio Latino-americano sobre Manejo Florestal**, Santa Maria, RS. 2008.

SILVA, K. E.; RIBEIRO, C. A. A. S.; MARTINS, S. V.; SANTOS, N. T. Concessões de florestas públicas na Amazônia: desafios para o uso sustentável dos recursos florestais. **Bioikos**, v. 23, n. 2, p. 91 – 102, 2009.

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

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A.L. **Dendrometria e inventário florestal**. 2<sup>ed</sup>. Viçosa, MG: Editora UFV, 2011. 272p.

SOUZA, A. L.; JARDIM, F. C.S. **Sistemas silviculturais aplicados às florestas tropicais**. Viçosa, SIF, 1993. 126 p.

SOUZA, A. L.; SOUZA, D. R. Análise multivariada para estratificação volumétrica de uma floresta ombrófila densa de terra firme, Amazônia oriental. **Revista Árvore**, Viçosa – MG, v. 30, n.1, p. 49 – 54, 2006.

SOUZA, A. L.; SOARES, C. P. B. **Florestas nativas: estrutura, dinâmica e manejo**. Viçosa: Editora UFV, 2013, 322p.

SOUZA, A. L., SCHETTINO, S., JESUS, R. M., VALE, A. B. Dinâmica da composição florística de uma floresta ombrófila densa secundária, após o corte de cipós, Reserva Natural da Companhia Vale do Rio Doce S/A, estado do Espírito Santo, Brasil. **Revista Árvore**, v. 26, n.5, p. 549-558, 2002.

SOUZA, D. R.; SOUZA, A. L.; GAMA, J. R. V.; LEITE, H. G. Emprego da análise multivariada para estratificação vertical de florestas inequidâneas, Viçosa-MG. **Revista Árvore**, v. 27, n. 1, p. 59-63, 2003.

SPATHELF, P.; NUTTO, L. **Modelagem aplicada ao crescimento florestal**. Santa Maria: 2000. 70 p.

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

SUDARSHANA, P.; NAGESWARA-RAO, M.; SONEJI, J. R. **Tropical Forests**. Edited by Padmini Sudarshana, Madhugiri Nageswara-Rao and Jaya R. Soneji. 2012. 400 p.

THAINES, F.; BRAZ, E. M.; MATTOS, P. P.; THAINES, A. A. R. Equações para a estimativa de volume de madeira para a região da bacia do Rio Ituxi, Lábrea, AM. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 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**, v. 35, n. 82, p. 11 – 117. 2015.

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

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests**. Waallingford: CAB International, 1994. 312 p.

YARED, J. A. G.; CARVALHO, J. O. P.; SILVA, J. N. M.; KANASHIRO, M.; MARQUES, L. C. T. **Contribuições do Projeto Silvicultura Tropical – Cooperação internacional Brasil/Reino Unido**. Belém. Embrapa Amazônia Oriental/DEFID. 2000. 28p.

WHITMORE, T.C. Gaps in the forest canopy. In: TOMLINSON, P. B.; ZIMMERMANN, M. H. (Eds.) **Tropical trees as living systems**. New York: Cambridge University Press, p.639-655. 1978.

WHITTAKER, R. H. Forest dimension and production in the Great Smoky Mountains.

**Ecology**, n. 47, p. 103-121. 1966.

WHITTAKER, R. H.; MARKS, P. L. Methods of assessing terrestrial productivity. In: LIETH, H. e WHITTAKER, R. H. (Editors). **Primary Productivity of the Biosphere**. Springer- Verlag, New York, p. 55-118. 1975.

ZACHOW, R. **Modelo de uso múltiplo dos recursos naturais da Floresta Nacional do Jamari**. 1991. 199 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.

#### 4. MODELAGEM VOLUMÉTRICA DE ESPÉCIES COMERCIAIS EM UMA FLORESTA OMBRÓFILA DENSA SOB CONCESSÃO NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA

##### RESUMO

A avaliação da floresta, em termos de seu potencial de madeira comercial, fundamenta tanto as licitações das concessões florestais quanto à autorização de exploração por parte dos órgãos ambientais competentes. Portanto, torna-se necessário o desenvolvimento de equações volumétricas com bons níveis de precisão para espécies florestais amazônicas. Este trabalho teve como objetivo ajustar e selecionar modelos para estimativa do volume comercial sem casca de espécies da Floresta Nacional do Jamari, Brasil. Os modelos volumétricos foram ajustados por grupos, sendo uma equação geral considerando todas as espécies comerciais e equações individuais para as 12 principais espécies exploradas. Com a finalidade de reduzir os erros de estimativa, foram testadas estratificações por classe de diâmetro para os agrupamentos. A identidade dos modelos foi avaliada por meio do teste de Graybill. Os modelos de Schumacher e Hall e de Spurr foram os mais adequados para as estimativas na maioria dos agrupamentos. Por fim, as estratificações por espécie e por classes de diâmetro proporcionaram maior precisão nas estimativas, sendo recomendados principalmente para dados com alta variabilidade e oriundos de florestas naturais.

**Palavras-chave:** Floresta tropical, Espécies madeireiras, Equações de volume.

##### ABSTRACT

The forest evaluation, in terms of its commercial timber potential, is fundamental to forest concessions and forest operating license by environmental agencies. Therefore, it becomes necessary to develop volumetric equations with good levels of accuracy for Amazonian forest species. So the objective of this work was to adjust and select models for estimating volume inside bark of commercial tree species in the Jamari National Forest, Brazil. The models were adjusted by groups, resulting in a general equation considering all commercial species and individual equations for the 12 main commercial species. In order to reduce the estimated errors, stratifications by size class for all groups were tested. The identity of models was evaluated by Graybill test. The models from Schumacher e Hall and Spurr, were the best suited for the estimates in most of species groups. Finally, the stratification by species and diameter class provided greater accuracy in the estimates, being recommended mainly for data of high variability from natural forests.

**Keywords:** Tropical rainforest, Timber species, Volume equations.

#### 4.1. INTRODUÇÃO

A Amazônia Brasileira possui a maior extensão e diversidade biológica entre os remanescentes naturais de floresta tropical (PHILLIPS et al., 2004), com destaque ao mais rico conjunto de espécies vegetais (TER STEEGE et al., 2013). Diversas análises recentes têm destacado o potencial dessas florestas na geração de uma ampla gama de produtos e serviços, incluindo a produção sustentável de madeira (HERRERA et al., 1999). Embora essas florestas apresentem uma infinidade de recursos aproveitáveis, suas riquezas estão dispersas em sua heterogeneidade (CAVALCANTI et al., 2010), razão pela qual seus recursos são cada vez mais subaproveitados e desvalorizados.

Por muito tempo, a quantificação volumétrica das espécies amazônicas foi efetuada com base no fator de forma igual a 0,7, conforme proposto por Heinsdijk e Bastos (1963). Esse fator foi empregado de forma generalizada para diferentes espécies, sítios, formações e tipologias florestais, ocasionando erros nas estimativas volumétricas (ROLIM et al., 2006; HIRAMATSU, 2008). No início da década de 1980, surgiu a necessidade de aprimoramento das técnicas para estimar o volume de árvores, visando à obtenção de estimativas mais confiáveis. Desde então, diversos trabalhos foram realizados na Amazônia com esse objetivo (SILVA e CARVALHO, 1984; SILVA et al., 1984; HIGUCHI e RAMM, 1985; ROLIM et al., 2006; HIRAMATSU, 2008; BARROS e SILVA JÚNIOR, 2009; COLPINI et al., 2009; LEITE e RESENDE, 2010; THAINES et al., 2010; BARRETO et al., 2014; GIMENEZ et al., 2015; e TONINI e BORGES, 2015).

Na Floresta Amazônica, a abundância de espécies florestais das mais variadas dimensões afeta, sobremaneira, a forma das árvores, conferindo diversas peculiaridades, o que dificulta, por consequência, o emprego de fatores de forma e equações de volume (FIGUEIREDO FILHO, 1983). A heterogeneidade pronunciada na composição de espécies e estrutura, até mesmo dentro de uma pequena área, constitui um importante desafio no desenvolvimento de funções de volume para florestas tropicais naturais (AKINDELE e LEMAY, 2006).

De acordo com Cavalcanti et al. (2009), o Decreto 6.063 de 2007 estabeleceu que as concessões florestais devem ocorrer por licitação, em que, para sua efetivação, é preciso avaliar a floresta em termos do seu potencial de madeira comercial, de forma que os interessados possam fazer suas ofertas. Em uma etapa mais avançada da concessão, a Instrução Normativa nº 5 de 2006 do Ministério do Meio Ambiente estabeleceu os procedimentos técnicos para a elaboração e a execução de Planos de Manejo Florestal

Sustentável (PMFS), prevendo a expedição da Autorização de Exploração (AUTEX) com base em um volume máximo por espécie. Logo, quanto mais exata for a avaliação dos recursos florestais existentes, mais embasadas são as ofertas por parte dos concessionários e a emissão da AUTEX pelo órgão ambiental.

Portanto, torna-se evidente a necessidade do desenvolvimento de novas equações volumétricas com bons níveis de precisão para formações e espécies florestais amazônicas, subsidiando, assim, as ações de manejo florestal. Com base no exposto, este trabalho teve como objetivo ajustar e selecionar modelos volumétricos para as principais espécies comerciais passíveis de exploração em uma área de concessão na Floresta Nacional do Jamari, avaliando estratégias de estratificação por classes diamétricas e de agrupamento de espécies por identidade de modelos, contribuindo, dessa forma, para o enriquecimento do conhecimento sobre as estimativas de volume de espécies tropicais comerciais da Amazônia.

## 4.2. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.2.1. Área de estudo

A área de estudo está localizada na Floresta Nacional do Jamari (FLONA do Jamari), a qual abrange os municípios de Candeias do Jamari, Itapuã do Oeste e Cujubim, no Norte do estado de Rondônia, entre as coordenadas geográficas 09° 00' 00'' S a 09° 30' 00'' S e 62° 44' 05'' W a 63° 16' 64'' W (ZACHOW, 1991). Ocupando uma área de aproximadamente 220.000 ha, a FLONA do Jamari apresenta, em quase toda sua extensão, relevo plano a suavemente ondulado e clima Tropical Chuvoso do tipo Aw (Köppen), com período seco bem definido na estação do inverno, precipitação média anual em torno de 2.400 mm e temperatura média anual de 25°C.

Na área predominam as tipologias de Floresta Ombrófila, variando de Aberta à Densa (RADAM, 1988). A Floresta Ombrófila Densa é caracterizada pelo predomínio de fanerófitos nas subformas de vida macro e mesofanerófitos, além de herbáceas e epífitas em abundância (IBGE, 2012). Nas formações abertas, predominam cipós, palmeiras ou bambus, com grande expressividade das palmeiras babaçu (*Attalea speciosa* Mart. ex. Spreng.), patauá (*Oenocarpus bataua* Mart.) e inajá (*Attalea maripa* (Aubl.) Mart.), de bambus do gênero *Guadua* e da sororoca (*Phenakospermum guyannense* (A. Rich.) Endl. ex Miq.), por consequência, a densidade de indivíduos arbóreos é menor, originando, assim, o termo floresta aberta (IBGE, 2012).

#### 4.2.2. Banco de dados

Os dados utilizados para o ajuste dos modelos volumétricos foram provenientes da cubagem em romaneio das árvores exploradas nas Unidades de Produção Anual 2014 e 2015, gerando um banco de dados com 5.231 árvores e 15.750 toras, distribuídas em 33 espécies. O método de Smalian foi adotado para a cubagem, onde na base e no topo de cada tora foram medidos os diâmetros no menor e no maior raio, obtendo-se o valor médio para cada seção. A cubagem foi efetuada para obtenção do volume comercial da árvore, que correspondeu ao volume compreendido entre a base do fuste até o ponto de inversão morfológica.

Devido à extensão e variabilidade do banco de dados, foi necessária uma etapa de pré-processamento por espécie, onde foram filtrados os *outliers*. A identificação dessas discrepâncias foi realizada com base no teste de Grubbs (GRUBBS, 1969). De forma complementar, foi realizada a análise gráfica da dispersão da variável dependente volume ( $v$ ), pela variável independente diâmetro a 1,3 m do solo ( $d$ ), sendo excluídos os pares de observação dessas variáveis com baixa correlação, isoladas da nuvem de dispersão.

#### 4.2.3. Ajuste e seleção dos modelos

Foram ajustados 11 modelos volumétricos (TABELA 4.1) pesquisados na literatura florestal (LOETSCH et al., 1973; CLUTTER et al., 1983). O ajuste dos modelos foi realizado com o emprego de regressão linear para o agrupamento de todas as espécies e de forma individual para as 12 espécies mais exploradas na FLONA, sendo elas: angelim-pedra (*Hymenolobium heterocarpum* Ducke), cambará-rosa (*Qualea paraensis* Ducke), cumaru (*Dipteryx odorata*(Aubl.) Willd.), cupiúba (*Goupia glabra* Aubl.), embireira (*Couratari stellata* A. C. Sm.), faveira-ferro (*Dinizia excelsea* Ducke), garapeira (*Apuleia leiocarpa* (Vogel) J. F. Macbr.), guariúba (*Clarisia racemosa* Ruiz e Pav.), muiracatiara (*Astronium lecointei* Ducke), muirapiranga (*Brosimum rubescens* Taub.), pequiarana (*Caryocar glabrum* Pers.) e roxinho (*Peltogyne paniculata* Benth.).

A seleção dos melhores modelos foi baseada no maior coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ) e no menor erro padrão da estimativa em porcentagem ( $S_{yx}\%$ ), os quais foram recalculados para os modelos logarítmicos, em que a variável dependente sofreu alterações. Os modelos logarítmicos tiveram seus valores corrigidos pelo fator de Meyer (FCM), devido ao erro sistemático gerado pela discrepância logarítmica. Foi realizada a análise gráfica da

distribuição dos resíduos, que, segundo Draper e Smith (1998), deve ser determinante na escolha do modelo de regressão, mesmo que os demais critérios estatísticos indiquem a seleção de outro. A significância dos coeficientes foi avaliada a partir do  $p$ -valor  $\leq 0,01$ , para identificação de problemas com multicolinearidade. As amostras independentes de 10% dos dados para equação geral e de 15% para as individuais foram selecionadas exclusivamente para validar os melhores modelos por meio do teste de aderência do *Qui-quadrado* ( $\chi^2$ ).

Com a finalidade de reduzir os erros de estimativa, para todos os agrupamentos analisados, foram testadas estratificações por classe de diâmetro, com intervalos empíricos de 20, 30 e 50 cm. Posteriormente, para verificar a possibilidade de agrupamento do modelo geral, com as equações individuais e dos estratos, foi aplicado o teste de identidade proposto por Graybill, o qual consiste na redução da soma dos quadrados para verificar pelo teste F a significância da diferença de um modelo completo para o reduzido (QUEIROZ et al., 2008).

TABELA 4.1 - MODELOS VOLUMÉTRICOS TESTADOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME COMERCIAL SEM CASCA NA FLONA DO JAMARI.

Número	Autor	Modelo matemático	Variáveis de entrada
1	Berkhout	$v = \beta_0 + \beta_1.d + \epsilon_i$	
2	Kopezky e Gehrhardt	$v = \beta_0 + \beta_1.d^2 + \epsilon_i$	
3	Hohenald e Krenn	$v = \beta_0 + \beta_1.d + \beta_2.d^2 + \epsilon_i$	Simplex
4	Husch	$\ln v = \beta_0 + \beta_1.\ln d + \epsilon_i$	
5	Brenac	$\ln v = \beta_0 + \beta_1.\ln d + \beta_2.1/d + \epsilon_i$	
6	Spurr	$v = \beta_0 + \beta_1.(d^2.h) + \epsilon_i$	
7	Spurr Logarítmica	$\ln v = \beta_0 + \beta_1.\ln(d^2.h) + \epsilon_i$	
8	Schumacher e Hall	$\ln v = \beta_0 + \beta_1.\ln d + \beta_2.\ln h + \epsilon_i$	
9	Stoate	$v = \beta_0 + \beta_1.d^2 + \beta_2.(d^2.h) + \beta_3.h + \epsilon_i$	Dupla
10	Meyer	$v = \beta_0 + \beta_1.d + \beta_2.d^2 + \beta_3.(d.h) + \beta_4.(d^2.h) + \beta_5.h + \epsilon_i$	
11	Naslund	$v = \beta_0 + \beta_1.d^2 + \beta_2.(d^2.h) + \beta_3.(d.h^2) + \beta_4.h^2 + \epsilon_i$	

Em que:  $v$  = volume comercial sem casca ( $m^3$ );  $d$  = diâmetro à altura do peito (cm), medido a 1,3 m do solo;  $h$  = altura comercial (m);  $\ln$  = logaritmo neperiano; e  $\epsilon_i$  = erro associado.

### 4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.3.1. Análise de *outliers*

Os *outliers* são observações que apresentam comportamento distinto dos demais, podendo representar erros não amostrais ou eventos discrepantes de uma população (GRUBBS, 1969), sendo uma fonte potencial de problemas em ajustes de equações preditivas. Para a exclusão desses dados, foram selecionados apenas os valores extremos do

teste de Grubbs ( $G > 2.G_{tab}$ ) e os pares de variáveis de baixa correlação, que se encontram isoladas e distantes da nuvem de dispersão, evitando assim uma alteração drástica no banco de dados com a remoção das árvores de grande porte, características da Floresta Amazônica. Foi possível observar que mesmo com a remoção, houve a manutenção das medidas de tendência ( $\bar{y}$ ) e de variabilidade ( $\sigma$ ,  $\sigma^2$ , CV% e  $\lambda$ ), com pouca variação na densidade do banco de dados (N) e com aumento nas correlações (r), indo ao encontro com a melhoria das estimativas volumétricas (TABELA 4.2).

TABELA 4.2 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA POPULAÇÃO TOTAL COM OUTLIERS E APÓS REFINAMENTO SEM OUTLIERS.

Tratamento	$\bar{y}$	$\sigma$	$\sigma^2$	CV%	$\lambda$	N	r		
							$d \times v$	$d \times h$	$h \times v$
Com Outliers	7,90	5,70	32,49	72,19	54,33	5231	0,7856	0,1235	0,3476
Sem Outliers	7,82	5,37	28,93	68,74	36,44	5150	0,8021	0,1248	0,3594

Em que:  $\bar{y}$  = média dos volumes reais em m<sup>3</sup>;  $\sigma$  = desvio padrão;  $\sigma^2$  = variância; CV% = coeficiente de variação;  $\lambda$  = amplitude do volume real em m<sup>3</sup>; N = número de árvores cubadas; r = coeficiente de correlação linear de Pearson;  $d$  = diâmetro à altura do peito;  $h$  = altura comercial; e  $v$  = volume real.

#### 4.3.2. Ajuste e seleção dos modelos

##### 4.3.2.1. Equação geral

Os coeficientes da regressão e as estatísticas de ajuste que fundamentaram a seleção do melhor modelo estão descritos na Tabela 4.3. A análise gráfica da distribuição dos resíduos relativos, para os dois melhores modelos de simples e de dupla entrada encontram-se na Figura 2.

Nitidamente, os modelos de dupla entrada foram estatisticamente superiores aos de simples entrada, com os menores valores de  $S_{yx}\%$  e os maiores de  $R^2_{aj}$ . Esses resultados corroboraram com Rolim et al. (2006), uma vez que os modelos de simples entrada assumem que apenas o diâmetro explica toda a variabilidade do volume, o que geralmente não é uma hipótese válida, principalmente em florestas tropicais heterogêneas. A melhoria significativa dos ajustes com a inserção da variável altura é citada por diversos autores que trabalharam com estimativas volumétricas na Amazônia, como: Silva et al. (1984), Rolim et al. (2006), Thaines et al. (2010), Barreto et al. (2014) e Tonini e Borges (2015). No entanto, a estratificação vertical das florestas tropicais dificulta a mensuração da variável altura,

prejudicando, assim, a estimativa do volume das árvores (SEGURA e KANNINEN, 2005). Recomenda-se, quando utilizados modelos de dupla entrada, a qualificação da equipe de campo para mensuração e otimização da estimativa dessa variável.

TABELA 4.3 - COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DOS MODELOS VOLUMÉTRICOS TESTADOS PARA A ESTIMATIVA DO VOLUME COMERCIAL SEM CASCA NA FLONA DO JAMARI.

Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$S_{yx}\%$	$R^2_{aj.}$	FCM
1	-8,0955*	0,1954*					41,09	0,6251	-
2	0,7332*	0,0009*					41,46	0,6183	-
3	-8,2475*	0,1955*	0,00002 <sup>ns</sup>				41,08	0,6253	-
4	-6,4542*	1,9079*					41,38	0,6199	1,0591
5	-6,8641*	1,9831*	6,2448 <sup>ns</sup>				41,47	0,6181	1,0591
6	1,2856*	0,0000*					36,57	0,7031	-
7	-8,2324*	0,8630*					36,12	0,7104	1,0369
8	-8,2733*	1,8039*	0,76286*				35,97	0,7128	1,0364
9	-0,9270*	0,0004*	0,00002*	0,09485*			36,21	0,7089	-
10	4,934 <sup>ns</sup>	-0,1240 <sup>ns</sup>	0,00103*	0,011678*	-0,00003 <sup>ns</sup>	-0,4504*	35,68	0,7174	-
11	1,0333*	0,0001*	0,00003*	9,21E-06 <sup>ns</sup>	-0,0008 <sup>ns</sup>		36,33	0,7070	-

Em que:  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  e  $\beta_5$  = coeficientes da regressão a serem estimados;  $S_{yx}\%$  = erro padrão da estimativa em porcentagem;  $R^2_{aj.}$  = coeficiente de determinação ajustado; F = valor de F calculado; FCM = fator de correção de Meyer; \* = significativo ( $p > 0,01$ ); e <sup>ns</sup> = não significativo.

Dentre os modelos testados para a estimativa do volume comercial, o de Meyer proporcionou as melhores estatísticas de ajuste e a maior precisão nas estimativas. Porém, foi possível observar que a metade dos coeficientes desse modelo foi estatisticamente não significativa, indicando a existência de problemas com multicolinearidade. O indício mais claro da multicolinearidade são os elevados valores de  $R^2_{aj.}$ , seguidos de coeficientes de regressão não significativos estatisticamente (VALENTE et al., 2011), sendo a maior consequência, os elevados erros de estimativa (GUJARATI, 2000). Segundo Batista et al. (2004), a ocorrência de multicolinearidade é comum em modelos com muitas variáveis, como o de Meyer. Para resolução dos problemas dessa natureza, algumas recomendações são citadas, entre elas, a exclusão das variáveis independentes que originaram os coeficientes não significativos (HAIR et al., 2005). Neste estudo, optou-se por eliminar os modelos que apresentaram multicolinearidade, com coeficientes não significativos ( $p\text{-valor} \leq 0,01$ ).

O modelo de Schumacher e Hall (8) foi selecionado como o melhor para a estimativa volumétrica em questão, apresentando o melhor ajuste dentre os modelos testados e a ausência de multicolinearidade. A utilização desse modelo é consagrada na ciência florestal e para a Amazônia Brasileira, o qual é frequentemente citado como o mais adequado para estimativas volumétricas (SILVA e ARAÚJO, 1984; HIGUCHI e HAMM, 1995; ROLIM et al., 2006; COLPINI et al., 2009; THAINES et al., 2010; TONINI e BORGES, 2015).

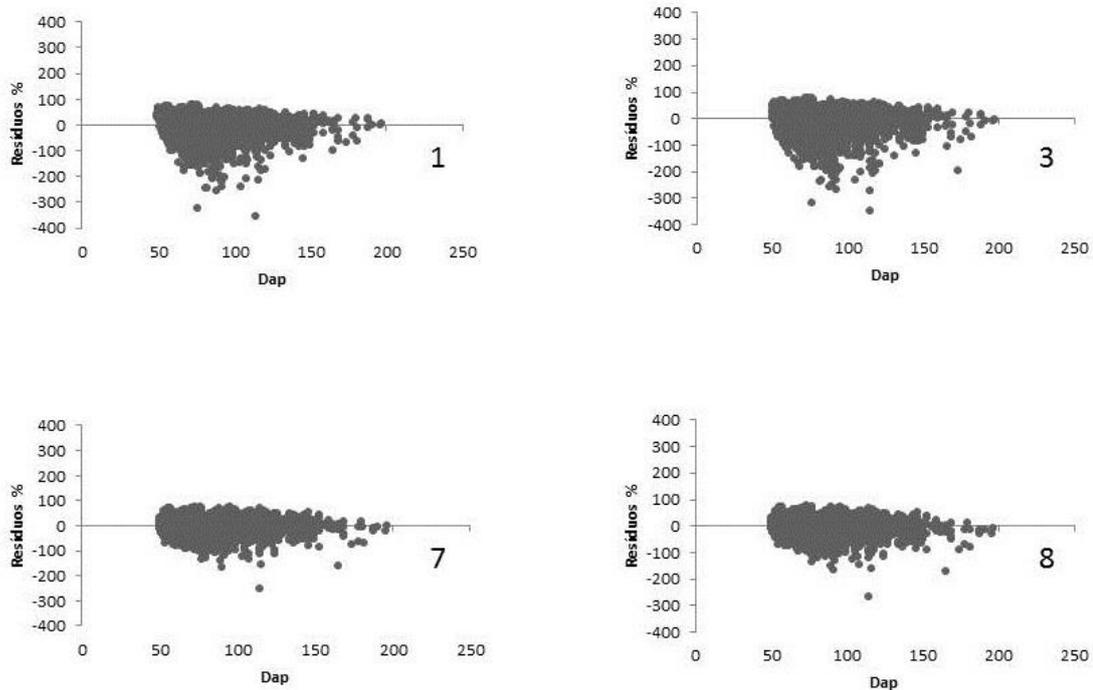
Considerando os modelos de simples entrada, o de Berkhout (1) foi o mais apropriado, apresentando maior aderência aos dados e as estimativas mais precisas. Analisando a eficácia desses modelos, diversos autores citam o de Husch como o mais eficaz (GUIMENEZ et al., 2015; BARRETO et al., 2014; ROLIM et al., 2006), sobretudo pela redução da variância por meio da logaritimização das variáveis. Porém, no presente estudo, essa melhoria não foi constatada, sendo o modelo em sua forma linear (1) o mais adequado. Ao avaliar a influência do erro nas estimativas de altura na precisão de equações de volume, Guimenez et al. (2015) indicaram a utilização do modelo de simples entrada de Husch, mesmo com os melhores ajustes dos modelos de dupla entrada.

Por meio da análise gráfica dos resíduos (FIGURA 4.1), evidenciou-se uma menor tendência de superestimativa para o modelo de Spurr Logarítmico (7), em comparação ao modelo de Schumacher e Hall (8) selecionado via estatísticas de ajuste. No modelo de Spurr, a variável independente oferece maior peso ao  $d$ , elevando-o ao quadrado. Como a variável  $d$  apresenta elevada correlação com o volume ( $r = 0,8021$ ), esse modelo apresentou vantagem, corrigindo parte dos problemas de superestimativa. Essa análise deve ser determinante na seleção do melhor modelo, mesmo que os demais critérios indiquem outro (DRAPER e SMITH, 1998). Logo, o modelo de Spurr Logaritmo (7) é o mais adequado para a estimativa do volume comercial ( $d < 50$  cm) na Floresta Nacional do Jamari, podendo gerar estimativas precisas.

Através da análise gráfica foi possível observar a grande dispersão dos dados ao longo da linha de regressão e fortes tendências de superestimativas (FIGURA 4.1), caracterizando a elevada variabilidade e heterogeneidade dos dados. Nas classes de diâmetro entre 50 e 100 cm, onde a maioria das árvores está concentrada, essa tendência foi mais acentuada, com resíduos de até -300%. Os resíduos dessa magnitude em equações gerais para diversas espécies foram encontrados por Hiramatsu (2008) no ajuste de modelos volumétricos para o Vale do Jari, estado do Pará, dispondo de um amplo banco de dados oriundos de romaneio, como no presente estudo.

Para fins de planejamento da atividade florestal, Thaines et al. (2010) mencionaram que as superestimativas são mais prejudiciais que as subestimativas, logo, a utilização dos modelos em questão requer cautela. Porém, cabe ressaltar que a utilização de toras de grande comprimento, oriundas de romaneio, não compromete o ajuste de modelos volumétricos, conforme constatado por Silva-Ribeiro et al. (2014), avaliando diferentes seccionamentos para cubagem e escolha de equações na Floresta Nacional do Tapajós, PA.

FIGURA 4.1 - DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS PARA OS DOIS MELHORES MODELOS DE SIMPLES ENTRADA (1 E 3) E DE DUPLA ENTRADA (7 E 8), TESTADOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME COMERCIAL SEM CASCA PARA TODAS AS ESPÉCIES COMERCIAIS.



Os elevados erros nas estimativas de volume em florestas tropicais estão relacionados com diversos fatores, dentre eles, destaca-se a grande variação na forma e na dimensão do fuste, até mesmo dentre os indivíduos de uma mesma espécie. Nessas florestas, essa ampla variação pode ser ocasionada pela heterogeneidade florística e estrutural (AKINDELE e LEMAY, 2006), além da diversidade etária que dificulta o emprego de fatores de forma e equações de volume individual (FIGUEIREDO FILHO, 1983). Outro fator agravante para estimativas de volume em florestas tropicais é citado por Brandeis et al. (2006), que mencionaram a influência negativa das árvores de grande porte na precisão das estimativas.

Comparando os erros obtidos nos trabalhos desenvolvidos na Amazônia (TABELA 4.4), nota-se que os encontrados no presente estudo são altos. Pode ser observada também a influência do número de espécies e quantidade de árvores cubadas no erro amostral, em que os valores de  $R^2_{aj}$  superiores a 0,9 e de  $S_{yx}\%$  inferiores a 10% estão condicionados a um reduzido número de árvores cubadas. Devido à variabilidade nas características dos fustes em florestas tropicais, recomenda-se um amplo banco de dados para a construção de equações de volume, de modo a englobar a variação de forma e de dimensão das árvores.

TABELA 4.4 - COMPARAÇÃO DAS ESTATÍSTICAS DE AJUSTE E PRECISÃO ENTRE OUTROS TRABALHOS DESENVOLVIDOS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA.

Autor	Local	Amplitude				Árvores Cubadas	Espécies
		$S_{yx}\%$		$R^2_{aj.}$			
Ramos, 2012	Itacoatiara - AM	21, 23	34,73	0,76	0,91	268	38
Moura, 1994	Tapajós - PA	12,08	36,05	0,68	0,96	710	68
Colpini et al., 2009	Cotriguaçu - MT	18,75	30,34	0,92	0,97	91	48
Barreto et al., 2004	Anapú - PA	12,91	34,76	0,79	0,96	132	25
Tonini e Borges, 2015	Caracaraí - RR	10,05	19,78	0,79	0,98	122	18
Hiramatsu, 2008	Jari - PA	32,07	40,24	0,69	0,81	16.099	25
Thaines et al., 2010	Lábrea - AM	7,76	19,92	0,82	0,92	141	15
Guimenez et al., 2015	Rorainópolis - RR	17,11	21,97	0,88	0,96	54	-
Rolim et al., 2006	Tapirapé-Aquirí - PA	4,64	56,24	0,82	0,99	55	-
Este Estudo	Jamari - RO	35,68	41,47	0,61	0,72	5.150	32

Em que:  $S_{yx}\%$  = erro padrão da estimativa em porcentagem; e  $R^2_{aj.}$  = coeficiente de determinação ajustado.

#### 4.3.2.2. Equações individuais

A heterogeneidade na composição de espécies e na estrutura constitui um importante desafio no desenvolvimento de funções de volume para florestas tropicais, em que o ajuste de equações por espécie individual é uma das principais formas de contornar essa dificuldade (AKINDELE e LEMAY, 2006). Para as espécies comerciais amazônicas, a modelagem do volume de forma individual foi abordada por: Moura (1994), Hiramatsu (2008), Ramos (2012), Lima et al. (2014) e Silva-Ribeiro (2014).

Seguindo o mesmo critério de seleção utilizado para a equação geral, foram excluídos os modelos que apresentaram multicolinearidade e coeficientes não significativos ( $p\text{-valor} \leq 0,05$ ). Na Tabela 4.5 estão as estatísticas descritivas e os coeficientes de correlação linear das espécies avaliadas individualmente. Na Tabela 4.6 constam os coeficientes de regressão e as estatísticas de ajuste para o melhor modelo de simples entrada e para os dois melhores de dupla, considerando os 12 agrupamentos analisados.

Mesmo com o ajuste de modelos volumétricos por espécies individuais, foi possível observar uma baixa correlação entre as variáveis dendrométricas, relevando a menor relação biológica entre elas. A variável  $d$  apresentou maior correlação com o volume comercial das espécies, ao passo que as menores correlações foram verificadas entre as variáveis  $d$  e  $h$ , evidenciando a ausência de uma relação hipsométrica explicativa para as espécies.

Avaliando a correlação entre variáveis e combinações de variáveis dendrométricas para espécies do Vale do Jari, Hiramatsu (2008) também encontrou valores mais elevados entre  $d$  e Volume (0,79 – 0,88), valores médios entre  $h$  e volume (0,31 – 0,58) e valores

reduzidos entre  $d$  e  $h$  (0,02 – 0,35). No entanto, as correlações entre  $d$  e  $h$  para as espécies abordadas no presente estudo foram inferiores. A utilização da altura total, ao invés da altura comercial, provavelmente fornecerá uma relação hipsométrica mais consistente, sobretudo pelo fato de a altura comercial medida no romaneio depender de fatores operacionais relativos à exploração.

TABELA 4. 5- ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS POPULAÇÕES DAS 12 ESPÉCIES AVALIADAS INDIVIDUALMENTE.

Espécie	$\bar{y}$	$\sigma$	$\sigma^2$	CV%	$\lambda$	N	r		
							$d \times v$	$d \times h$	$h \times v$
Angelim-pedra	10,80	6,27	39,29	58,02	32,05	264	0,7953	0,3082	0,5017
Cambará-rosa	5,26	2,09	4,36	39,73	11,05	207	0,7578	0,0983	0,3786
Cumaru	5,60	2,89	8,37	51,63	16,40	242	0,7944	0,2535	0,4849
Cupiúba	5,89	2,91	8,49	49,45	20,44	155	0,7577	0,1391	0,3843
Embireira	10,80	4,97	24,74	46,05	32,74	420	0,7306	0,0681	0,3298
Faveira-ferro	14,02	7,11	50,53	50,70	34,72	456	0,6632	0,0591	0,3353
Garapeira	8,57	4,39	19,25	51,18	21,96	127	0,7293	0,1336	0,3657
Guariúba	4,40	1,36	1,85	30,95	7,29	245	0,6602	0,0551	0,5038
Muiracatiara	7,81	3,42	11,70	43,82	26,20	640	0,7750	0,1209	0,3816
Muiarapiranga	5,55	2,27	5,14	40,83	9,89	108	0,7048	0,1713	0,5029
Pequiarana	5,91	2,80	7,87	47,47	16,71	121	0,7440	0,2296	0,4509
Roxinho	4,14	1,40	1,96	33,84	8,59	623	0,5212	0,0488	0,4552

De maneira geral, os modelos de simples entrada de Hohenald e Krenn e de Brenac e os de dupla entrada de Stoa, Meyer e Naslund, apresentaram problemas de multicolinearidade, sendo excluídos na maioria dos agrupamentos. Esse fato corrobora com as constatações, para esses modelos, de Batista et al. (2004), Rolim et al. (2006), Ramos (2012), Barreto et al. (2014) e Tonini e Borges (2015).

A superioridade dos modelos de dupla entrada também foi evidente no ajuste individual das espécies, sendo os mais precisos para estimativa do volume comercial. Em uma floresta de terra firme no Pará, Baima et al. (2001) atribuíram os melhores resultados dos modelos de dupla entrada à alta correlação do diâmetro e altura com o volume. No entanto, os resultados encontrados não comprometem a utilização dos modelos de simples entrada. Esses modelos, além de excluir a medição da altura, proporcionaram estimativas satisfatórias, próximas às resultantes dos modelos de dupla entrada.

TABELA 4.6 - COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DOS MELHORES MODELOS VOLUMÉTRICOS TESTADOS PARA A ESTIMATIVA DO VOLUME COMERCIAL SEM CASCA DAS ESPÉCIES COMERCIAIS DA FLONA DO JAMARI.

Espécie	Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$S_{yx}\%$	$R^2_{aj.}$	FCM
Angelim - pedra	1	-8,4895	0,2078	-	-	-	-	35,24	0,6297	-
	7	-8,0224	0,8542	-	-	-	-	32,15	0,6918	1,0358
	8	-8,0922	1,6437	0,9748	-	-	-	31,82	0,6982	1,0356
Cambará - rosa	2	0,7227	0,0010	-	-	-	-	25,77	0,5772	-
	6	0,9325	0,0000	-	-	-	-	22,02	0,6912	-
	8	-7,3655	1,6330	0,6788	-	-	-	22,30	0,6833	1,0200
Cumarú	4	-6,3546	1,8549	-	-	-	-	31,09	0,6393	1,0422
	7	-7,7985	0,8249	-	-	-	-	27,52	0,7175	1,0289
	8	-7,8005	1,6680	0,7978	-	-	-	27,51	0,7176	1,0290
Cupiúba	4	-5,8568	1,7124	-	-	-	-	31,89	0,5815	1,0429
	7	-7,2519	0,7786	-	-	-	-	28,91	0,6559	1,0302
	8	-7,2946	1,5990	0,7256	-	-	-	28,84	0,6576	1,0303
Embireira	1	-6,7614	0,1997	-	-	-	-	31,48	0,5315	-
	7	-7,8820	0,8358	-	-	-	-	28,80	0,6079	1,0333
	8	-7,9555	1,6558	0,8801	-	-	-	28,77	0,6089	1,0333
Faveira - ferro	3	-	0,3680	-	-	-	-	37,64	0,4477	-
	7	14,8678	0,0008	-	-	-	-	35,94	0,4964	1,0569
	11	-6,7579	0,7632	-	-	-	-	35,61	0,5055	-
Garapeira	1	3,8272	0,0009	0,0000	0,0004	-	0,0182	35,61	0,5055	-
	1	-5,7363	0,1626	-	-	-	-	35,16	0,5243	-
	7	-7,6741	0,8155	-	-	-	-	32,20	0,6011	1,0418
Guariúba	10	-	1,2653	-	-	0,0003	2,7294	31,96	0,6069	-
	1	58,1498	0,0063	0,0571	-	-	-	31,96	0,6069	-
	1	-2,4184	0,0973	-	-	-	-	23,30	0,4312	-
Muiracatiara	6	1,0427	0,0000	-	-	-	-	17,54	0,6777	-
	7	-6,9241	0,7452	-	-	-	-	17,62	0,6746	1,0140
	1	-6,0939	0,1839	-	-	-	-	27,72	0,5994	-
Muirapiranga	7	-8,0953	0,8463	-	-	-	-	24,61	0,6841	1,0210
	8	-8,2099	1,6619	0,9217	-	-	-	24,60	0,6844	1,0210
	1	-3,6855	0,1220	-	-	-	-	29,10	0,4871	-
Pequiarana	7	-7,6868	0,8112	-	-	-	-	24,66	0,6319	1,0262
	8	-7,6583	1,5248	0,9481	-	-	-	24,32	0,6418	1,0261
	2	1,3779	0,0007	-	-	-	-	31,39	0,5592	-
Roxinho	6	1,9510	0,0000	-	-	-	-	27,62	0,6587	-
	7	-6,3903	0,7078	-	-	-	-	27,69	0,6570	1,0349
	4	-3,4797	1,1507	-	-	-	-	28,93	0,2683	1,0413
Roxinho	7	-5,4824	0,6110	-	-	-	-	25,31	0,4398	1,0298
	8	-5,3029	1,0929	0,7417	-	-	-	25,12	0,4483	1,0293

Considerando apenas os modelos de dupla entrada, o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj.}$ ) e o erro padrão da estimativa ( $S_{yx}\%$ ) para os agrupamentos variaram respectivamente entre 0,43 a 0,71 e 17% a 35%. De forma geral, os modelos de Schumacher e Hall e de Spurr logarítmico forneceram os melhores ajustes e as estimativas mais precisas. A eficiência desses modelos é consagrada na área florestal, conforme já mencionado. Para

espécies amazônicas abordadas individualmente, esses modelos também são citados como os mais adequados (SILVA et al., 1984; MOURA, 1994; SILVA-RIBEIRO et al., 2014).

A análise gráfica foi decisiva para a seleção dos melhores modelos individuais (FIGURA 4.2 a 4.13), por meio da identificação de tendências, principalmente de superestimativas, que prejudicam o planejamento do manejo florestal. Essa análise reforça a elevada variabilidade de dados dendrométricos em florestas tropicais, até mesmo dentro de uma mesma espécie. Para espécies comerciais amazônicas, resíduos da mesma magnitude foram encontrados por Hiramatsu (2008), no Vale do Jari. Cabe ressaltar que os maiores resíduos estão diretamente relacionados às espécies de grande porte, como, por exemplo, a Faveira-ferro e a Muiracatiara, as maiores da Floresta Nacional do Jamari em termos de volume e altura, respectivamente. Para florestas tropicais, Brandeis et al. (2006) mencionaram que os maiores erros são gerados pelas maiores árvores, confirmando o constatado no presente estudo.

FIGURA 4.2 - DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA ANGELIM PEDRA.

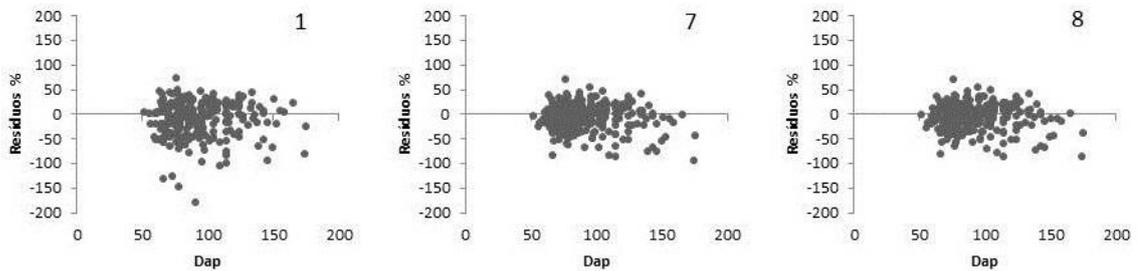


FIGURA 4.3 - DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA CAMBARÁ ROSA.

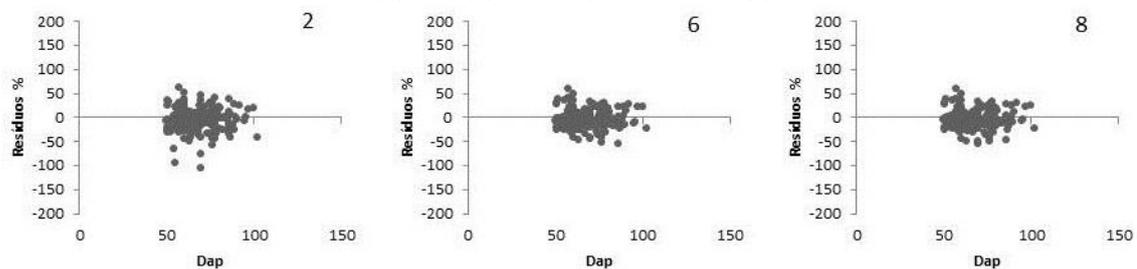


FIGURA 4.4 - DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA CUMARU.

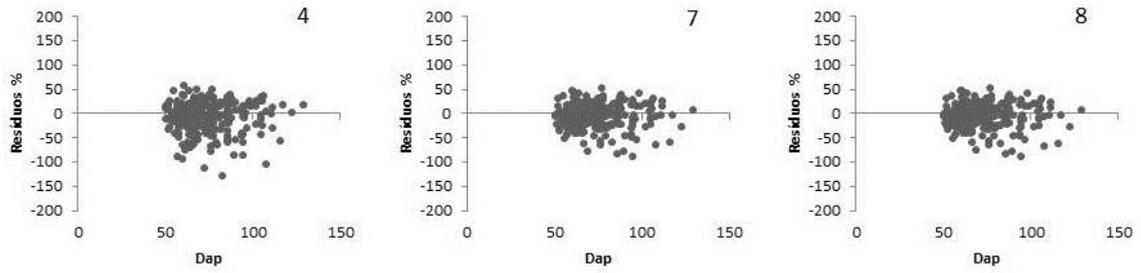


FIGURA 4.5 - DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA CUPÍUBA.

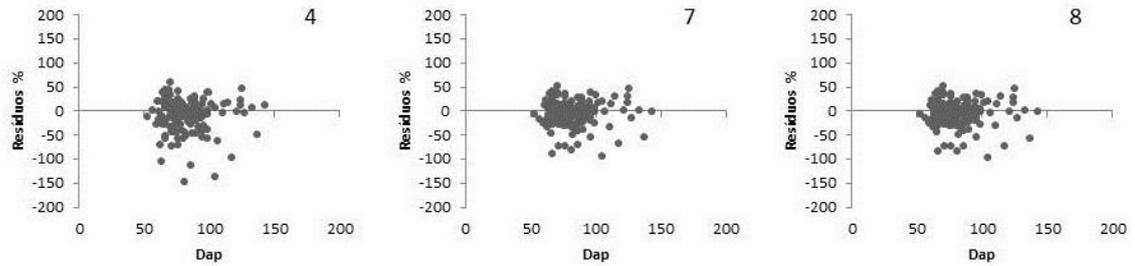


FIGURA 4.6 - DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA EMBIREIRA.

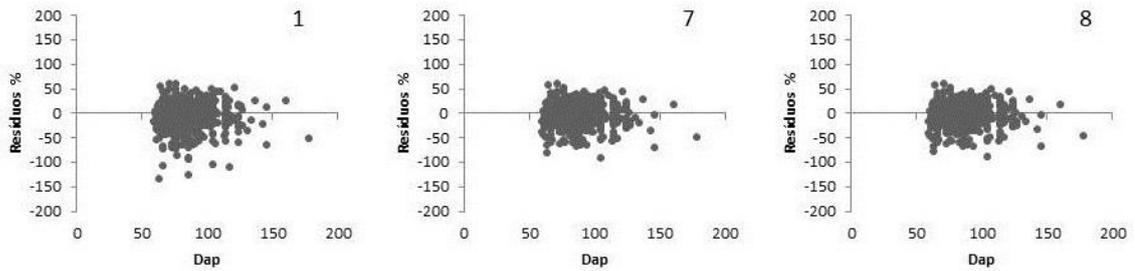


FIGURA 4.7 - DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA FAVEIRA FERRO.

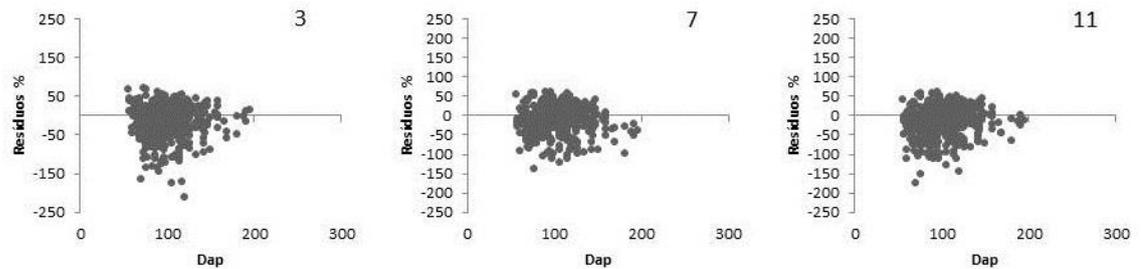


FIGURA 4.8 - DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA GARAPEIRA.

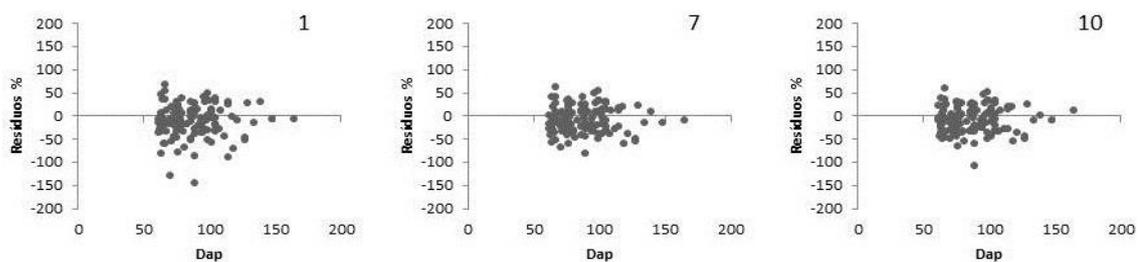


FIGURA 4.9 - DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA GUARIUBA.

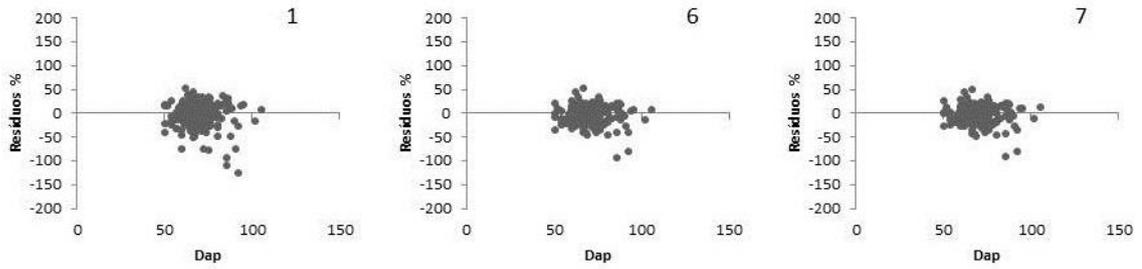


FIGURA 4.10 - DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA MUIRACATIARA.

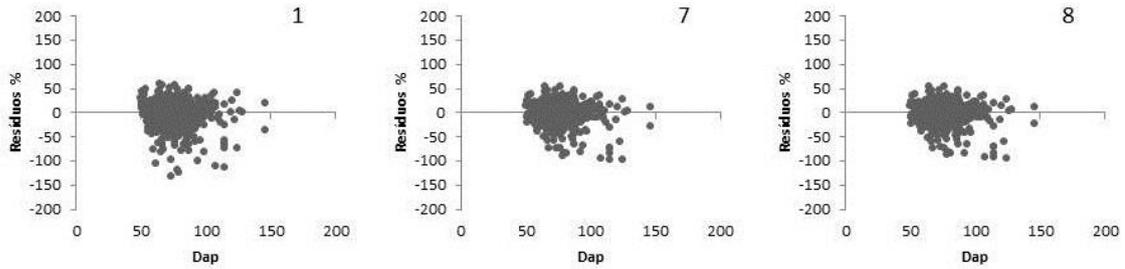


FIGURA 4.11 - DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA MUIRAPIRANGA.

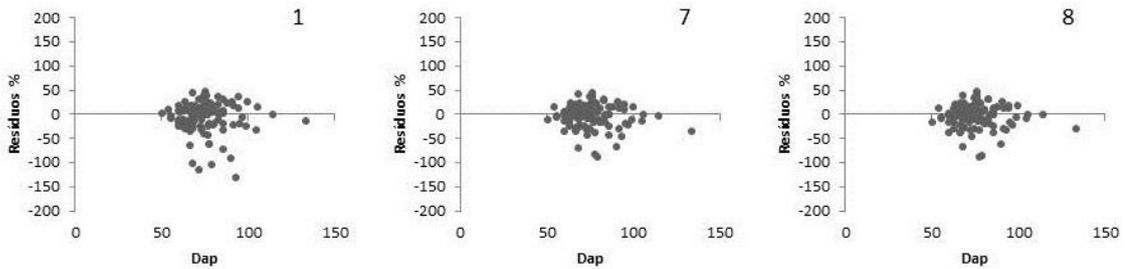


FIGURA 4.12 - DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA PEQUIARANA.

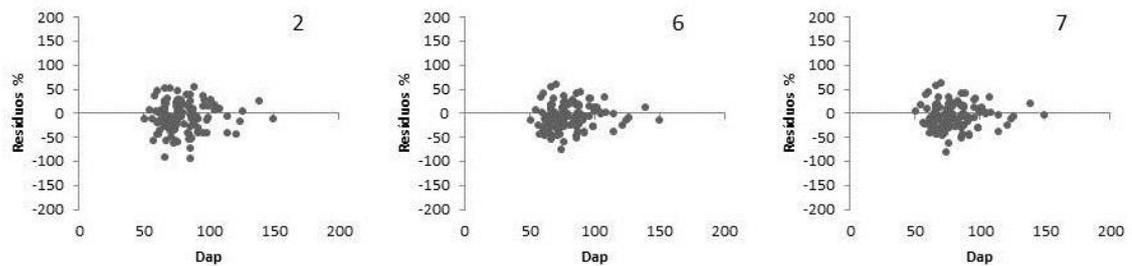
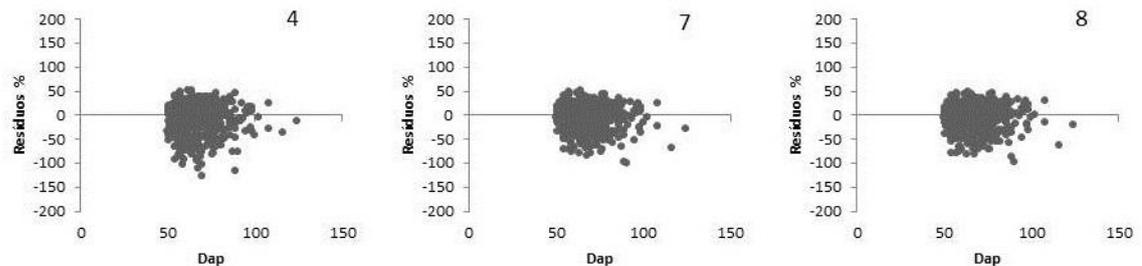


FIGURA 4.13 - DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MELHORES MODELOS AJUSTADOS PARA ROXINHO.



Mesmo utilizando modelos individuais por espécies, os erros obtidos foram altos, comprometendo a utilização dos modelos para fins práticos que requerem maior precisão, sendo necessário o refinamento dos modelos por meio de outras técnicas, como a estratificação por classes de diâmetro.

#### 4.3.3. Validação dos modelos selecionados

Na Tabela 4.7 estão presentes as estatísticas utilizadas para a validação dos modelos selecionados. Os dois melhores ajustes selecionados para estimativa do volume, considerando todas as espécies comerciais, foram validados pelo teste do  $\chi^2$  ao nível de significância de 5%. O valor de  $\chi^2_{calculado}$  foi menor que  $\chi^2_{tabelado}$ , aceitando-se a hipótese de que os modelos selecionados são aderentes ao conjunto de dados. Analisando as outras estatísticas utilizadas para a validação, houve um pequeno aumento do erro padrão da estimativa e redução do coeficiente de determinação ajustado. De acordo com Machado et al. (2008), isso não invalida o uso dessas equações, pois além da diferença ser muito pequena, a amostra de validação também é menor.

Para os agrupamentos de espécies individuais, todos foram validados no teste do  $\chi^2$ , com exceção das espécies Angelim-pedra, Embireira, Faveira-ferro e Pequiarana (TABELA 4.7), as espécies de maior porte e que apresentaram os maiores erros nas estimativas. No entanto, as demais estatísticas de validação dessas espécies foram satisfatórias, não comprometendo o uso dos modelos por falta de aderência.

TABELA 4.7 - ESTATÍSTICAS DE VALIDAÇÃO PARA OS MELHORES MODELOS SELECIONADOS POR AGRUPAMENTO.

<b>Agrupamento</b>	<b>Modelo</b>	<b><math>\chi^2_{calc}</math></b>	<b><math>\chi^2_{tab}</math></b>	<b>Dr</b>	<b>Sd</b>	<b>Ssrr</b>
Eq. Geral	7	444,6	467,2	-0,05	3,65	49,62
	8	433,2		-0,06	3,60	49,13
Angelim - pedra	8	95,7	32,3	-0,25	4,83	10,48
Cambará - rosa	8	9,1	22,5	-0,01	1,39	1,52
Cumaru	8	17,1	29,0	-0,07	1,60	3,11
Cupiúba	8	15,8	16,9	-0,01	2,20	2,32
Embireira	8	60,3	56,9	-0,09	3,07	7,17
Faveira - ferro	7	152,7	60,4	-0,20	4,92	16,12
Garapeira	10	7,8	29,0	-0,02	3,02	2,31
Guariúba	6	7,8	29,0	-0,03	0,90	1,95
Muiracatiara	8	41,1	90,4	-0,02	1,66	6,51
Muirapiranga	8	7,5	9,4	-0,07	1,33	1,57
Pequiarana	7	15,5	10,9	-0,12	2,46	2,85
Roxinho	8	31,2	86,8	-0,08	1,14	8,83

Em que:  $\chi^2_{calc}$  = valor de qui-quadrado calculado,  $\chi^2_{tabelado}$  = valor de qui-quadrado tabelado a 95%,  $R^2_{aj}$  = coeficiente de determinação ajustado,  $S_{yx}\%$  = erro padrão da estimativa relativo,  $Dr$  = desvio relativo,  $Sd$  = soma das diferenças, e  $Ssrr$  = soma dos quadrados dos resíduos relativos.

#### 4.3.4. Estratificação em classes de diâmetro

Em muitos agrupamentos, as últimas classes de  $d$  apresentaram baixa frequência, com número de observação insuficiente para a realização de uma regressão linear consistente ( $n < 10$ ). Nesses casos, as classes anteriores tiveram seus limites extremos em aberto, tornando a estratificação mais flexível.

##### 4.3.4.1. Equação geral

A estratificação gerou redução de 1 a 14% no erro padrão da estimativa (TABELA 4.8), considerando as classes diamétricas em relação aos modelos gerais. Essa melhoria nas estimativas é esperada, pois a estratificação propicia a redução da variância dentro dos estratos, tornando-os mais homogêneos quanto a variável de interesse (SOUZA et al., 2012). Os melhores resultados foram gerados pela menor estratificação de 20 cm empregando-se o modelo de Schumacher e Hall ajustado. No entanto, os menores intervalos requerem um maior número de equações ajustadas, cabendo ao gestor florestal decidir se a melhoria na precisão das estimativas compensará o maior tempo gasto com o processamento.

Ao empregar a estratificação em modelos de regressão, bons resultados são citados para relações hipsométricas (DAVID et al., 2014) e modelos de afilamento para sortimentos (SOUZA et al., 2012). Para modelos volumétricos em floresta tropicais, essa técnica ainda é pouco explorada. Na Amazônia, Silva et al. (1984) desenvolveram uma equação geral para a Floresta Nacional do Tapajós, considerando diversas espécies com diâmetro superior a 45 cm. A fim de completar as relações quantitativas na mesma floresta, Silva e Araújo (1984) desenvolveram, posteriormente, uma nova equação para árvores de pequeno diâmetro, com variação entre 15 e 45 cm. Com isso, novas investigações sobre a estratificação de dados no ajuste de modelos volumétricos são necessárias, sobretudo, nas florestas tropicais amazônicas, onde diversos fatores, como a elevada heterogeneidade na arquitetura e forma dos fustes, dificultam as estimativas volumétricas.

TABELA 4.8 - COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DOS MODELOS TESTADOS PARA ESTIMAR O VOLUME COMERCIAL SEM CASCA COM DADOS AGRUPADOS EM CLASSES DE DIÂMETRO.

Estratificação	Classe	Modelo	B0	B1	B2	Syx%	R <sup>2</sup> aj.	
50cm	50<100	7	-7,8642	0,8303		33,26	0,5726	
		8	-8,0824	1,7512	0,7730	33,10	0,5768	
	100<150	7	-6,2252	0,7077		32,27	0,2966	
		8	-6,4428	1,4739	0,6877	32,27	0,2964	
	150<200	7	-3,7581	0,5235		26,58	0,1256	
		8	-2,5291	0,7404	0,6334	26,76	0,1131	
30cm	50<80	7	-7,1918	0,7703		31,59	0,4686	
		8	-7,4075	1,6076	0,7477	31,57	0,4694	
	80<110	7	-8,8401	0,9152		32,66	0,4217	
		8	-10,3294	2,2125	0,8370	32,27	0,4355	
	110<140	7	-5,6798	0,6644		33,45	0,1898	
		8	-7,7744	1,8020	0,6070	33,37	0,1935	
	140<170	7	-5,0433	0,6184		28,80	0,2153	
		8	-5,7910	1,3964	0,6017	28,96	0,2068	
	170<200	7	-13,4140	1,2352		21,29	0,3414	
		8	-21,1217	4,1015	0,9731	22,01	0,2872	
	20cm	50<70	7	-6,4074	0,6994		25,98	0,4198
			8	-6,5995	1,4518	0,6904	25,98	0,4200
70<90		7	-8,1260	0,8524		32,94	0,4023	
		8	-8,9650	1,9165	0,8241	32,88	0,4043	
90<110		7	-8,5372	0,8921		32,46	0,3318	
		8	-11,4162	2,4509	0,8318	32,17	0,3439	
110<130		7	-5,3733	0,6395		34,06	0,1692	
		8	-8,5942	1,9814	0,5956	34,01	0,1721	
130<150		7	-5,0039	0,6140		29,31	0,1537	
		8	-4,7089	1,1667	0,6165	29,45	0,1456	
150<170		7	-2,6803	0,4429		28,67	0,0107	
		8	4,3577	-0,5472	0,5167	28,46	0,0114	
170<	7	-13,4140	1,2352		21,29	0,3414		
	8	-21,1217	4,1015	0,9731	22,01	0,2872		

#### 4.3.4.2. Equações individuais

A estratificação mais adequada para cada espécie com base nos melhores modelos selecionados, bem como os seus respectivos coeficientes de regressão e estatísticas de ajuste, é apresentada na Tabela 4.9. Assim, nos agrupamentos de espécies individuais, a influência da estratificação foi bastante diferenciada, variando de suaves reduções até o aumento do erro padrão da estimativa ( $S_{yx}\%$ ), no entanto, a análise gráfica dos resíduos indicou melhora na precisão das estimativas, principalmente na redução das superestimativas.

TABELA 4.9 - COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DOS MODELOS TESTADOS PARA ESTIMAR O VOLUME COMERCIAL SEM CASCA COM DADOS POR ESPÉCIE EM CLASSES DE DIÂMETRO.

Espécie	Modelo	Estratificação	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$S_{yx}\%$	$R^2_{aj.}$
Angelem-pedra	8	50 < 100	-8,9169	1,8597	0,9343	33,06	0,4722
		100 < 150	-6,6009	1,3476	0,9574	27,24	0,2968
		150 < 200	-8,7293	1,2141	1,8011	17,48	0,6079
Cambará-rosa	8	50 < 80	-6,9857	1,5493	0,6673	23,05	0,5319
		80 < 110	-10,4900	2,2342	0,8243	19,15	0,4236
Cumaru	8	50 < 80	-8,1975	1,7281	0,8513	26,76	0,5137
		80 < 110	-8,7725	1,9129	0,7484	26,33	0,4441
		110 < 140	-9,8648	2,4044	0,3040	23,30	0,1309
Cupiúba	8	50 < 80	-7,7405	1,6959	0,7463	26,33	0,3643
		80 < 110	-10,2756	2,2390	0,7493	22,81	0,4853
		110 < 140	-5,4758	1,5314	0,2046	35,02	-0,2054
Embireira	8	50 < 100	-8,4463	1,7855	0,8570	27,87	0,4682
		100 <	-5,4119	1,1179	0,8793	26,81	0,2586
Faveira-ferro	7	50 < 100	-7,4972	0,8246	-	41,22	0,3156
		100 < 150	-5,3597	0,6539	-	31,38	0,2605
		150 < 200	-4,8859	0,6060	-	20,87	0,2606
Garapeira	7	50 < 80	-9,6481	0,9879	-	35,98	0,2568
		80 < 110	-7,7498	0,8228	-	31,94	0,2402
		110 <	-8,9347	0,9091	-	24,75	0,5286
Guariúba	6	50 < 70	1,1316	0,0000	-	18,15	0,4753
		70 <	1,0101	0,0000	-	16,86	0,5757
Muiracatiara	8	50 < 70	-7,3481	1,4251	0,9531	21,79	0,4417
		70 < 90	-8,7347	1,7483	0,9710	22,66	0,3871
		90 < 110	-11,2948	2,4789	0,7316	19,64	0,4630
		110 <	-11,7185	2,5358	0,6664	33,59	0,2119
Muirapiranga	8	50 < 70	-7,0463	1,5526	0,6815	21,60	0,3374
		70 < 90	-6,7515	1,3278	0,9409	25,45	0,2601
		90 <	-7,2166	1,1381	1,4003	20,05	0,5856
Pequiarana	6	50 < 100	1,4061	0,0000	-	30,46	0,4011
		100 < 150	3,1094	0,0000	-	16,66	0,6528
Roxinho	8	50 < 70	-5,5678	1,1316	0,7806	24,46	0,3651
		70 < 90	-6,0902	1,2741	0,7402	24,68	0,2996
		90 <	-2,3426	1,1570	-0,4318	22,97	-0,0070

#### 4.3.5. Identidade dos modelos

As possibilidades de agrupamento de modelos foram avaliadas por meio do teste de Graybill, o qual testou a hipótese das equações serem semelhantes e a possibilidade de utilizar apenas um modelo para todo o conjunto de dados. Assim, ao comparar o modelo geral com os modelos individuais por espécies (TABELA 4. 10), o teste foi não significativo ( $F_{cal} < F_{tab}$ ) ao nível de 99% de probabilidade, indicando que não há diferenças entre os agrupamentos avaliados ao considerar os melhores modelos ajustados.

TABELA 4.10 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TESTE DE GRAYBILL PARA OS MODELOS GERAIS E REDUZIDOS.

Fontes de variação	GL	SQ	QM	F	F <sub>tab</sub> (1%)
Modelo completo	36	61336	-	-	-
Modelo reduzido	3	60241	-	-	-
Redução	33	1096	33,20	0,4631	0,6316
Resíduo	4594	329369	71,70	-	-
Total	4630	390705	-	-	-

Em que: GL = graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; F = teste F; e F<sub>tab</sub> = valor de F tabelado a 1% de significância.

Para avaliar as equações por estrato, foram realizadas 13 combinações, sendo a primeira a do modelo geral com a estratificação sugerida e as demais referentes aos 12 agrupamentos de espécies individuais e seus respectivos estratos. Com isso, o resultado foi não significativo para o modelo geral, indicando que as equações são estatisticamente semelhantes, não sendo necessário o ajuste de modelos por classes de diâmetro. Quanto às espécies, o teste foi significativo apenas para Guariúba e Pequiarana, resultando na necessidade da estratificação para as mesmas.

Nesse sentido, Queiroz et al. (2008), ao utilizarem o teste de Graybill para verificar a identidade de modelos de afilamento para *Mimosa scabrella* Benth., mencionaram que na ausência de significância, parte-se do princípio que a estratificação não é necessária. Adicionalmente, ao comparar o ajuste de modelos hipsométricos gerais com modelos estratificados por espécies, parcelas e classes de diâmetro, Curto et al. (2014) citaram que o teste foi não significativo, indicando que as estimativas com e sem estratificação não diferiram. Apesar disso, esses autores mencionaram que a estratificação proporcionou ganhos de precisão e o seu uso é uma decisão do pesquisador, conforme os objetivos de sua pesquisa. Dessa forma, para os modelos volumétricos abordados no presente estudo, recomenda-se a estratificação por espécie e por classe de tamanho como forma de reduzir a variabilidade dos dados e, logo, melhorar a precisão das estimativas.

#### 4.4. CONCLUSÕES

Os modelos de Schumacher e Hall e de Spurr logaritmo propiciam os melhores ajustes na composição de uma equação geral das espécies comerciais da Flona do Jamari, sendo recomendados, também, para equações individuais por espécie e por estrato. Os modelos de simples entrada apresentaram resultados satisfatórios, sendo recomendados para as estimativas.

A remoção dos *outliers* contribui para a melhora no ajuste dos modelos volumétricos por meio do aumento da correlação entre as variáveis, devendo ser considerada no ajuste de modelos volumétricos, podendo servir, ainda, como ferramenta de detecção de erros não amostrais.

A estratificação por classe de diâmetro e por espécie propicia maior precisão nas estimativas, sobretudo pela diminuição da variabilidade dos dados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALDER, D. **Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento com referencia especial a los trópicos**. Estudios FAO Montes, Roma, Itália. 1980. 118 p.

ALFASSI, Z. B.; BORGER, Z.; RONEN, Y. **Statistical Treatment of Analytical Data**. USA and Canadá: CRC Press LLC, 2005. 273p.

BAIMA, A.V.; SILVA, S. M. S.; SILVA, J. N. M. Equações de volume para floresta tropical de terra firme em Moju, PA. In: SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P.; YARED, J. A. G. (eds). **A Silvicultura na Amazônia Oriental: contribuições do projeto silvicultura tropical** (Embrapa/DFID). Embrapa Amazônia Oriental, v. 2, p. 367-392. 2001.

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

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

BATISTA, J. L. F.; MARQUESINI, M.; VIANA, V. M. Equações de volume para árvores de caxeta (*Tabebuia cassinoides*) no Estado de São Paulo e sul do Estado do Rio de Janeiro. **Scientia Forestalis**, n. 65, p.162-175, 2004.

BRANDEIS, T. J.; DELANEY, M.; PARRESOL, B. R.; ROYER, L. Development of equations for predicting Puerto Rican subtropical dry forest biomass and volume. **Forest Ecology and Management**, v. 233, p. 133 – 142. 2006.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 4. ed., atualizada e ampliada. Viçosa-MG, Editora UFV, 2013. 605 p.

CAVALCANTI, F. J. B., MACHADO, S. A., HOSOKAWA, R. T. Tamanho de unidade de amostra e intensidade amostral para espécies comerciais da Amazônia. **Floresta**, v. 39, n. 1, p. 207-214. 2009.

CAVALCANTI, F. J. B.; MACHADO, S. A.; HOSOKAWA, R. T. Metodologia para uso múltiplo e integrado de florestas tropicais na Amazônia. **Floresta**, v. 40, n. 2, p. 405-418, 2010.

CLUTTER, J.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V. BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L.. **Timber management: a quantitative approach**. New York, John Wiley e Sons, 1983. 333 p.

COLPINI, C.; TRAVAGIN, D. P.; SOARES, T. S.; SILVA, V. S. M. Determinação do volume, do fator de forma e da porcentagem de casca de árvores individuais em uma Floresta Ombrófila Aberta na região noroeste de Mato Grosso. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 39, n. 1, p. 97-104, 2009.

CUNHA, T. A. **Crescimento de espécies florestais madeiráveis como subsídio para o manejo florestal na Amazônia Ocidental**. 2013. 105 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria.

CURTO, R. A.; LOUREIRO, G. H.; MÔRA, R.; MIRANDA, R. O. V.; PÉLLICO NETTO, S.; SILVA, G. F. Relação hipsométricas em floresta estacional semidecidual. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 57, n. 1, p. 57 – 66. 2014.

DAVID, H. C.; MARINHESKI FILHO, A.; PELISSARI, A. L., PÉLLICO NETTO, S.; ARAÚJO, E. J. G.; BAUM, L. Critérios de estratificação para o ajuste de funções de afilamento em fustes de pinus. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n.79, p. 197 – 206. 2014.

DRAPPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analisys**. 3º Ed. New York, EUA:John Wiley e Sons, Inc. 1998. 704 p.

FERNANDES, N. P., JARDIM, F. C. S.; HIGUCHI, N. Tabelas de Volume para a Floresta de Terra-firme da Estação Experimental de Silvicultura Tropical. **Acta Amazonica**, v. 13, n. 3, p.537-545. 1983.

FIGUEIREDO FILHO, A. **Estudos de modelos matemáticos para estimar o volume por unidade de área em uma floresta tropical úmida na Amazônia brasileira**. 1983. 176 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

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.

GUJARATI, D. N. **Econometria Básica**. 3º ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2000, 846p.

HAIR, J. H.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. Traduzido por Adonai Schlup Sant'Ana e Anselmo Chaves Neto. **Análise Multivariada de Dados**. 5º ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 688p.

HEINSDIJK, D.; BASTOS, A. M. **Inventários florestais na Amazônia**. Boletim do Serviço Florestal, n. 6, 1963. 100p.

HERRERA, B.; CAMPOS, J. J.; FINEGAN, B.; ALVARADO, A. Factors affecting site productivity of a Costa Rican secondary rain forest in relation to *Vochysia ferruginea*, a commercially valuable canopy tree species. **Forest Ecology and Management**, v. 118, p. 73 – 81, 1999.

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

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

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2ª ed. revisada e ampliada. 2012. 271p.

LEITE, F. S.; RESENDE, A. V. Estimativa do volume de madeira partindo do diâmetro da cepa em uma área explorada de floresta amazônica de terra firme. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 69-79. 2010.

LIMA, A. J. N. **Avaliação de um sistema de inventário florestal contínuo em áreas manejadas e não manejadas do estado do Amazonas (AM)**. 2010. 181 p. Tese (Doutorado em Ciências de Florestas Tropicais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus.

LOETSCH, F.; ZÖHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest inventory**. Munich: BLV, 1973. v.2. 469p.

MACHADO, S. A.; FIGURA, M. A.; SILVA, L. C. R.; TÉO, S. J.; STOLLE, L.; URBANO, E. Modelagem volumétrica para bracinga (*Mimosa scabrella*) em povoamentos da Região Metropolitana de Curitiba. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n.56, p. 17-19. 2008.

MACHADO, S. A.; ACCIOLY, Y.; NASCIMETO, R. G. M.; SILVA, L. C. R.; CARDOZO, C. C. Influência do comprimento de copa na relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 83, p. 343 – 351. 2015.

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

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**, v.173, p. 335 – 354. 2004.

QUEIROZ, D.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E.; KOEHLER, H. S. Identidade de modelos em funções de afilamento para *Mimosa scabrella* Benth em

povoamentos nativos da região metropolitana de Curitiba/PR. **Floresta**, v. 38, n. 2., p. 339 – 349. 2008.

RADAMBRASIL. **Levantamento de Recursos Naturais**. Rio de Janeiro, 1988. 644p.

ROLIM, S. G.; COUTO, H. T. Z.; JESUS, R. M.; FRANÇA, J. T. Modelos volumétricos para a Floresta Nacional do Taipé-Aquirí, Serra dos Carajás. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 36, n. 1, p. 106-114, 2006.

ROMA, J. C.; ANDRADE, A. L. C. Economia, Concessões Florestais e a Exploração Sustentável de Madeira. IPEA, **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, n. 8, p. 91 – 96. 2013.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria Florestal: Técnica de regressão aplicada para estimar volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos da madeira**. Lavras: UFLA/FAEP, 1997. 292p.

SEGURA, M.; KANNINEN, M. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. **Biotropica**, Malden, v. 37, n. 1, p. 2 – 8, 2005.

SFB - SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. (2015). **Lei 11.184/06**, que dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável. Disponível em: <[www.sfb.gov.br](http://www.sfb.gov.br)>. (acesso: setembro de 2015).

SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P.; LOPES, J. C. A.; ALMEIDA, B. F.; COSTA, D. H.; OLIVEIRA, L. C.; VANCLAY, J. K.; SKOVSGAARD, J. P. Growth and yield of a tropical rain forest in the Brazilian Amazon 13 years after logging. **Forest Ecology and Management**, v. 71, n. 3, p. 267-274. 1995.

SILVA, J. N. M.; CARVALHO, M. S. P. DE. Equações de volume para uma floresta secundária no planalto do Tapajós, Belterra, Pará. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 8 / 9, p. 26 - 34. 1984.

SILVA, J. N. M.; ARAÚJO, S. M. A. Equação de volume para árvores de pequeno diâmetro na Floresta Nacional do Tapajós. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 8/9, p. 16-25. 1984.

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

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.

SOUZA, C. A. M.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; SILVA, G. F. THOMAS, C. Eficiência de um modelo de afilamento ajustado com e sem estratificação por classe de quociente de forma para a formação dos sortimentos de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 1, p. 125 – 135. 2012.

TER STEEGE, H.; PITMAN, N.C.A.; SABATIER, D.; et al. Hyperdominance in the Amazonian Tree Flora. **Science**, v. 342, n.6156, p. 324-334. 2013.

THAINES, F.; BRAZ, E. M.; MATTOS, P. P.; THAINES, A. A. R. Equações para a estimativa de volume de madeira para a região da bacia do Rio Ituxi, Lábrea, AM. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 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**, v. 35, n. 82, p. 11 – 117. 2015.

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

ZACHOW, R. **Modelo de uso múltiplo dos recursos naturais da Floresta Nacional do Jamari**. 1991. 199 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.

## 5. AGRUPAMENTO DE ESPÉCIES COMERCIAIS PARA MODELAGEM VOLUMÉTRICA EM UMA FLORESTA OMBRÓFILA Densa NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA

### RESUMO

A diversidade das florestas tropicais naturais envolve grande complexidade e dificuldade para a interpretação dos dados que subsidiam seu manejo, conservação e compreensão teórica. O agrupamento das espécies, de acordo com características de interesse, apresenta grande valia para a redução do número de equações volumétricas para uma quantidade gerenciável e para a solução de problemas de amostragem das espécies raras com baixa densidade amostral. Assim, o objetivo do presente estudo foi agrupar 32 espécies comerciais amazônicas com base nos coeficientes de regressão do modelo de Schumacher e Hall ajustado e na combinação deles com as respectivas estatísticas de ajuste. Para isso, uma abordagem em dois estágios foi empregada, na qual, no primeiro, a análise de agrupamento foi aplicada para classificar as espécies de maior intensidade de amostragem ( $n > 30$ ), e, no segundo, a análise discriminante foi utilizada para alocar as espécies pouco amostradas ( $n < 30$ ) nos grupos formados. Essa abordagem se mostrou adequada para o agrupamento de espécies madeireiras da Floresta Amazônica, reduzindo a necessidade de equações de volume para as espécies individuais e formando grupos consistentes para a aplicação de análise de regressão.

**Palavras chave:** Floresta tropical, Espécies madeireiras, Equações de volume, Análise multivariada.

### ABSTRACT

The diversity of natural tropical forests involves high complexity and difficulty for interpreting the data that support its management, conservation and theoretical knowledge. The species grouping, according to the characteristics of interest, has great value in the study of these forests by reducing the number of volumetric equations to a more manageable quantity and solving the sampling problem of poorly sampled rare species. In this study, the objective was to group 32 Amazonian commercial species based on regression coefficients of the Schumacher e Hall classical model and their combination with the respective adjustment statistics. For that, a two stages approach was used, in which, in the first moment, cluster analysis was applied to classify the sampled species ( $n > 30$ ), and, in the second, discriminant analysis was used to allocate the poorly sampled species ( $n < 30$ ) in groups already formed. This approach was adequate for grouping amazon timber species, reducing volume equations requirements for individual species and forming consistent groups to achievement regression.

**Keywords:** Tropical Rainforest, Timber species, Volume equations, Multivariate analysis.

## 5.1. INTRODUÇÃO

As florestas tropicais representam o mais diversificado ecossistema terrestre (TURNER, 2001), caracterizadas por um grande número de espécies com hábitos de crescimento bastante diferenciados (VANCLAY, 1991). A Floresta Amazônica compõe um dos conjuntos mais ricos em espécies vegetais do planeta, abrigando aproximadamente 16 mil espécies arbóreas (TER STEEGE et al., 2013). No entanto, devido à redução intensa de sua área, sobretudo pela exploração madeireira ilegal e pelo avanço da fronteira agrícola, a gestão sustentável dessas florestas tornou-se imperativa (GUTIERREZ-VELEZ e MACDICKEN, 2008). Para Phillips et al. (2002), o manejo, a conservação e a compreensão teórica das florestas tropicais dependem fundamentalmente dos dados coletados sobre as mesmas.

Considerando a complexidade estrutural das florestas tropicais, a modelagem volumétrica de todo o conjunto de dados dendrométricos pode acarretar em elevados erros de estimativa e, ainda, ocultar descritores importantes sobre essas florestas, enquanto o processamento baseado em espécies individuais envolve maior complexidade e dificuldade de interpretação (PHILLIPS et al., 2002; AKINDELE e LEMAY, 2006), devido, principalmente, à elevada diversidade de espécies arbóreas nos trópicos (WRIGHT, 2001). Assim, a agregação de espécies em grupos tende a reduzir o número de equações, evitando-se a necessidade de equações específicas para espécies com baixa intensidade amostral (VANCLAY, 1991).

Dessa forma, vários métodos têm sido utilizados para o agrupamento de espécies arbóreas tropicais (AKINDELE e LEMAY, 2006). Nos estudos de enfoque ecológico, muitas vezes as espécies são agrupadas de acordo com características ecológicas comuns, como: ciclo de vida, reprodução, propagação, ritmo de crescimento, capacidade fotossintética e regeneração (SWAINE e WHITMORE, 1988; WHITMORE, 1989). No entanto, além das informações ecológicas das espécies tropicais ainda serem escassas, essa classificação pode inserir subjetividade na formação de grupos para o ajuste de equações de volume, sobretudo pelo fato de existir grande variabilidade na arquitetura dos fustes até mesmo entre os indivíduos de uma mesma espécie.

As análises multivariadas de agrupamento são as mais empregadas para a classificação e ordenamento de dados dendrométricos de florestas naturais (MATTEUCCI e COLMA, 1982; SOUZA et al., 1990). Essas técnicas geram classificações objetivas, excluindo os aspectos subjetivos existentes em outros métodos de ordenamento (CHUMAN e ROMPORTL, 2010). Nessas análises, os objetos analisados são interligados por meio de uma

hierarquia de níveis, nas quais os mais semelhantes se unem formando grupos e subgrupos, até que todos os objetos estejam unidos, em que a distância existente entre os objetos e os grupos é reflexo da similaridade existente entre eles (LEPS e SMILAUER, 1999).

Na área florestal, exemplos de aplicação de agrupamentos para análise de dados são encontrados em ajuste de modelos volumétricos (AKINDELE e LEMAY, 2006), estudos de crescimento e produção florestal (VANCLAY, 1991; KÖHLER e HUTH, 1998; PHILLIPS et al., 2002), estratificação da produção florestal (SOUZA e SOUZA, 2006), investigações fitogeográficas (OLIVEIRA FILHO e FONTES, 2000) e estudos sobre padrões de distribuição das espécies tropicais (PLOTKIN et al., 2002). Para o ajuste de modelos volumétricos em florestas naturais, o agrupamento de espécies por características dendrométricas pode resultar em diversas vantagens, como: possibilidade de obtenção de resultados superiores aos de equações individuais; menor número de equações; solução do problema de amostragem para espécies com baixo número de amostras; e, por não seguir padrões ecológicos na classificação das espécies, evitar subjetividades na concepção de grupos (AKINDELE e LEMAY, 2006).

Com base no exposto, torna-se necessário o aprimoramento das técnicas de agrupamento de espécies comerciais da Floresta Amazônica, visando o ajuste de modelos volumétricos. Portanto, o objetivo neste trabalho foi agrupar 32 espécies comerciais amazônicas com base nos coeficientes de regressão do modelo de Schumacher e Hall ajustado e na combinação deles com as respectivas estatísticas de ajuste, empregando uma abordagem multivariada em dois estágios com análises de agrupamento e discriminante.

## 5.2. MATERIAL E MÉTODOS

### 5.2.1. Área de estudo e coleta de dados

Localizada no Sudoeste da Floresta Amazônica entre as coordenadas geográficas 09° 00' 00'' S a 09° 30' 00'' S e 62° 44' 05'' W a 63° 16' 64'' W, a Floresta Nacional do Jamari (FLONA) foi a pioneira em concessões florestais no Brasil, sendo dividida atualmente em três Unidades de Manejo Florestal independentes (SFB, 2015). A FLONA ocupa uma área de aproximadamente 220.000 hectares, onde predominam as tipologias de Floresta Ombrófila Densa e Aberta (IBGE, 2012). O clima da região, segundo a classificação dos tipos climáticos de Köppen, é Tropical Chuvoso do tipo Aw, com período seco bem definido na estação do inverno, precipitação média anual em torno de 2.400 mm e temperatura média anual de 25° C.

Foram utilizados dados de 5.230 árvores cubadas de 32 espécies comerciais exploradas entre os anos de 2014 e 2015. O método de Smalian foi adotado para a cubagem, sendo realizada durante as atividades de arraste e romaneio das toras. Contudo, devido à elevada variabilidade dos dados, na etapa de pré-processamento foram detectados e excluídos os valores discrepantes por meio do teste de Grubbs (GRUBBS, 1969) e da análise gráfica da dispersão entre as variáveis. Após a exclusão das discrepâncias e separação de uma amostra independente para validação, restaram no banco de dados 4366 árvores-amostra, utilizadas para as análises.

### 5.2.2. Análise dos dados

O modelo de Schumacher e Hall (5.1) foi ajustado primeiramente para cada uma das 32 espécies e posteriormente para os grupos formados na análise de agrupamento e discriminante. Para isso, foi utilizado o modelo em sua forma linear e logarítmica, apresentado em função das variáveis independentes: diâmetro à altura do peito e altura comercial (CLUTTER et al., 1983).

$$\ln(v) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(d) + \beta_2 \cdot \ln(hc) \quad (5.1)$$

Em que:  $v$  = volume comercial ( $m^3$ );  $d$  = diâmetro à altura do peito medido a 1,3 m do solo (cm);  $hc$  = altura comercial compreendida entre a base da árvore e seu ponto de inversão morfológica (m); e  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  = coeficientes de regressão.

Em uma primeira etapa, a análise de agrupamento foi aplicada para a construção de grupos de espécies com base nos coeficientes ( $\beta$ ) do modelo de Schumacher e Hall ajustado para as 21 espécies de maior densidade amostral ( $n > 30$ ), conforme metodologia aplicada por Akindele e LeMay (2006); e, como um método alternativo, foi proposto a combinação desses coeficientes com as respectivas estatísticas de ajuste: erro padrão da estimativa (Syx%) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ), para o agrupamento das espécies. Para isso, o método da média e a distância euclidiana foram utilizados na análise de agrupamento (AKINDELE e LEMAY, 2006; PHILLIPS et al., 2002), sendo calculado o coeficiente de correlação cofenética para avaliar o grau de ajuste entre a matriz original dos coeficientes de distância e a matriz resultante do processo de agrupamento na formulação de dendrogramas (ROHLF, 1970), com base na formulação apresentada por Albuquerque (2005). O ponto de corte empregado na análise de agrupamento foi determinado segundo o método gráfico, plotando os

coeficientes de fusão dos grupos e as respectivas distâncias de similaridade, em que a primeira tendência de estabilização indicou o ponto corte nos dendrogramas (REIS, 1997; ALBUQUERQUE, 2005). As análises foram realizadas com auxílio do *software* SAS 9.0., por meio do procedimento PROC CLUSTER.

$$d_{x,y} = \sqrt{\sum_{j=1}^j (x_j - y_j)^2} \quad (5.2)$$

Em que:  $d_{x,y}$  = distância euclidiana entre os agrupamentos; e  $x_j$  e  $y_j$  = vetores de distância que foram analisados.

$$rcof = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (c_{ij} - \bar{c})(d_{ij} - \bar{d})}{\left(\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (c_{ij} - \bar{c})^2\right)^{1/2} \left(\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (d_{ij} - \bar{d})^2\right)^{1/2}} \quad (5.3)$$

Sendo:

$$\bar{c} = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_{ij}; \quad (5.4)$$

$$\bar{d} = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij} \quad (5.5)$$

Em que:  $rcof$  = coeficiente de correlação cofenética;  $c_{ij}$  = distância entre os indivíduos  $i$  e  $j$  na matriz cofenética;  $d_{ij}$  = distância entre os mesmos indivíduos na matriz original; e  $n$  = dimensão da matriz.

Na segunda etapa, a análise discriminante foi utilizada com o intuito de alocar as 11 espécies de baixa densidade amostral ( $n < 30$ ) nos grupos pré-existentes, conforme a abordagem apresentada por Akindele e LeMay (2006). Essa análise buscou identificar as áreas ocupadas por grupos, podendo atribuir novas observações a eles a partir da decisão de qual grupo possui a amplitude de variáveis descritivas que englobam de forma mais adequada a nova observação (PHILLIPS et al., 2002). Para isso, a função linear de Fisher foi utilizada visando transformar as observações multivariadas em univariadas ou combinações lineares, as quais separam populações tanto quanto possível (JOHNSON e WICHERN, 1998). A fim de avaliar a eficácia da análise e a discriminação entre os grupos, o teste lambda de Wilks foi aplicado, o qual, segundo Rencher (2002), historicamente tem desempenhado papel dominante em análises de variância multivariada, devido sua eficácia e flexibilidade. As

análises foram efetuadas por meio do *software* estatístico Statgraphics Centurion XVI (version 16.1.02).

$$D_m^2(x) = (x - \bar{x}_m)' COV^{-1} (x - \bar{x}_m) \quad (5.6)$$

Em que:  $D_m^2(x)$  = função discriminante linear de Fisher;  $x$  = valor médio dos vetores;  $\bar{x}_m$  = centroide dos agrupamentos; e  $COV$  = matriz de covariância.

$$\Lambda = \prod_{j=1}^M (1 - \widehat{\lambda}_{(j)}) = \frac{|S_{yy}^{-1} S_{yx} S_{xx}^{-1} S_{xy}|}{S_{yy}} \quad (5.7)$$

Em que:  $\Lambda$  = lambda de Wilks; e  $\widehat{\lambda}_{(j)}$  = quadrado da correlação canônica.

A comparação das equações ajustadas ocorreu por meio das estatísticas usuais de ajuste, sendo elas: o coeficiente de determinação ( $R^2$ ); e o erro padrão da estimativa ( $S_{yx}\%$ ). A avaliação da qualidade dos ajustes foi também fundamentada pela análise gráfica dos resíduos, que, segundo Drapper e Smith (1998), é determinante na escolha do modelo de regressão, mesmo que os demais critérios estatísticos indiquem a seleção de outro modelo.

$$R^2 = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right) \quad (5.8)$$

$$S_{yx}\% = \left[ \frac{\left( \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sqrt{(n-p)}} \right)}{\bar{y}} \right] \cdot 100 \quad (5.9)$$

Em que:  $y_i$  = valor observado;  $\hat{y}_i$  = valor estimado pelo modelo;  $n$  = número de observações;  $p$  = número de coeficientes do modelo; e  $\bar{y}$  = média dos valores observados da variável dependente.

### 5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.3.1. Ajuste do modelo de Schumacher e Hall para as espécies individuais

Na Tabela 5.1 estão apresentados os coeficientes de regressão e as estatísticas de ajuste do modelo de Schumacher e Hall ajustado para 32 espécies comerciais da Floresta Amazônica. A importância econômica das espécies madeireiras analisadas é um fato conhecido nas florestas tropicais (HERRERA et al., 1999; AKINDELE e LEMAY, 2006; IGBINOSA e AMOO, 2014), principalmente na Amazônia brasileira (RIZZINI, 1990; IBAMA, 1997; COLPINI et al., 2009; TONINI e BORGES, 2015), constituindo objetos de diversos planos de manejo florestal e, também, da exploração madeireira ilegal.

TABELA 5.1 - COEFICIENTES DE REGRESSÃO E ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DO MODELO VOLUMÉTRICO DE SCHUMACHER e HALL AJUSTADO PARA 32 ESPÉCIES COMERCIAIS DA FLORESTA AMAZÔNICA.

Espécie	n	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$S_{yx}\%$	$R^2$
<i>Astronium lecointei</i> Ducke	640	-8,210	1,662	0,922	24,60	0,686
<i>Peltogyne paniculata</i> Benth.	623	-5,303	1,093	0,742	25,12	0,451
<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	456	-6,738	1,538	0,738	36,01	0,498
<i>Couratari stellata</i> A. C. Sm.	420	-7,955	1,656	0,880	28,77	0,612
<i>Hymenolobium heterocarpum</i> Ducke	264	-8,092	1,644	0,975	31,82	0,702
<i>Clarisia racemosa</i> Ruíz e Pav.	245	-6,891	1,473	0,760	17,65	0,677
<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Willd.	242	-7,801	1,668	0,798	27,51	0,721
<i>Qualea paraensis</i> Ducke	207	-7,366	1,633	0,679	22,30	0,688
<i>Goupia glabra</i> Aubl.	156	-7,295	1,599	0,726	28,84	0,664
<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J.F.Macbr.	127	-7,684	1,625	0,827	32,32	0,608
<i>Caryocar glabrum</i> Pers.	121	-6,390	1,423	0,696	27,82	0,662
<i>Brosimum rubescens</i> Taub.	108	-7,658	1,525	0,948	24,32	0,652
<i>Cariniana micrantha</i> Ducke	104	-7,996	1,682	0,883	29,70	0,672
<i>Erismia bicolor</i> Ducke	84	-7,712	1,654	0,759	23,48	0,802
<i>Erismia fuscum</i> Ducke	74	-6,718	1,447	0,740	17,14	0,825
<i>Hymenaea intermedia</i> Ducke	63	-6,094	1,527	0,452	20,28	0,750
<i>Allantoma decandra</i> (Ducke)	60	-8,444	1,929	0,607	24,00	0,958
<i>Caryocar villosum</i> (Aubl.) Pers.	59	-7,969	1,806	0,654	33,95	0,435
<i>Pouteria guianensis</i> Aubl.	55	-5,448	1,047	0,841	20,96	0,961
<i>Handroanthus incanus</i> (A.H. Gentry) S. O. Grose	51	-8,516	2,023	0,492	26,10	0,794
<i>Cedrelinga cateniformis</i> (Ducke) Ducke	47	-8,038	1,781	0,717	46,67	0,380
<i>Mezilaurus synandra</i> (Mez) Kosterm.	25	-8,691	1,997	0,574	22,74	0,792
<i>Bowdichia nitida</i> Spruce ex Benth.	24	-5,970	1,478	0,459	19,12	0,681
<i>Cordia goeldiana</i> Huber	20	-8,549	1,904	0,684	11,27	0,934
<i>Simarouba amara</i> Aubl.	20	-9,637	1,952	0,969	15,31	0,869
<i>Bagassa guianensis</i> Aubl.	12	-1,784	1,062	-0,366	32,04	0,289
<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	12	-8,365	1,581	1,055	30,42	0,729
<i>Diptotropis rodriguesii</i> H.C. Lima	12	-2,069	0,582	0,363	21,61	0,166
<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach.	11	-7,629	1,565	0,840	13,86	0,843
<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart.ex DC.) Mattos	11	-6,144	1,421	0,716	33,23	0,259
<i>Peltogyne venosa</i> Spruce ex. Benth.	8	-3,018	0,104	1,372	25,25	0,778
<i>Dipteryx alata</i> Vogel	5	-10,655	2,805	0,172	25,41	0,811

Em que: n = número de indivíduos amostrados;  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  = coeficientes de regressão;  $S_{yx}\%$  = erro padrão da estimativa relativo; e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

Os dados apresentaram elevada amplitude de variação, com diâmetros e alturas comerciais variando de 50 a 200 cm e de 5,2 a 40,7 m, respectivamente após a exclusão de valores discrepantes, sendo um procedimento comum no estudo de florestas tropicais heterogêneas, uma vez que são caracterizadas pela diversidade estrutural e florística (AKINDELE e LEMAY, 2006; HOPKINS, 2007; TER STEEGE et al., 2013) e pela presença de indivíduos arbóreos seculares de grande porte (CHAMBERS et al., 1998; WORBES e JUNK, 1999).

Quanto ao número de árvores-amostra por espécie (n), a variação refletiu as características estruturais típicas de florestas inequiâneas, ocorrendo um grupo de espécies com baixa frequência e localmente raras (CONDIT et al., 2000; PLOTKIN et al., 2000) e outro de espécies comuns, que ocorrem de forma ampla e frequente (TER STEEGE et al., 2013), ocasionando a formação de dois grupos quanto à densidade de amostras. Além disso, a oferta de mercado de uma determinada espécie pode ser um fator determinante no número de árvores exploradas e cubadas em romaneio, afetando a disponibilidade de amostras específicas.

A pronunciada variabilidade dos dados refletiu nas estatísticas de ajuste geradas, com  $S_{yx}\%$  de 11 a 46% e  $R^2$  de 0,16 a 0,96. Nesse sentido, Figueiredo Filho (1983) mencionou que a abundância de espécies florestais das mais variadas dimensões e a grande heterogeneidade etária das florestas tropicais afetam a forma das árvores, conferindo diversas peculiaridades e dificultando o emprego de fatores de forma e equações de volume individual. Além disso, Akindele e Le May (2006) acrescentaram que a heterogeneidade de espécies e da estrutura arbórea, até mesmo dentro de uma pequena área, constitui um importante desafio no desenvolvimento de funções de volume para as florestas naturais.

### 5.3.2. Análise de agrupamento e discriminante

Para as análises de agrupamento, o método gráfico utilizando o coeficiente de fusão (FIGURA 5. 1) indicou pontos de corte em diferentes níveis de homogeneidade, formando 8 e 4 grupos distintos (FIGURA 5. 2), respectivamente para o agrupamento com os coeficientes estimados para os modelos e a combinação desses com as estatísticas  $R^2$  e  $S_{yx}\%$ . No entanto, nos dois agrupamentos ocorreram grupos com apenas uma espécie, os quais foram incorporados no grupo mais próximo a cada um deles. Isso foi feito para possibilitar a aplicação da função discriminante de Fisher, que demanda variabilidade dentro dos grupos.

No agrupamento 1 *Hymenaea intermedia* e *Caryocar glabrum* foram unidas devido a proximidade, formando um novo grupo e no agrupamento 2, *Cedrelinga cateniformis* foi inserida no grupo mais próximo. De acordo com Akindele e LeMay (2006), a forma de agrupamento utilizada se baseia em métodos puramente estatísticos, assegurando a ausência da subjetividade presente nas classificações taxonômicas e ecofisiológicas, sugerindo que essa análise é apropriada e eficaz para o agrupamento de espécies tropicais madeireiras.

Os coeficientes de correlação cofenética calculados para os agrupamentos (0,813 e 0,721, respectivamente), foram superiores a 0,7, indicando um bom ajuste da matriz original à matriz gerada pelo processo de agrupamento. Nesse sentido, Albuquerque (2005) acrescentou que quanto mais próximo de 1 for esse valor, menor será a distorção provocada pelo método de agrupamento, evidenciando uma boa representação das matrizes de dissimilaridade pelos dendrogramas formados.

FIGURA 5.1 - MÉTODO GRÁFICO DO COEFICIENTE DE FUSÃO PARA DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE CORTE NAS ANÁLISES DE AGRUPAMENTO.

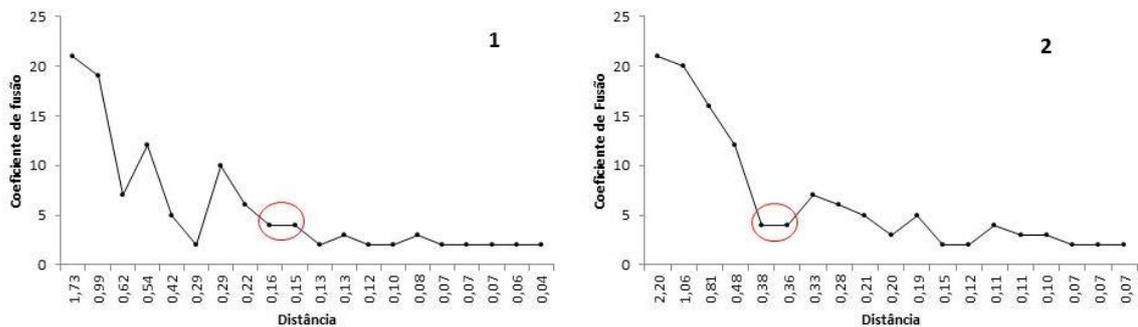
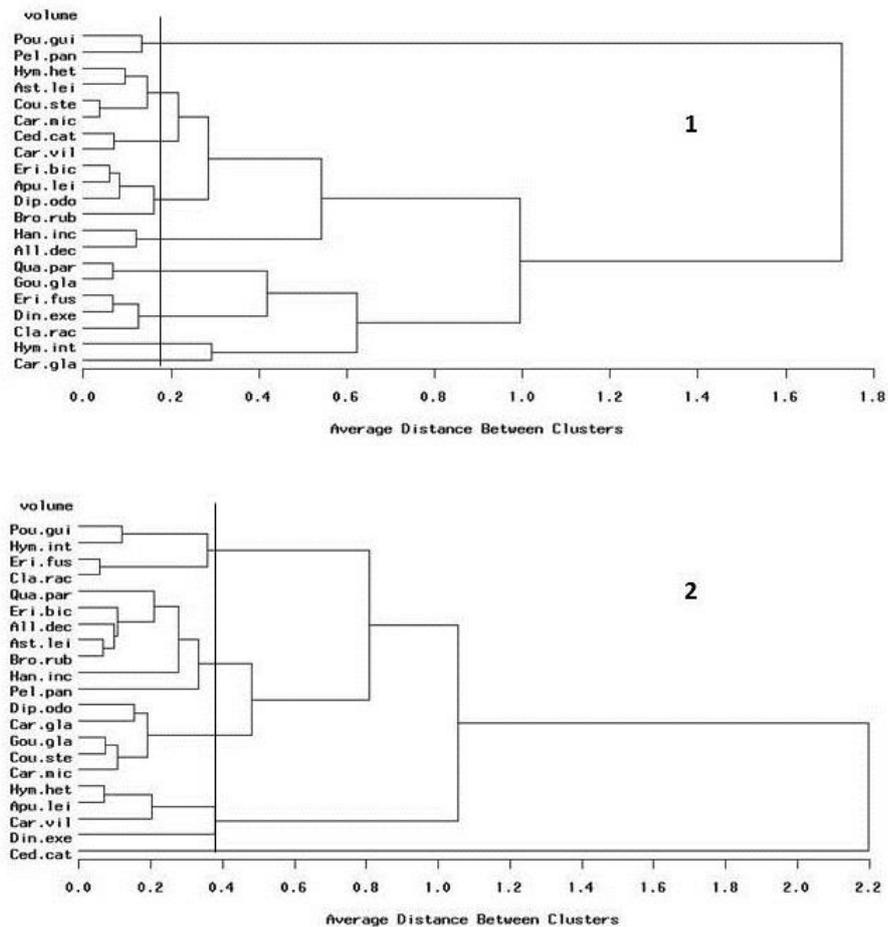


FIGURA 5.2 - DENDROGRAMAS DE SIMILARIDADE GERADOS PELA ANÁLISE DE AGRUPAMENTO UTILIZANDO OS COEFICIENTES DO MODELO AJUSTADO (1) E A COMBINAÇÃO DELES COM AS ESTATÍSTICAS DE AJUSTE (2).



A abordagem em dois estágios resultou nos grupos de espécies contidos na Tabela 5. 2. Para os dois agrupamentos utilizados, o teste de Wilks foi significativo ao nível de significância de 5%, evidenciando a discriminação entre os grupos formados. Ao comparar o grau de discriminação por meio do valor lambda de Wilks, o agrupamento 1 ( $\Lambda = 0,0005$ ) apresentou valor inferior ao 2 ( $\Lambda = 0,083$ ), indicando que nesse, a discriminação entre os grupos foi maior e que essa análise é apropriada para agregação de espécies comerciais quanto às suas formas, conforme mencionado por Akindele e LeMay (2006). No entanto, considerando a estrutura do agrupamento 1, com base apenas nos coeficientes, foi possível observar a agregação das duas espécies do gênero *Peltogyne* no mesmo grupo, podendo indicar a influência taxonômica na classificação, contrastando com o citado por Akindele e LeMay (2006), os quais mencionaram que essa abordagem não segue classificações ecológicas ou taxonômicas, evitando, assim, a subjetividade nas análises.

TABELA 5.2 - GRUPOS DE ESPÉCIES FORMADOS PELA ANÁLISE DE AGRUPAMENTO E DISCRIMINANTE.

Agrupamento 1			
Grupo 1	Grupo 3	Grupo 5	Grupo 7
<i>Pouteria guianensis</i>	<i>Cedrelinga cateniformis</i>	<i>Handroanthus incanus</i>	<i>Erisma fuscum</i>
<i>Peltogyne paniculata</i>	<i>Caryocar villosum</i>	<i>Allantoma decandra</i>	<i>Dinizia excelsa</i>
<i>Peltogyne venosa</i>		<i>Mezilaurus synandra</i>	<i>Clarisia racemosa</i>
<i>Diploptropsis rodriguesii</i>		<i>Dipteryx alata</i>	
		<i>Cordia goeldiana</i>	
Grupo 2	Grupo 4	Grupo 6	Grupo 8
<i>Hymenolobium heterocarpum</i>	<i>Erisma bicolor</i>	<i>Qualea paraensis</i>	<i>Hymenaea intermedia</i>
<i>Astronium leicontei</i>	<i>Apuleia leiocarpa</i>	<i>Goupia glabra</i>	<i>Caryocar glabrum</i>
<i>Couratari stellata</i>	<i>Dipteryx odorata</i>	<i>Manilkara elata</i>	<i>Bagassa guianensis</i>
<i>Cariniana micrantha</i>	<i>Brosimum rubescens</i>		<i>Bowdichia nitida</i>
<i>Simarouba amara</i>			<i>Handroanthus impetiginosus</i>
<i>Cedrela fissilis</i>			
Agrupamento 2			
Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
<i>Pouteria guianensis</i>	<i>Qualea paraensis</i>	<i>Dipteryx odorata</i>	<i>Hymenolobium heterocarpum</i>
<i>Hymenaea intermedia</i>	<i>Erisma bicolor</i>	<i>Caryocar glabrum</i>	<i>Apuleia leiocarpa</i>
<i>Erisma fuscum</i>	<i>Allantoma decandra</i>	<i>Goupia glabra</i>	<i>Caryocar villosum</i>
<i>Clarisia racemosa</i>	<i>Astronium leicontei</i>	<i>Couratari stellata</i>	<i>Dinizia excelsa</i>
<i>Bagassa guianensis</i>	<i>Brosimum rubescens</i>	<i>Cariniana micrantha</i>	<i>Cedrelinga cateniformis</i>
<i>Bowdichia nitida</i>	<i>Handroanthus incanus</i>	<i>Cedrela fissilis</i>	<i>Handroanthus impetiginosus</i>
<i>Cordia goeldiana</i>	<i>Peltogyne paniculata</i>		
<i>Diploptropsis rodriguesii</i>	<i>Dipteryx alata</i>		
<i>Manilkara elata</i>	<i>Mezilaurus synandra</i>		
<i>Peltogyne venosa</i>	<i>Simarouba amara</i>		

### 5.3.3. Ajuste e comparação das equações volumétricas por grupos de espécies

Na Tabela 5. 3 constam os coeficientes e as estatísticas do modelo ajustado para os dois agrupamentos utilizados, além das estatísticas de ajuste de cada grupo formado. Nos dois agrupamentos utilizados, os maiores erros de estimativa foram observados nos grupos formados por espécies de grande porte, como *Dinizia excelsa*, *Cedrelinga cateniformis* e *Hymenolobium heterocarpum*. Nesse sentido, ao desenvolver equações para volume e biomassa em uma floresta subtropical em Porto Rico, Brandeis et al. (2006) relacionaram os maiores erros de estimativa às maiores árvores como um fato típico das florestas naturais heterogêneas. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) variou de 0,44 a 0,81 entre os grupos formados nas análises (TABELA 5. 3), evidenciando uma correlação moderada entre as variáveis  $d$  e  $hc$  com o  $v$ . O modelo volumétrico de Schumacher e Hall com frequência é citado como um dos mais apropriados para estimativa do volume de árvores em florestas

tropicais (HIGUCHI e RAMM, 1995; ROLIM et al., 2006; AKINDELE e LEMAY, 2006; IGBINOSA e AMOO, 2014), logo, a abordagem de classificação baseada em seus coeficientes se torna adequada, visto que refletem de forma eficaz a forma das árvores.

TABELA 5.3 - COEFICIENTES DE REGRESSÃO E ESTATÍSTICAS DOS GRUPOS FORMADOS PELA ANÁLISE DE AGRUPAMENTO E DISCRIMINANTE, PARA O MODELO DE SCHUMACHER e HALL.

Grupo	n	S	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	Syx%	R <sup>2</sup>
<b>Agrupamento 1</b>							
1	698	4	-5,173	1,065	0,735	24,95	0,446
2	1459	6	-8,356	1,816	0,778	30,47	0,719
3	106	2	-7,995	1,792	0,687	41,11	0,450
4	561	4	-7,844	1,669	0,807	28,98	0,716
5	161	5	-8,549	1,999	0,542	23,10	0,816
6	374	3	-7,335	1,660	0,634	25,36	0,680
7	775	3	-8,990	1,934	0,854	42,99	0,629
8	231	5	-6,619	1,472	0,701	31,08	0,629
<b>Agrupamento 2</b>							
1	523	10	-6,595	1,412	0,745	21,31	0,725
2	1823	10	-7,577	1,573	0,838	25,99	0,755
3	1055	6	-8,061	1,700	0,853	31,42	0,776
4	964	6	-7,809	1,726	0,773	37,97	0,552

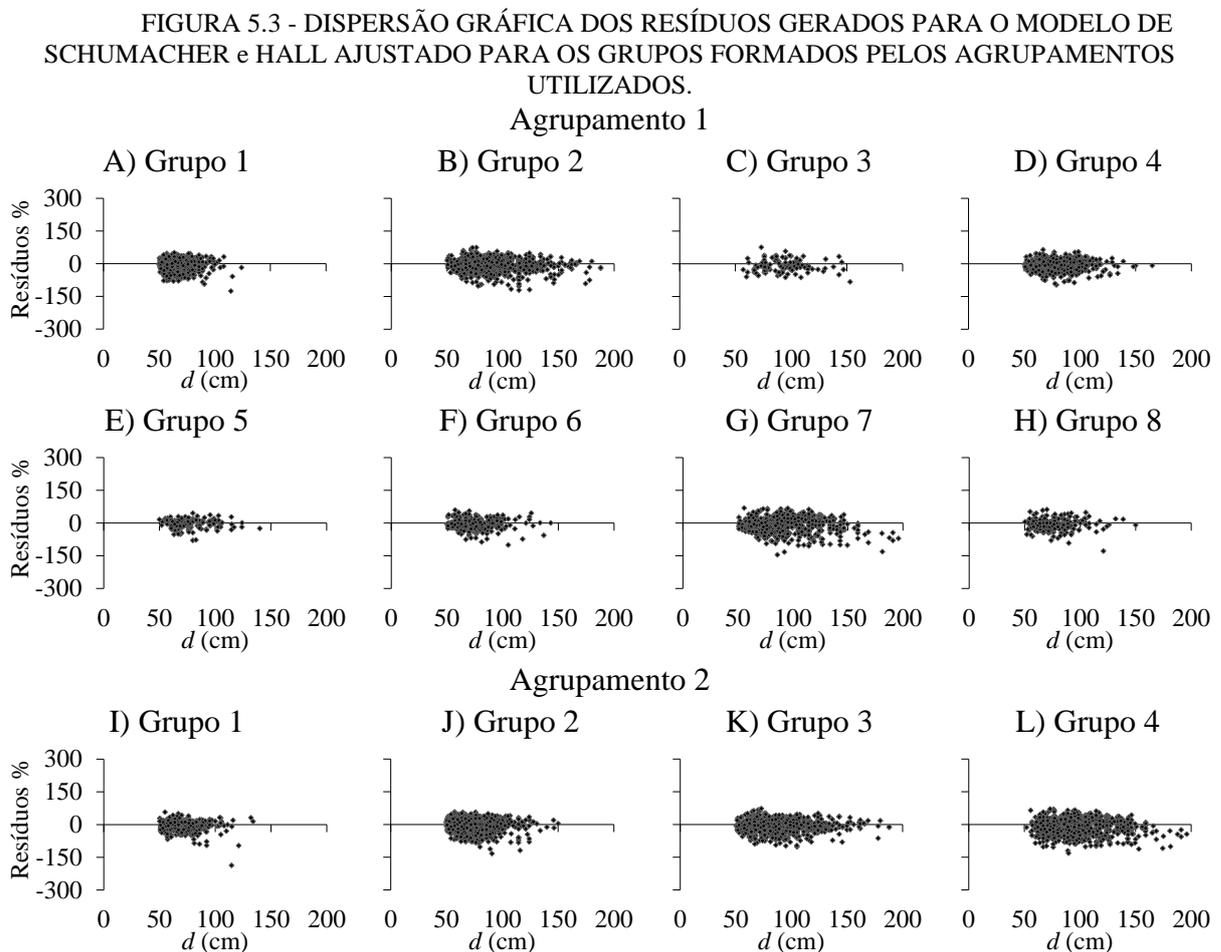
Em que: n = número de indivíduos amostrados; S = número de espécies amostradas;  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  = coeficientes de regressão; Syx% = erro padrão da estimativa relativo; e R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação.

Comparando os dois métodos de classificação empregados, o agrupamento 2 apresentou o melhor desempenho, uma vez que utilizou a combinação dos coeficientes de regressão com as respectivas estatísticas de ajuste como variáveis classificatórias. Esse agrupamento manteve os erros (S<sub>yx</sub>%) estáveis nos grupos formados, com a redução do erro para algumas espécies, como: *Cedrelinga cateniformis*, *Bagassa guianensis*, *Peltogyne venosa* e *Handroanthus incanus*. Outra vantagem apresentada pelo método proposto, é a utilização de apenas 4 equações para a estimativa volumétrica das 32 espécies comerciais analisadas.

O agrupamento 1 efetuado com base apenas nos coeficientes do modelo ajustado, apesar de reduzir o erro de estimativa (S<sub>yx</sub>%) para algumas espécies, elevou substancialmente o S<sub>yx</sub>% em dois grupos, acarretando em valores superiores a 40%. Esse agrupamento gerou 8 grupos, sendo necessário o emprego do dobro de modelos volumétricos. Esses resultados contrastaram com o indicado pelo coeficiente de correlação cofenética e pelo teste Wilks, os quais apontaram o agrupamento 1 como o mais consistente e com maior discriminação entre os grupos formados. Logo, as estatísticas para avaliação das análises multivariadas não

garantiram a seleção do melhor método de agrupamento para o ajuste de modelos volumétricos por grupos. Isso corroborou com Johnson e Wichern (1992), ao mencionarem, como fragilidade dessas análises, a ausência de estatísticas confiáveis para sua avaliação.

A análise gráfica dos resíduos (FIGURA 5.3), como meio decisivo para escolha de modelos de regressão (DRAPPER e SMITH, 1998), ratificou a decisão pelo emprego das equações geradas para os grupos do agrupamento 2. Nesse, os grupos 1, 2 e 3 apresentaram resíduos distribuídos de forma homogênea por toda linha de regressão. No entanto, o modelo ajustado para o grupo 4 apresentou tendências de superestimativa, sobretudo, devido à influência da variabilidade das árvores de grande porte, ao passo que no agrupamento 1 essas tendências foram evidentes nos grupos 3, 7 e 8.



Ao elaborar funções de volume apropriadas para espécies em duas florestas tropicais úmidas na Nigéria, Igbinsa e Amoo (2014) empregaram uma classificação taxonômica, agrupando as espécies da família Fabaceae de acordo com as subfamílias. Esses autores ressaltaram que o método proposto foi baseado na proximidade da variabilidade

intraespecífica entre as espécies de uma mesma subfamília, garantindo uma classificação segundo atributos ecomorfológicos. Como resultado, encontraram melhores resultados no ajuste dos modelos volumétricos por grupos, quando comparados com um modelo geral. No presente estudo, os elevados erros encontrados evidenciaram a alta heterogeneidade dos dados, até mesmo dentro de uma mesma espécie, mostrando que a classificação taxonômica não seria adequada.

A ausência de dados para geração de modelos consistentes de algumas espécies tropicais é citada por diversos autores (PHILLIPS et al., 2002; AKINDELE e LEMAY, 2006; IGBINOSA e AMOO, 2014), sobretudo devido à diversidade dessas florestas ser caracterizada pela presença de muitas espécies raras (HOPKINS, 2007; TER STEEGE et al., 2013), sendo necessário, por consequência, o levantamento florestal de extensas áreas. Nesse sentido, o método de agrupamento de espécies em florestas tropicais é citado por Vanclay (1991) como uma vantagem, por meio do qual o número de equações é reduzido para um número mais gerenciável, facilitando, assim, o processamento e análise dos dados, conforme observado no presente estudo.

#### 5.4. CONCLUSÕES

A abordagem multivariada em dois estágios, com análises de agrupamento e discriminante, é adequada para a composição de grupos de espécies comerciais da Floresta Amazônica. Esse método, além de reduzir a necessidade de equações de volume para as espécies individuais, minimiza o problema da baixa densidade de dados para determinadas espécies, ao formar grupos consistentes para a análise de regressão.

O agrupamento testado neste estudo apresenta melhor desempenho na agregação de espécies para o ajuste de modelos volumétricos, o que propicia a estabilização do erro e a geração de um menor número de equações. Essas equações geradas são uma importante ferramenta para a avaliação do estoque comercial de espécies amazônicas, permitindo a otimização das estimativas volumétricas por meio de equações confiáveis para todas as espécies comerciais em grupos.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

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

ALBUQUERQUE, M. A. **Estabilidade em análise de agrupamento (cluster analysis)**. 2005. 62 p. Dissertação (Mestrado em Biometria) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2005.

BRANDEIS, T. J.; DELANEY, M.; PARRESOL, B. R.; ROYER, L. Development of equations for predicting Puerto Rican subtropical dry forest biomass and volume. **Forest Ecology and Management**, v. 233, p. 133-142, 2006.

CHAMBERS, J. Q.; HIGUCHI, N.; SCHIMEL, J. P. Ancient trees in Amazonia. **Nature**, v. 391, n. 6663, p. 135-136, 1998.

CHUMAN, T.; ROMPORTL, D. Multivariate classification analysis of cultural landscapes: an example from the Czech Republic. **Landscape and Urban Planning**, v. 98, p. 200-209, 2010.

CLUTTER, J.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L.. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley e Sons, 1983. 333 p.

COLPINI, C.; TRAVAGIN, D. P.; SOARES, T. S.; SILVA, V. S. M. Determinação do volume, do fator de forma e da porcentagem de casca de árvores individuais em uma Floresta Ombrófila Aberta na região noroeste de Mato Grosso. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 1, p. 97-104, 2009.

CONDIT, R.; ASHTON, P.; BAKER, P.; BUNYAVEJCHEWIN, S; GUNATILLEKE, S.; GUNATILLEKE, N.; HUBBELL, S. P.; FOSTER, R. B.; ITOH, A.; LAFRANKIE, J.V.; LEE, H.S.; LOSOS, E.; MANOKARAN, N.; SUKUMAR, R.; YAMAKURA, T. Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. **Science**, v. 288, p. 1414-1418. 2000.

DRAPPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3<sup>a</sup> ed. New York: John Wiley e Sons, Inc. 1998. 704 p.

FIGUEIREDO FILHO, A. **Estudos de modelos matemáticos para estimar o volume por unidade de área em uma floresta tropical úmida na Amazônia brasileira**. 1983. 176 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1983.

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

GUTIERREZ-VELEZ, V. H.; MACDICKEN, K. Quantifying the direct social and governmental costs of illegal logging in the Bolivian, Brazilian, and Peruvian Amazon. **Forest Policy and Economics**, v. 10, n. 4, p. 248-256, 2008.

HERRERA, B.; CAMPOS, J. J.; FINEGAN, B.; ALVARADO, A. Factors affecting site productivity of a Costa Rican secondary rain forest in relation to *Vochysia ferruginea*, a

commercially valuable canopy tree species. **Forest Ecology and Management**, v. 118, p. 73-81, 1999.

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

HOPKINS, M.J.G. Modeling the known and unknown plant biodiversity of the Amazon Basin. **Journal of Biogeography**, v. 34, n.8, p. 1400-1411. 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA Madeiras da Amazônia: características e utilização - Amazônia Oriental. Brasília: CNPq, 1997. 141p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Série Manuais Técnicos em Geociências 1, 2º edição revista e ampliada. IBGE, Rio de Janeiro. 2012. 271 p.

IGBINOSA, A. H.; AMOO, O. B. Appropriate Volume Functions for Leguminosae Family in Two Tropical Rainforests in Cross River State, Nigeria. **Journal of Environment and Ecology**, v. 5, n. 2, p. 206–221. 2014.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 3º ed. New Jersey: Prantice Hall, 1992. 642 p.

KOHLER, P.; HUTH, A. The effects of tree species grouping in tropical rainforest modelling: simulations with the individual based model FORMIND. **Ecological Modeling**, v. 109, p. 301-321, 1998.

LEPS, J.; SMILAUER, P. **Multivariate Analysis of Ecological Data**. Faculty of Biological Sciences, University of South Bohemia České Budějovice, 1999. 110 p.

MATTEUCCI, S. D.; COLMA, A. **Metodologia para el estudio de la vegetación**. Washington: The General Secretary of the Organization of American States, 1982. 167 p.

OLIVEIRA FILHO, A. T., FONTES, M. A. L. Patterns of floristic differentiation among Atlantic Forests in Southeastern Brazil and the influence of climate. **Biotropica** v. 32, n. 4, p. 793-810. 2000.

PHILLIPS, P. D.; YASMAN, I.; BRASH, T. E.; VAN GARDINGEN, P. R. Grouping tree species for analysis of forest data in Kalimantan (Indonesia Borneo) **Forest Ecology and Management**, v. 157, p. 205–216, 2002.

PLOTKIN, J. B., CHAVE, J., ASHTON, P. S. Cluster analysis of spatial patterns in Malaysian tree species. **The American Naturalist**, v. 160, n. 5, p. 629-644. 2002.

REIS, E. **Estatística multivariada aplicada**, Lisboa: Edições Silabo, 1997. 342 p.

RENCHE, A. C. **Methods of multivariate analysis**. 2th ed. New York: Wiley-interscience, 2002. 708 p.

RIZZINI, C. T. **Árvores e Madeiras Úteis do Brasil – Manual de Dendrologia Brasileira**. 2. ed. São Paulo. Edgard Blucher Ltda, 1990. 304 p.

ROHLF, F. J. Adaptive hierarchical clustering schemes. **Systematic Zoology**, v. 19, n. 1, p. 58-82, 1970.

ROLIM, S. G.; COUTO, H. T. Z.; JESUS, R. M.; FRANÇA, J. T. Modelos volumétricos para a Floresta Nacional do Taipé-Aquirí, Serra dos Carajás. **Acta Amazonica**, v. 36, n. 1, p. 106-114, 2006.

SOUZA, A. L.; SOUZA, D. R. Análise multivariada para estratificação volumétrica de uma floresta ombrófila densa de terra firme, Amazônia Oriental. **Revista Árvore**, v. 30, n. 1, p. 49-54, 2006.

SOUZA, A. L.; HOSOKAWA, R. T.; KIRCHNER, F. F.; MACHADO, S. A. Análises multivariadas para manejo de floresta natural na Reserva Florestal de Linhares, Espírito Santo: análises de agrupamento e discriminante. **Revista Árvore**, v. 14, n. 2, p. 85-101, 1990.

SWAINE, M. D.; WHITMORE, T. C. On the definition of ecological species groups in tropical rain forests. **Vegetation**, v. 75, n. 1 e 2, p. 81-86, 1988.

TER STEEGE, H.; PITMAN, N. C. A.; SABATIER, D.; et al. Hyperdominance in the Amazonian Tree Flora. **Science**, v. 342, n. 6156, p. 324-334, 2013.

TONINI, H.; BORGES, R. A. Equação de volume para espécies comerciais em Floresta Ombrófila Densa no Sul de Roraima. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 82, p. 11-17, 2015.

TURNER I. M. **The Ecology of Trees in the Tropical Rainforest**. Cambridge University Press, Cambridge, U.K. 2001. 298 p.

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

WHITMORE, T. C. Canopy gaps and two major groups of forest trees. **Ecology**, v. 70, p. 536-538, 1989.

WORBES, M.; JUNK, W. J. How old are tropical trees: the persistence of a myth. **IAWA Journal**, v. 20, p. 255-260, 1999.

WRIGHT, S. J. Tropical forests in a changing environment. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 20, p. 553-560, 2005.

## 6. MODELAGEM DO VOLUME COMERCIAL POR UNIDADE DE ÁREA DE UMA FLORESTA OMBRÓFILA DENSA SOB CONCESSÃO NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA

### RESUMO

Nas florestas tropicais, a abundância de espécies arbóreas em diferentes formas e dimensões, bem como a elevada diversidade estrutural, dificulta o emprego de fatores de forma e de equações volumétricas para as estimativas de volumes individuais. Contudo, as equações de volume para o povoamento, estimam o volume total por unidade de área por meio de variáveis da floresta de mais fácil obtenção, excluindo a necessidade da avaliação individual do volume das árvores. Assim, sua aplicação acarreta em menor tempo e custo quando comparado aos métodos tradicionais. Com isso, o objetivo deste trabalho foi selecionar um modelo para a estimativa do volume comercial total e explorável por unidade de área em uma floresta sob regime de concessão na Amazônia, empregando variáveis de fácil obtenção como densidade e área basal e outras que considerem a diversidade, riqueza e estrutura das florestas. Para isso, foram testados modelos tradicionais da literatura e outros gerados pelo processo *Stepwise*. Os modelos aritméticos obtidos por *Stepwise* propiciaram as estimativas mais precisas do volume total e explorável, reduzindo os erros de estimativa e corrigindo problemas de heterocedasticidade dos resíduos. A inserção de variáveis de diversidade e da estrutura da floresta contribuiu expressivamente para a melhoria das estimativas, sobretudo para o volume explorável, que considera apenas um grupo de espécies.

**Palavras-chave:** Floresta amazônica, Equações de volume, Volume do povoamento, Seleção de variáveis

### ABSTRACT

In Tropical Rainforests, the abundance of tree species of various shapes and dimensions, added to high structural diversity hamper the employment of form factors and individual volume equations, damaging the volume estimates. Meanwhile, volume equations for the stand total volume per unit estimate of using independent variables of easy obtention excluding the need of individual evaluation of volume of trees. Thus, it's application involves less time and cost when compared to traditional methods. The aim of this work was to select a model for the estimate of total and exploitable commercial volume per unit of area in a forest under concession in the Amazon, through easy obtainable variables and variables that consider diversity, richness and structure of forests. For that they were tested traditional models from the literature and models constructed by stepwise process. Arithmetic models generated by *Stepwise* have provided more accurate estimates of the total and exploitable commercial volume, reducing estimation errors and correcting heteroscedasticity problems of residuals. The inclusion of diversity and structure of the forest contributed significantly to the improvement of estimates, especially for exploitable volume, which considers only a group of species.

**Keywords:** Amazon forest, Volume equations, Stand volume, Variable selection

## 6.1. INTRODUÇÃO

As florestas tropicais apresentam uma série de recursos úteis à sociedade, com destaque para a madeira, que é o produto florestal mais consumido e comercializado no mundo. Nessas florestas, apesar da ocorrência de um grande número de espécies arbóreas, a maioria se apresenta de forma rara ou agregada (CONDIT et al., 2000; PLOTKIN et al., 2000) e apenas algumas são de interesse comercial para a indústria madeireira (CUNHA et al., 2016), sendo necessário, portanto, o levantamento de extensas áreas florestais para atender a demanda crescente de madeira (AKINDELE e LEMAY, 2006).

O potencial madeireiro de uma floresta geralmente é estimado a partir de dados obtidos em inventários florestais, utilizando uma amostra como base para inferir sobre os parâmetros da população (MACHADO et al., 2000), associando-os com fatores de forma ou equações de volume. No entanto, a abundância de espécies arbóreas sob as mais variadas formas e dimensões, somada a elevada diversidade florística e estrutural, são as principais características das florestas tropicais que dificultam obter estimativas precisas de volumes individuais (AKINDELE e LEMAY, 2006; IGBINOSA e AMOO, 2014).

Diversas atividades de manejo e conservação das florestas tropicais requerem estimativas seguras e precisas do volume das árvores (COLE e EWEL, 2006; CHÁIDEZ, 2009; ADEKUNLE et al., 2013). Para isso, as equações de volume do povoamento estimam o estoque volumétrico total por unidade de área, excluindo a necessidade da avaliação individual do volume das árvores, empregando medidas dendrométricas da população, atributos dos sítios florestais e dados climáticos e geográficos (FIGUEIREDO FILHO, et al. 1983; DOWNING e WEBER, 1984; ADENKULE et al., 2004; OLIVEIRA et al., 2005), gerando estimativas precisas e redução considerável de tempo e custo dos inventários florestais (SOUZA et al., 2014).

Adicionalmente, Whittaker (1966) mencionou que a composição florística das florestas naturais influencia diretamente na sua produção, podendo ser incorporada de várias maneiras aos modelos de predição. Dessa forma, o objetivo deste estudo foi selecionar variáveis, ajustar modelos matemáticos e propor equações para a estimativa do estoque volumétrico comercial total e explorável de uma Floresta Ombrófila sob regime de concessão na Amazônia, por meio do emprego de variáveis dendrométricas da população e de outras que consideram a diversidade e a estrutura dessas formações florestais.

## 6.2. MATERIAL E MÉTODOS

### 6.2.1. Área de estudo

Este estudo foi desenvolvido na Floresta Nacional do Jamari, estado de Rondônia, no Sudoeste dos limites da Amazônia brasileira, entre as coordenadas geográficas 09° 00' 00'' a 09° 30' 00'' S e 62° 44' 05'' a 63° 16' 64'' W. As Florestas Nacionais (FLONA) são Unidades de Conservação de Uso Sustentável, caracterizadas pela predominância de cobertura florestal nativa e cujo objetivo básico é o uso múltiplo e sustentável dos recursos florestais (BRASIL, 2000). Por isso, diversas Florestas Nacionais no Brasil atualmente estão em regime de concessão, manejadas por empresas privadas, sob o amparo da Lei de Gestão de Florestas Públicas (BRASIL, 2006).

A área da FLONA do Jamari está inserida no Sudoeste do Cráton Amazônico, onde as coberturas Fanerozóicas são abundantes. O seu relevo varia de plano à suavemente ondulado, sendo encontradas unidades pedológicas formadas por associações de Latossolos, Cambissolos e Podzóis (MMA/IBAMA, 2005). O clima da região é o Tropical Chuvoso do tipo Aw (Köppen), caracterizado por um período seco bem definido na estação do inverno, com precipitação média anual em torno de 2.400 mm e temperatura média anual de 25°C. Quanto às tipologias florestais, predominam as Florestas Ombrófilas Densa e Aberta, variando conforme a densidade de indivíduos arbóreos.

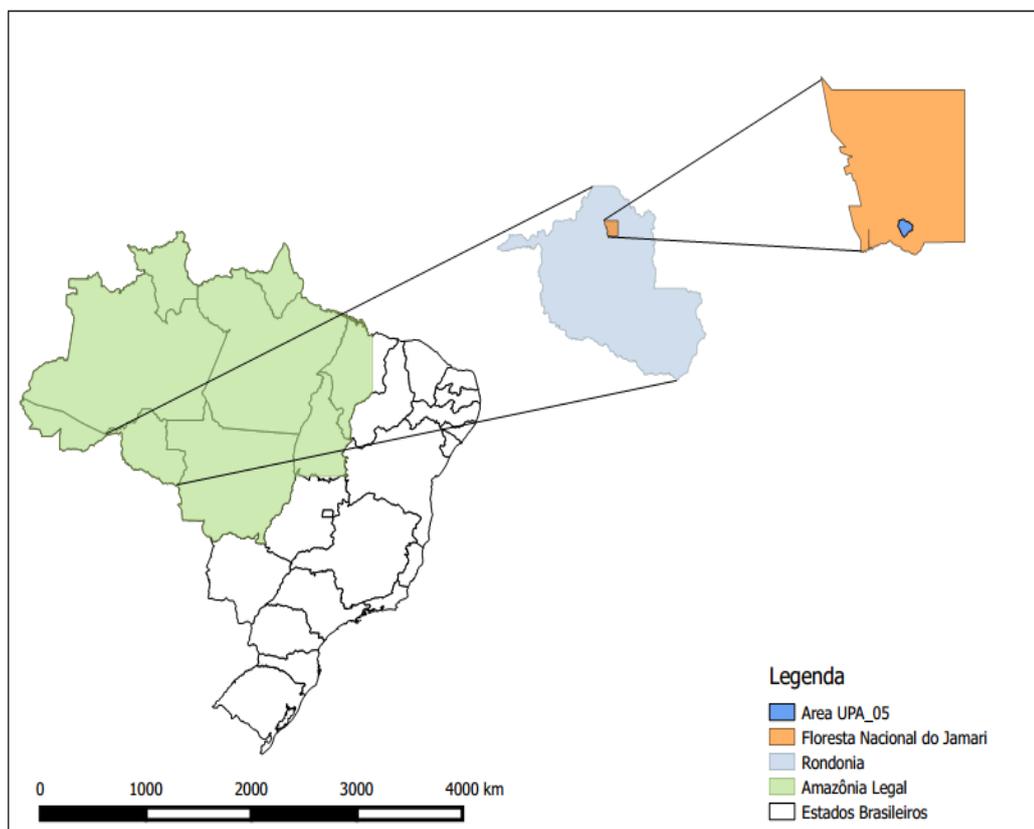
### 6.2.2. Base de dados

Neste trabalho, o estoque volumétrico comercial total ( $V_t$ ) correspondeu ao volume sem casca (m<sup>3</sup>) compreendido entre a base do tronco e o ponto de inversão morfológica de todos os indivíduos com diâmetro ( $d$ ) a 1,3 m de altura do solo igual ou superior a 40 cm. Enquanto o estoque volumétrico comercial explorável ( $V_e$ ) compreendeu ao volume de 32 espécies passíveis à exploração, classificadas como comercializáveis pelo Serviço Florestal Brasileiro.

O levantamento censitário de uma Unidade de Produção Anual de 1.596 hectares foi utilizado como base de dados (Figura 6.1), a qual foi subdividida em unidades amostrais de 50 m x 250 m, que, posteriormente, compuseram a base de dados para a modelagem do volume por unidade de área. Além disso, as unidades amostrais com a presença de apenas um

indivíduo ou de uma espécie foram previamente excluídas, uma vez que impossibilitariam o cálculo de algumas variáveis independentes para a modelagem volumétrica.

FIGURA 6.1 - LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA.



A estimativa do volume comercial individual ( $v$ ) foi efetuada com base no ajuste do modelo volumétrico de Spurr (6.1) para 4.366 árvores-amostra de 32 espécies comerciais da Amazônia, sendo a equação selecionada entre 11 modelos volumétricos tradicionais apresentado por Clutter et al. (1983) e por Avery e Burkhart (2002). A principal vantagem apresentada por esse modelo é o fator de ponderação  $d^2.h$ , sendo apropriado para a redução da heterocedasticidade e melhoria das estimativas (AKINDELE e LEMAY, 2006; IGBINOSA e AMOO, 2014). Posteriormente, o estimador (6.2) foi aplicado para o cálculo do volume total ( $V$ ).

$$\ln(v_i) = -8,2324 + 0,8631 \cdot \ln(d_i^2 \cdot h_i) \quad (6.1)$$

$$V = \sum_{i=1}^N (v_i) \quad (6.2)$$

Em que:  $d_i$  = diâmetro à altura do peito medido a 1,3 m do solo (cm);  $h_i$  = altura comercial das árvores (m);  $v_i$  = volume comercial por árvore ( $m^3$ );  $V$  = volume comercial total da floresta ( $m^3 ha^{-1}$ ); e  $Ln$  = logaritmo neperiano.

### 6.2.3 Modelagem do estoque volumétrico

Os volumes comerciais por unidade de um hectare foram estimados para cada unidade amostral, sendo calculadas, também, as seguintes medidas: área basal por hectare ( $G$ ), número de indivíduos por hectare ( $N$ ), média aritmética do diâmetro a 1,3 m do solo ( $\bar{d}$ ), diâmetro médio quadrático ( $dg$ ), altura comercial média ( $\bar{h}$ ), altura comercial dominante ( $h_{dom}$ ), índice de diversidade de Shannon ( $H'$ ), índice de equabilidade de Pielou ( $J'$ ), índice de variação diamétrica ( $Ivd$ ), razão de densidade de indivíduos comerciais ( $Ric$ ) e razão de espécies comerciais ( $Rec$ ).

O estoque volumétrico comercial total e explorável e as variáveis  $G$  e  $N$  foram transformadas para a unidade de um hectare, ao passo que a variável  $h_{dom}$  foi adaptada e calculada com base no conceito de Weise (SCOLFORO, 2006), considerando a altura comercial média de 20% das árvores de maior diâmetro por unidade amostral. O  $Ivd$  (6.3) considerou a amplitude dos diâmetros de todas as árvores de uma unidade amostral, variando de 0 a 1 e sendo diretamente proporcional à diferenciação diamétrica da floresta ou da amostra (PASTORELLA e PALETTO, 2013). As razões de indivíduos (6.4) e de espécies comerciais (6.5) foram inseridas com o objetivo de atribuir peso para a presença e a densidade de espécies passíveis de exploração nas estimativas.

$$Ivd = \frac{1}{n} (1 - r_{ij}) \quad (6.3)$$

$$Ric = \left(\frac{nc}{n}\right) \quad (6.4)$$

$$Rec = \left(\frac{sC}{s}\right) \quad (6.5)$$

Em que:  $n$  = número total de árvores na unidade amostral;  $nc$  = número de árvores das 32 espécies passíveis de exploração presentes na unidade amostral;  $s$  = número total de

espécies por unidade amostral;  $sc$  = número de espécies comerciais por unidade amostral; e  $r_{ij}$  = razão entre o menor e maior diâmetro da unidade amostral.

Para a modelagem dos volumes comerciais por unidade de área, 18 modelos tradicionais (Tabela 6.1) empregados na literatura foram selecionados (FIGUEIREDO FILHO, 1983; UNG e OUELLET, 1991; OLIVEIRA et al., 2005; SOUZA et al., 2014) e ajustados por meio de regressão linear. Esses ajustes foram comparados com equações geradas pelo processo *Stepwise*. Para isso, foi calculado o coeficiente de correlação linear de Pearson ( $r$ ) para identificar as maiores correlações entre as variáveis independentes com o volume total e explorável em sua forma pura e logaritimizada, conforme o empregado por Souza et al. (2014). As variáveis independentes foram testadas puras, logaritimizadas, invertidas, potencializadas e combinadas, totalizando um conjunto de 130 variáveis.

TABELA 6.1 - MODELOS TRADICIONAIS TESTADOS PARA A ESTIMATIVA DO ESTOQUE VOLUMÉTRICO COMERCIAL TOTAL E EXPLORÁVEL EM UMA FLORESTA OMBRÓFILA NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA.

Número	Autor	Modelo matemático
1		$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot (G)$
2		$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot (G \cdot \bar{h})$
3		$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot (G \cdot h_{dom})$
4	Spurr (1952)	$Ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ln(G)$
5		$Ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ln(G \cdot \bar{h})$
6		$Ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ln(G \cdot h_{dom})$
7		$Ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ln(G^2 \cdot h_{dom})$
8		$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ln(G \cdot \bar{h})$
9	Figueiredo Filho (1983)	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ln(G \cdot h_{dom})$
10		$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ln(G^2 \cdot \bar{h})$
11		$Ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ln(G^2 \cdot \bar{h})$
12		$Ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ln(G) + \beta_2 \cdot Ln(\bar{h})$
13	Ung e Ouelet (1991)	$Ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ln(G) + \beta_2 \cdot Ln(h_{dom})$
14		$Ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ln(G \cdot \bar{h}) + \beta_2 \cdot Ln(G \cdot h_{dom})$
15	Scolforo (1997)	$LLn(V) = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ln(N \cdot \bar{d})$
16		$Ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ln(G^2 \cdot N)$
17	Rosot (1989)	$Ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ln(G \cdot N)$
18		$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot (G^2 \cdot \bar{h})$

Em que:  $V$  = volume comercial por unidade de área ( $m^3/ha$ );  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  = coeficientes de regressão;  $G$  = área basal por hectare;  $\bar{h}$  = média aritmética da altura comercial;  $h_{dom}$  = altura comercial dominante;  $N$  = número de indivíduos por hectare;  $\bar{d}$  = média aritmética dos diâmetros a 1,3 m do solo; e  $Ln$  = logaritmo neperiano.

A seleção das melhores equações para estimativa dos estoques volumétricos foi efetuada com base nos seguintes critérios: maior coeficiente de determinação ajustado (6.6),

menor erro padrão da estimativa (6.7), significância dos coeficientes de regressão e distribuição dos resíduos com ausência de heterocedasticidade e de tendências aparentes. Além disso, uma amostra independente de 10% das unidades amostrais foi selecionada exclusivamente para a validação da melhor equação. Para isso, foi empregado o teste de aderência do Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) ao nível de 95% de probabilidade e a análise gráfica dos resíduos.

$$R_{aj}^2 = \left[ \left( 1 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \right)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right) \left( \frac{n-1}{n-p-1} \right) \right] \quad (6.6)$$

$$S_{yx} \% = \left[ \frac{\left( \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-p)} \right)}{\bar{y}} \right] \cdot 100 \quad (6.7)$$

Em que:  $y_i$  = valor observado;  $\hat{y}_i$  = valor estimado pelo modelo;  $n$  = número de observações;  $p$  = número de coeficientes do modelo; e  $\bar{y}$  = média dos valores observados da variável dependente.

### 6.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estatísticas descritivas das variáveis empregadas neste estudo estão apresentadas na Tabela 6.2. Os baixos valores médios de densidade (N) e de área basal (G), de 8,09 ind. ha<sup>-1</sup> e 3,98 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> respectivamente, devem-se ao critério de inclusão que privilegiou apenas as árvores de grande porte ( $d > 45$  cm). Esse fato é ressaltado na avaliação do volume comercial explorável, que considerou apenas 32 espécies passíveis de exploração. Nessa, os valores médios encontrados foram de N igual a 5,14 ind. ha<sup>-1</sup> e G igual a 2,68 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>. Os valores de G e N contribuíram para as diferenças entre o volume total ( $V_t$ ) médio de 46,06 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> e o volume explorável ( $V_e$ ) médio de 30,85 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

TABELA 6.2 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS EMPREGADAS PARA O AJUSTE DE MODELOS DE VOLUME TOTAL E EXPLORÁVEL POR UNIDADE DE ÁREA.

Variáveis	Estatísticas			
	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
$Vt$ (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	0,49	91,45	46,06	23,53
$Ve$ (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	0,00	63,03	30,85	19,95
$\bar{d}$ (cm)	51,3	102,9	75,5	6,2
$dg$ (cm)	51,4	111,2	79,4	7,3
$\bar{h}$ (m)	12,0	20,8	16,7	1,2
$h_{dom}$ (m)	13,5	23,0	18,0	1,3
$G$ (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	0,045	7,724	3,977	2,007
$N$ (ind. ha <sup>-1</sup> )	0,16	17,60	8,09	4,21
$H'$	0,636	3,521	2,999	0,548
$E$	0,450	0,736	0,568	0,057
$Ivd$	0,178	0,813	0,699	0,098
$Ric$	0,000	1,000	0,645	0,107
$Rec$	0,000	1,000	0,634	0,087

Em que:  $Vt$  = produção total;  $Ve$  = produção explorável;  $\bar{d}$  = média aritmética dos diâmetros;  $dg$  = diâmetro médio quadrático;  $\bar{h}$  = altura comercial média;  $h_{dom}$  = altura dominante;  $G$  = área basal por hectare;  $N$  = número de indivíduos por hectare;  $H'$  = índice de diversidade de Shannon;  $E$  = índice de equabilidade de Pielou;  $Ivd$  = índice de variação diamétrica;  $Ric$  = razão de indivíduos comerciais; e  $Rec$  = razão de espécies comerciais.

### 6.3.1. Modelos tradicionais

Os coeficientes e as estatísticas dos modelos ajustados para a estimativa do volume comercial total e explorável são apresentados na Tabela 6.3. Os modelos 11 e 12 exibiram os menores valores de erro padrão da estimativa ( $Syx\%$ ), os maiores coeficientes de determinação ajustado ( $R^2aj.$ ) e coeficientes de regressão significativos ( $\beta_i$ ). Dessa forma, eles foram os selecionados como os mais precisos para a estimativa do volume comercial total do povoamento. Para esse volume, os piores ajustes foram propiciados pelos modelos 8, 9 e 10, por possuírem variáveis dependentes e independentes de natureza distinta. No entanto, os modelos aritméticos 1, 2 e 3 foram excluídos da análise, por apresentarem problemas com multicolinearidade, devido à ausência de significância de alguns de seus coeficientes.

Por meio do mesmo critério de seleção usado, os modelos 2, 5 e 14 foram os mais precisos para a estimativa do volume comercial explorável por unidade de área (Tabela 6.3). No entanto, mesmo proporcionando estimativas satisfatórias, os modelos 2 e 14 apresentaram não-significância dos coeficientes e foram eliminados da análise, devido ao efeito da multicolinearidade. Essa condição também foi verificada nos modelos 1, 3, 10 e 13. Assim, o modelo 5 foi selecionado como o mais preciso para a estimativa do volume comercial explorável, apresentando o maior valor de  $R^2aj.$  e um dos menores  $Syx\%$ .

TABELA 6.3 – ESTATÍSTICAS E COEFICIENTES DOS MODELOS AJUSTADOS PARA A ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA TOTAL E EXPLORÁVEL.

Modelo	Volume comercial total					Volume comercial explorável				
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$R^2_{aj.}$	$Syx\%$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$R^2_{aj.}$	$Syx\%$
1	-0,3899 <sup>ns</sup>	11,6790*	-	0,993	4,39	0,0002 <sup>ns</sup>	7,7096*	-	0,923	14,29
2	0,4176 <sup>ns</sup>	0,6832*	-	0,995	3,59	0,1941 <sup>ns</sup>	0,4561*	-	0,947	11,81
3	0,5625 <sup>ns</sup>	0,6304*	-	0,994	3,92	0,6043 <sup>ns</sup>	0,4165*	-	0,927	13,91
4	2,4337*	1,0088*	-	0,993	4,38	2,0127*	1,0138*	-	0,984	14,37
5	-0,3125*	0,9860*	-	0,995	3,56	-0,7769*	0,9983*	-	0,989	11,84
6	-0,3862*	0,9855*	-	0,994	3,88	-0,8490*	0,9971*	-	0,984	14,01
7	1,0043*	0,4991*	-	0,996	3,19	0,5667*	0,5033*	-	0,985	13,92
8	-29,872*	19,4813*	-	0,758	25,05	-23,101*	13,7452*	-	0,735	26,51
9	-31,429*	19,4975*	-	0,759	24,97	-24,086*	13,7267*	-	0,730	26,76
10	-3,1137 <sup>ns</sup>	9,8643*	-	0,759	25,02	-4,0579 <sup>ns</sup>	6,9282*	-	0,731	26,75
11	1,0422*	0,4992*	-	0,997	2,59	0,6042*	0,5036*	-	0,987	12,76
12	0,6318*	0,9948*	0,6466*	0,997	2,58	-3,0318*	0,9787*	1,8081*	0,945	12,08
13	0,8336*	0,9968*	0,5588*	0,996	3,18	-1,0679 <sup>ns</sup>	0,9954*	1,0735*	0,925	14,11
14	0,3430*	0,6131*	0,3734*	0,997	2,64	-0,7290*	1,5211*	0,5247*	0,948	11,70
15	-2,7673*	1,0293*	-	0,965	9,54	-3,1061*	1,0171*	-	0,967	20,52
16	2,1791*	0,3402*	-	0,985	6,30	1,7715*	0,3385*	-	0,976	17,56
17	2,0535*	0,5119*	-	0,973	8,34	1,6550*	0,5066*	-	0,970	19,45
18	17,1888*	0,0865*	-	0,911	15,21	11,8290*	0,0567*	-	0,845	20,27

Em que:  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  = coeficientes de regressão a serem estimados;  $R^2_{aj.}$  = coeficiente de determinação ajustado;  $Syx\%$  = erro padrão da estimativa; <sup>ns</sup> = não significativo; e \* = significativo a 5%.

Os modelos tradicionais selecionados neste estudo são citados dentre os mais acurados para a estimativa do volume por unidade de área em florestas naturais. Nesse sentido, ao elaborar equações de volume para fragmentos de florestas estacionais, Oliveira et al. (2005) selecionaram o modelo de Ung e Ouellet (1991) como o melhor, conforme o encontrado no presente estudo para o volume comercial total. Este modelo é uma adaptação genérica do modelo de Schumacher e Hall para a estimativa de volume individual, cujo emprego é consagrado devido à sua acurácia e eficiência.

Além disso, Souza et al. (2014), ao modelarem a biomassa de *Mimosa scabrella* Benth. em povoamentos nativos, selecionaram o modelo de variável combinada de Spurr (modelo 5) dentre os mais eficientes para a estimativa da produção de lenha por unidade de área, como no presente estudo para o volume comercial explorável. Esse resultado pode estar relacionado ao fator de ponderação  $G^2 \cdot \bar{h}$ , que, segundo Akindele e Le May (2006), é apropriado para a redução da heterocedasticidade, proporcionando melhoria nas estimativas.

### 6.3.2. Modelos selecionados via *Stepwise*

Considerando as variáveis em suas formas puras, as maiores correlações lineares ( $r$ ) com o volume comercial total e explorável foram obtidas por meio da área basal ( $r = 0,99$  e  $0,96$ , respectivamente), número de árvores por hectare ( $r = 0,96$  e  $0,89$ , respectivamente), índice de diversidade de Shannon ( $r = 0,71$  e  $0,67$ , respectivamente) e índice de variação diamétrica ( $r = 0,66$  e  $0,65$ , respectivamente), contribuindo, assim, para a inserção delas sob diversas formas nos modelos gerados pelo processo *Stepwise*. As variáveis área basal ( $G$ ) e número de árvores por hectare ( $N$ ) são fundamentais para a descrição da estrutura das florestas e, por isso, são consagradas para a estimativa do volume por área, devido à boa correlação e ao potencial preditivo (FIGUEIREDO FILHO, 1983; ADEKUNLE et al., 2004; OLIVEIRA et al., 2005; SOUZA et al., 2014).

Entre as variáveis independentes testadas como alternativa àquelas comumente utilizadas na estimativa do volume por unidade área, apenas o índice de diversidade de Shannon ( $H'$ ), o índice de variação diamétrica ( $Ivd$ ) e a razão de indivíduos comerciais ( $Ric$ ) apresentaram potencial de predição do estoque volumétrico comercial, principalmente para a estimativa do volume comercial explorável, que considerou apenas as espécies passíveis de exploração. As variáveis índice de equabilidade de Pielou ( $J'$ ) e razão de espécies comerciais ( $Rec$ ) não foram inseridas nos modelos, devido à relação inversa e inferior com o volume comercial total ( $r = -0,68$  e  $-0,06$ , respectivamente) e explorável ( $r = -0,64$  e  $-0,01$ , respectivamente). Além disso, a eficácia da combinação  $G.Ric$  foi observada nesta análise, a qual foi incluída nos quatro modelos gerados. Essa combinação apresentou potencial preditivo ao transformar, por meio da variável  $Ric$ , a área basal total da floresta ou da unidade de amostra em área basal explorável.

A diversidade de espécies, representada neste estudo pelo índice  $H'$ , propiciou boa explicação do volume comercial explorável, sendo inserida nos dois modelos gerados para sua estimativa. Nesse sentido, Vilà et al. (2007) mencionaram que vários experimentos estabelecidos em diferentes níveis de diversidade demonstraram efeito positivo da diversidade sobre a produção madeireira. Esses autores ressaltaram que a elevada diversidade nas florestas naturais gera maior probabilidade de ocorrência de espécies de interesse comercial, aumentando, assim, a produção madeireira, conforme o observado no presente estudo. No entanto, assim como relatado por Mittelbach et al. (2001) e Vilà et al. (2007), as evidências disponíveis indicaram que a relação positiva entre a diversidade de espécies e a produtividade

depende fundamentalmente da escala geográfica e das características ecológicas do ecossistema em estudo.

Da mesma forma, a variável *Ivd* apresentou boa correlação com o volume comercial total e explorável, sendo inserida em três dos quatro modelos gerados. A diferenciação diamétrica pode ser considerada uma das características mais importantes para a caracterização do funcionamento do ecossistema, do desenvolvimento da sucessão e da biodiversidade local nas florestas (PASTORELLA e PALETTO, 2013), estando, portanto, diretamente relacionada com a produção madeireira nas florestas naturais.

Os modelos gerados por *Stepwise* apresentaram desempenho satisfatório, com *Syx%* em torno de 1% para o volume comercial total e 5% para o volume comercial explorável e valores de *R<sup>2aj.</sup>* superiores a 0,99 (Tabela 6.4). De acordo com o critério de seleção adotado, o modelo mais adequado para a estimativa do volume comercial total foi o logarítmico, enquanto para o volume explorável foi o aritmético. No entanto, os modelos logarítmicos apresentaram um elevado número de variáveis e maior ocorrência de multicolinearidade. Logo, os aritméticos gerados por *Stepwise* foram os selecionados para as estimativas do volume do povoamento, apresentando resultados superiores.

TABELA 6.4 - COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DOS MODELOS GERADOS PELO PROCESSO *STEPWISE* PARA A ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA TOTAL E EXPLORÁVEL EM SUAS FORMAS PURAS E LOGARÍTMICAS.

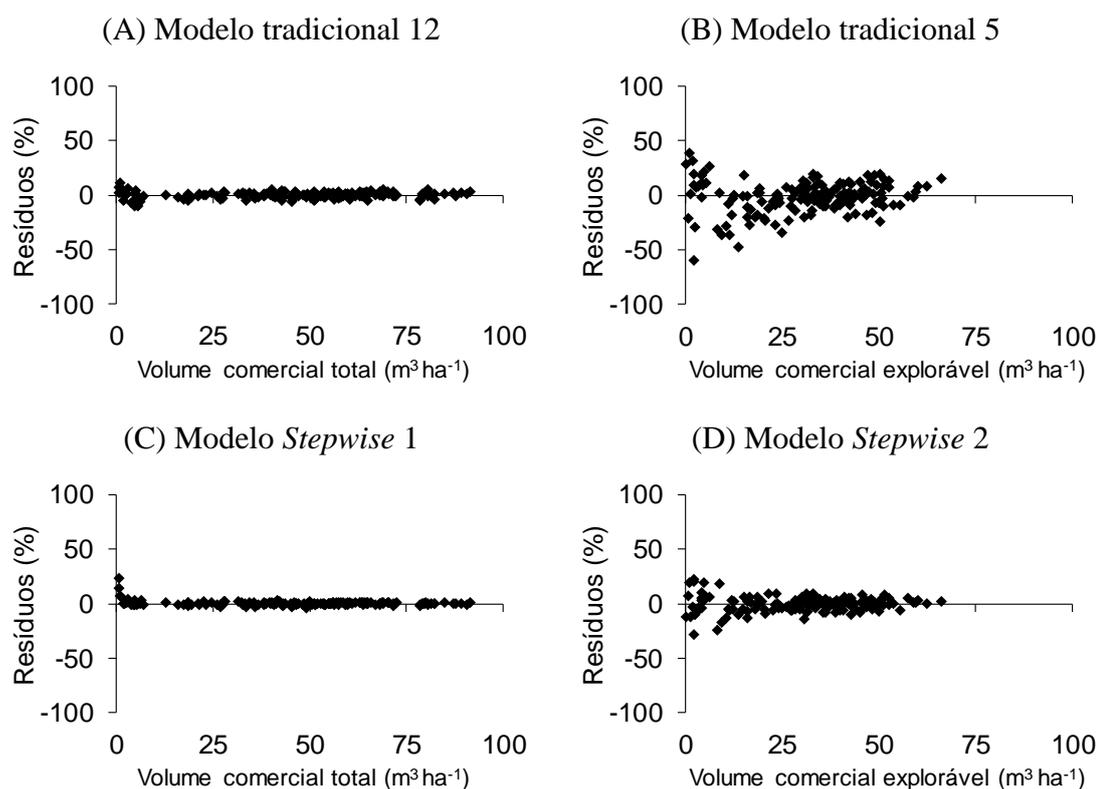
Modelo	Equação ajustada	<i>R<sup>2aj.</sup></i>	<i>Syx%</i>
Volume comercial total			
1	$Vt = -0,0755 + 0,3791. (G. \bar{h}) + 2,3589. (G) + 0,1780. (G. h_{dom}) + 0,4956. (G. Ric) - 3,1429. (G. Ivd) + 1,0954. (N. Ivd)$	0,9995	1,08
2	$Ln(Vt) = -6,3780 + 1,6491. Ln(G. \bar{h}) - 0,0755. Ln(N. h_{dom}) - 0,0012. (\bar{h})^2 + 0,4207. Ln(\bar{d}) + 0,6309. Ln(N. Ivd) - 0,0078. (H'. Ivd) - 0,6047. Ln(G^2. Ivd) + 6,1076. (\frac{1}{\bar{h}}) + 0,2933. Ln(dg. h_{dom}) - 0,0000001. (N. \bar{h})^2 + 0,0064. (G. Ric) + 0,00001(dg)^2$	0,9996	1,01
Volume comercial explorável			
3	$Ve = 0,0214 + 11,1067. (G. Ric) + 0,0016. (G. \bar{h})^2 - 0,0043. (G^2. Ivd)^2 - 0,2312. (G. Rec)^2 - 0,0610. (G^2. H') + 0,000004. (G^2. N)^2$	0,9907	4,96
4	$Ln(Ve) = 0,4538 + 1,2892. Ln(G. Ric) + 0,2386. (\frac{1}{G}) + 0,1446. (\frac{1}{Ric}) - 0,0096. (H')^2 + 0,6214. Ln(\bar{h}) - 0,0459. (\frac{1}{G.N}) - 0,0286. (\frac{1}{G.Ric}) + 0,0634. (\frac{1}{N.Ivd}) - 0,0711. (G. Ric)$	0,9899	5,20

Em que: *R<sup>2aj.</sup>* = coeficiente de determinação ajustado; *Syx%* = erro padrão da estimativa.

### 6.3.3. Comparação dos modelos

Os modelos aritméticos gerados pelo processo *Stepwise* apresentaram maior eficiência e acurácia em relação aos modelos tradicionais. Esse processo propiciou aumento na precisão das estimativas, com a diminuição do  $Syx\%$  e o aumento do  $R^2aj$ . Outra vantagem desse processo foi a ausência de heterocedasticidade da variância, conforme observado na análise gráfica da distribuição dos resíduos gerados pelos modelos selecionados (Figura 6.2). Assim, os modelos gerados por *Stepwise* neste estudo foram considerados os mais adequados para a estimativa do volume comercial do povoamento.

FIGURA 6.2 - DISPERSÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS DOS MODELOS TRADICIONAIS E GERADOS PELO *STEPWISE* SELECIONADOS PARA A ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA TOTAL E EXPLORÁVEL.

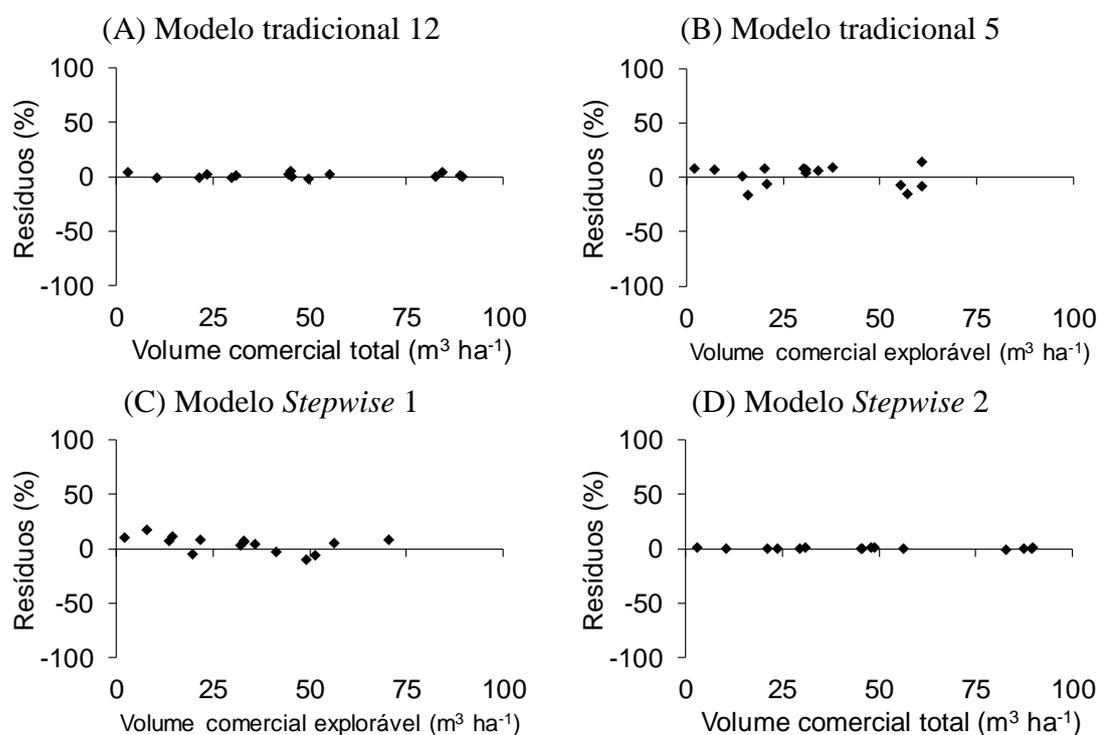


Ao testarem o procedimento *Stepwise* para a geração de equações de volume por unidade de área, Machado et al. (2008) e Souza et al. (2014) mencionaram o melhor desempenho de modelos aritméticos para a estimativa do volume de povoamentos de *Mimosa scabrella*. Esses autores afirmaram que tal resultado contraria diversos estudos de predição do volume por unidade de área, que apontam sempre a maior acurácia dos modelos logarítmicos.

Adicionalmente, ao comparar os modelos tradicionais e por *Stepwise* para a estimativa da biomassa por unidade de área em bracatingais nativos, Souza et al. (2014) verificaram que a *Stepwise* proporcionou equações de melhor desempenho ao selecionar variáveis de alta correlação e ao excluir as de baixa correlação, conforme constatado no presente estudo, melhorando a aderência do modelo ao conjunto de dados.

A partir das equações selecionadas para a estimativa dos estoques volumétricos, o teste Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) foi aplicado para validá-las. Assim, respectivamente para os volumes comercial total e explorável, valores de  $\chi^2$  iguais a 0,352<sup>ns</sup> e a 4,780<sup>ns</sup> foram encontrados nos modelos tradicionais, ao passo que  $\chi^2$  de 0,007<sup>ns</sup> e de 2,390<sup>ns</sup> foram observados para os modelos por *Stepwise*, sendo não significativos e aderentes aos valores observados. Ademais, os resíduos da validação apresentaram com distribuição homogênea ao longo de toda linha de regressão (Figura 6.3).

FIGURA 6.3 - DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DA VALIDAÇÃO DOS MODELOS SELECIONADOS PARA A ESTIMATIVA DO ESTOQUE VOLUMÉTRICO COMERCIAL TOTAL E EXPLORÁVEL EM UMA FLORESTA OMBRÓFILA NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA.



Diante da estreita correlação entre a riqueza de espécies arbóreas com a produção florestal, Vilà et al. (2007) citaram que a manutenção da diversidade arbórea deve ser uma atividade de rotina no manejo florestal, de forma a garantir maior produção por meio do

aumento da probabilidade de ocorrência de espécies comerciais potenciais à exploração. Isso mostra a necessidade da avaliação constante da diversidade florística e estrutural das florestas e sua inserção em equações para a estimativa dos estoques volumétricos de florestas tropicais.

Esses modelos volumétricos abordados apresentam diversas aplicações no contexto das concessões florestais na Amazônia. Como exemplo o Plano Anual de Outorga Florestal, documento instituído pela Lei de Gestão de Florestas Públicas (BRASIL, 2006), que seleciona e descreve as Florestas Públicas Federais habilitadas para concessão. Da mesma forma, o Decreto 6.063 de 2007 (BRASIL, 2007), estabelece que as concessões florestais devam ocorrer por licitação e, para sua efetivação, é preciso avaliar a floresta em termos do seu potencial de madeira comercial (CAVALCANTI, et al. 2009), corroborando com a importância das equações desenvolvidas neste estudo.

#### 6.4. CONCLUSÕES

As equações desenvolvidas no presente estudo geram estimativas precisas do estoque volumétrico comercial total e explorável por unidade de área na Floresta Nacional do Jamari. Essas equações empregam variáveis acessíveis e comumente mensuradas em inventários florestais, como densidade, área basal e altura média.

A inserção das variáveis que consideram a diversidade florística e estrutural das florestas, como os índices de Shannon e de variação diamétrica e a razão de indivíduos comerciais, contribuem expressivamente para a melhoria das estimativas do volume do povoamento, sobretudo para o estoque comercial explorável, corroborando com a necessidade da constante avaliação da diversidade arbórea das florestas amazônicas para a avaliação precisa do potencial madeireiro.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEKUNLE, V. A. J.; NAIR, K. N.; SRIVASTAVA, A. K.; SINGH, N. K. Models and form factors for stand volume estimation in natural forest ecosystems: a case study of Katarniaghat Wildlife Sanctuary (KGWS), Bahraich District, India. **Journal of Forestry Research**, v. 24, n. 2, p. 217-226, 2013.

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

AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. **Forest Measurements**. 5 Ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2002. 408 p.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. **Diário Oficial da União**, n. 138, p.45-48, 2000.

BRASIL. Instrução Normativa nº 5, de 11 de dezembro de 2006. Altera as Diretrizes para o Manejo Florestal em escala empresarial na Amazônia. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, n. 238, p.155-158, 2006.

CAVALCANTI, F. J. B.; MACHADO, S. A.; HOSOKAWA, R. T. Tamanho de unidade de amostra e intensidade amostral para espécies comerciais da Amazônia. **Floresta**, v. 39, n. 1, p. 207-214, 2009.

CHÁIDEZ, J. N. Allometric equations and expansion factors for tropical dry forest trees of Eastern Sinaloa, Mexico. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 10, p. 45-52, 2009.

CLUTTER, J.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley e Sons, 1983. 333 p.

COLE, T. G.; EWEL, J. J. Allometric equations for four valuable tropical tree species. **Forest Ecology and Management**, v. 229, p. 351-360, 2006.

CONDIT, R.; ASHTON, P.; BAKER, P.; BUNYAVEJCHEWIN, S; GUNATILLEKE, S.; GUNATILLEKE, N.; HUBBELL, S. P.; FOSTER, R. B.; ITOH, A.; LAFRANKIE, J.V.; LEE, H. S.; LOSOS, E.; MANOKARAN, N.; SUKUMAR, R.; YAMAKURA, T. Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. **Science**, v. 288, p. 1414-1418, 2000.

CUNHA, T. A.; FINGER, C. A. G.; HASENAUER, H. Tree basal area increment models for Cedrela, Amburana, Copaifera and Swietenia growing in the Amazon rain forests. **Forest Ecology and Management**, v. 365, p. 174-183, 2016.

DOWNING, J. A.; WEBER, L. A. The prediction of forest production from inventory and climatic data. **Ecological Modelling**, v. 23, p. 227-241, 1984.

FIGUEIREDO FILHO, A. **Estudos de modelos matemáticos para estimar o volume por unidade de área em uma floresta tropical úmida na Amazônia brasileira**. 1983. 176 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1983.

IGBINOSA, A. H.; AMOO, O. B. Appropriate volume functions for Leguminosae family in two tropical rainforests in Cross River State, Nigeria. **Journal of Environment and Ecology**, v. 5, n. 2, p. 206-221, 2014.

MACHADO, S. A.; AGUIAR, L. P.; FIGUEIREDO FILHO, A.; KOEHLER, H. S. Modelagem do volume de povoamento para *Mimosa scabrella* Benth. na região metropolitana de Curitiba. **Revista Árvore**, v. 32, n. 3, p. 465 – 478, 2008.

MACHADO, S. A.; MELLO, J. M.; BARROS, D. A. Comparação entre métodos para a avaliação de volume total de madeira por unidade de área para o pinheiro do paraná na região Sul do Brasil. **Cerne**, v. 6, n. 2, p. 55-66, 2000.

MITTELBAACH, G. G.; STEINER, C. F.; SCHEINER, S. M.; GROSS, K. L.; REYNOLDS, H. L.; WAIDE, R. B.; WILLIG, M. R.; DODSON, S. I.; GOUCH, L. What is observed relationship between species richness and productivity? **Ecology**, v. 82, n. 9, p. 2381-2396, 2001.

MMA/IBAMA. **Plano de Manejo da Floresta Nacional do Jamari - Rondônia**. Volume I: Diagnóstico. 2005. 156 p.

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

PASTORELLA, F.; PALETTO, A. Stand structure indices as tools to support forest management: an application in Trentino forests (Italy). **Journal of Forest Science**, v. 59, n. 4, p. 159-168, 2013.

PICARD, N.; SAINT-ANDRE, L.; HENRY, M. **Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction**. FAO, Rome and Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier, 2012. 215 p.

PLOTKIN, J. B.; POTTS, M. D.; LESLIE, N.; MANOKARAN, N.; LAFRANKIE, J.; ASHTON, P. S. Species-area curves, spatial aggregation, and habitat specialization in tropical forests. **Journal of Theoretical Biology**, v. 207, n. 1, p. 81-99, 2000.

ROSOT, M. A. D. **Estudo comparativo de métodos para avaliação volumétrica por unidade de área em um povoamento de *Pinus taeda* L.** 1989. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal: modelos de crescimento e produção florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006. 393 p.

SCOLFORO, J. R. S. **Técnica de regressão aplicada para estimar: volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos da madeira**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 292 p.

SOUZA, R. F.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. Modelagem da biomassa total e da lenha para bracatingais nativos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 1, p. 53-62, 2014.

SPURR, S. H. **Forest inventory**. New York: The Ronald Press Company, 1952. 476 p.

UNG, C. H.; OUELLET, D. Stand volume tables. Application to black spruce of Lebel-sur-Quevillon. **Forestry Chronicle**, v. 67, n. 6, p. 712-715, 1991.

VILÀ, M.; VAYREDA, J.; COMAS, L.; IBÁÑEZ, J. J.; MATA, T.; OBÓN, B. Species richness and wood production: a positive association in Mediterranean forests. **Ecology Letters**, v. 10, p. 241-250, 2007.

WHITTAKER, R. H. Forest dimension and production in the Great Smoky Mountains. **Ecology**, v. 47, p. 103-121, 1966.