

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**Lorena Eleamen da Silva Gama**

**EQUAÇÕES MONOESPECÍFICAS DE INCREMENTO EM ÁREA BASAL DE  
*Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.O.Grose (ipê amarelo) E *Handroanthus impetiginosus*  
(Mart. ex DC.) Mattos (ipê roxo) DA FLORESTA TROPICAL PLUVIAL DO ACRE**

Santa Maria, RS  
2017

**Lorena Eleamen da Silva Gama**

**EQUAÇÕES MONOESPECÍFICAS DE INCREMENTO EM ÁREA BASAL DE  
*Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.O.Grose (ipê amarelo) E *Handroanthus impetiginosus*  
(Mart. ex DC.) Mattos (ipê roxo) DA FLORESTA TROPICAL PLUVIAL DO ACRE**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Guimarães Finger

Santa Maria, RS  
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Eleamen da Silva Gama, Lorena  
Equações mono específicas de Incremento em Área Basal de  
Handroanthus serratifolius (Vahl) S.O. Grose (ipê  
amarelo) e Handroanthus impetiginosus (Mart. ex DC.)  
Mattos (ipê roxo) da Floresta Tropical Pluvial do Acre /  
Lorena Eleamen da Silva Gama.- 2017.  
67 p.; 30 cm

Orientador: César Augusto Guimarães Finger  
Coorientador: Frederico Dimas Fleig  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2017

1. Regressão de Cumeeira 2. Dendrocronologia 3.  
Incremento em área basal I. Guimarães Finger, César  
Augusto II. Dimas Fleig, Frederico III. Título.

**Lorena Eleamen da Silva Gama**

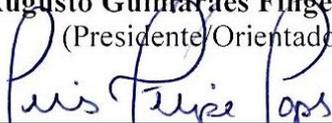
**EQUAÇÕES MONOESPECÍFICAS DE INCREMENTO EM ÁREA BASAL DE  
*Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.O.Grose (ipê amarelo) E *Handroanthus impetiginosus*  
(Mart. ex DC.) Mattos (ipê roxo) DA FLORESTA TROPICAL PLUVIAL DO ACRE**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**.

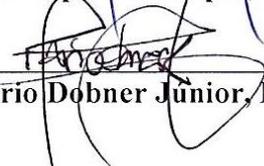
Aprovada em 22 de Fevereiro de 2017:



César Augusto Guimarães Finger, Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)



Luis Felipe Dias Lopes, Dr. (UFSM)



Mário Dobner Júnior, Dr. (UFSC)

Santa Maria, RS  
2017

## DEDICATÓRIA

*A minha mãe Badhia Eleamen e meus avós Sebastião Sampaio e Reneide Eleamen, onde agradeço por todos os esforços e renúncias realizadas em prol da minha educação, e principalmente pelo amor e carinho dedicados a mim.*

*Dedico.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus que ilumina o meu caminho, fortalece-me e abençoa-me a cada manhã;

À minha mãe Badhia, meus avós Reneide e Sebastião, e Victor Carlos pelo apoio e incentivo em todos os momentos e desafios vividos;

À Universidade Federal de Santa Maria, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, pela oportunidade concedida e todo o aporte técnico e infraestrutura disponibilizados;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Acre (FAPAC) pela concessão da bolsa de estudos e incentivo a qualificação do povo acreano.

Ao Prof. Dr. César Augusto Guimarães Finger, pela orientação, confiança, apoio imprescindível e todo o conhecimento compartilhado.

Ao Prof. Dr. Frederico Dimas Fleig pela coorientação, confiança, conhecimentos compartilhados e principalmente todo suporte dado, juntamente com a sua esposa Norma.

Aos senhores Betão, França, Sérgio e Raul pela autorização e disponibilização das áreas para o presente estudo.

Ao Andrett Barlatti, Claudio Alberto Selivon e Cristiano Corrêa pelas informações concedidas, imprescindíveis ao planejamento da coleta de dados.

Ao Jairo Brasileiro, André e Pedrina por ceder suas residências e toda estrutura para hospedagem da equipe de campo.

Ao Instituto de Terras do Acre - ITERACRE, em especial aos senhores Nil Figueiredo e Assis, por todo o suporte e logística disponibilizados para concretização desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Thiago Augusto da Cunha por todo o suporte e instruções primordiais para realização deste trabalho.

Ao Dr. Emanuel Arnoni pela disponibilidade, sugestões e todas as contribuições dadas ao trabalho.

Ao Hudson Veras e Diego Cavalcante pelo apoio com as ferramentas de SIG.

A Dona Maria, secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, sempre prestativa a resolver nossas pendências e auxiliar no que fosse necessário.

Aos meus queridos amigos Mateiro Sr. Pedro, Elke Lima, Daiane Haeser, Márcio Moura e Luis Felipe pelo auxílio nas coletas de campo, vocês foram de grande importância para a concretização desta pesquisa.

À Dona Marta Zimmermann, Anna Zimmermann, Karen Janones e Cyro Matheus, por terem sido a nossa família em Santa Maria, e a qual não vou esquecer todo o carinho e cuidado.

Aos amigos do Laboratório de Manejo Florestal e PPGEF, Lorena, Carline, Gustavo, Túlio, Elenice, Verônica, Pierre, Anelisa, Junior, Jairo, Cristine, Fran, Fábio, Luciana e Karina pela amizade e momentos compartilhados.

E a todos que de alguma ou outra forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

*Reconhece o Senhor em todos os  
teus caminhos, e Ele endireitará as  
tuas veredas.*

*(Provérbios 3:6)*

## RESUMO

### EQUAÇÕES MONOESPECÍFICAS DE INCREMENTO EM ÁREA BASAL DE *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.O.Grose (ipê amarelo) E *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos (ipê roxo) DA FLORESTA TROPICAL PLUVIAL DO ACRE

AUTORA: Loreнна Eleamen da Silva Gama  
ORIENTADOR: César Augusto Guimarães Finger

Em florestas naturais, raramente considera-se a estrutura da floresta e o ritmo de crescimento das espécies como critérios para o manejo. Quando considerado, é normalmente baseado em grupos de espécies com características distintas. Diante desse pressuposto, este trabalho foi desenvolvido buscando avançar no conhecimento do ritmo de crescimento das espécies madeireiras exploradas no leste do estado do Acre visando contribuir com a exploração sustentável dessas florestas. Para isso, foi modelado o crescimento de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. Ex DC.) Mattos (ipê roxo) e *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.O. Grose (ipê amarelo) a partir de dados obtidos com a técnica de análise de anéis de crescimento. No modelo de regressão, foram investigadas covariáveis associadas ao tamanho e à morfometria da copa, ao *status* competitivo, à sanidade e à carga de lianas na copa, como descritoras da taxa de incremento em área basal. O estudo foi desenvolvido com árvores da Floresta Amazônica, mensuradas no município de Porto Acre, estado do Acre, em área particular, sob manejo florestal sustentável, aprovado pelo Instituto do Meio Ambiente do Acre – IMAC. Com o Trado de Pressler, foram coletados, à altura do dap, quatro rolos de incremento de 0,5 mm de diâmetro e de, aproximadamente, 10 cm de comprimento, obedecendo os pontos cardeais. Os rolos foram extraídos de árvores amostra de *H. impetiginosus* (n=30) e *H. serratifolius* (n=35), em uma amplitude diamétrica entre 13,5 a 88,1 cm, totalizando 260 rolos de incremento. A largura dos anéis de crescimento foi medida sobre os raios no sentido casca/medula, em cada rolo de incremento com auxílio de mesa digitalizadora, com lupa acoplada e software TSAP-Win™ Scientific. A partir da largura dos anéis de crescimento, foram reconstruídas as dimensões do dap e as taxas de incremento correspondente ao período de 2011 a 2014. O modelo de regressão foi ajustado por Mínimos Quadrados Ordinários, considerando distribuição normal hipotética, com os Mínimos Quadrados Generalizados, considerando distribuição Gama e função de ligação logarítmica. A seleção das covariáveis considerou a correlação com o crescimento periódico anual em área basal. O modelo selecionado teve como variáveis selecionadas o logaritmo do diâmetro (ln<sub>d</sub>), altura (h), relação altura/diâmetro (h/d) e índice de competição de Hegyi (IC). A presença de multicolinearidade entre as covariáveis foi corrigida pelo procedimento de Regressão de Cumeeira. Com base nos critérios estatísticos e na avaliação residual, o modelo de crescimento ajustado com a adição da constante K=0,024 aos coeficientes do modelo demonstrou ser adequado para descrever a variação de incremento periódico anual em área basal (IPAg).

**Palavras-chave:** Regressão de cumeeira; Dendrocronologia; Incremento periódico.

## ABSTRACT

### MONOSPECIFIC EQUATIONS OF BASAL AREA INCREMENT OF *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.O.Grose (ipê amarelo) AND *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos (ipê roxo) OF TROPICAL PLUVIAL FOREST OF ACRE

AUTHOR: Loreнна Eleamen da Silva Gama

ADVISOR: César Augusto Guimarães Finger

In natural forests rarely considers the forest structure and the growth rate of the species as criteria for management, which is based on species groups with distinct characteristics. Given this assumption, this work was developed seeking to advance in the knowledge of the rate of growth of timber species exploited in the East of the State of Acre in order to contribute to the sustainable exploitation of these forests. For this was modeled the growth of *Handroanthus impetiginosus* (Mart. Ex DC.) Mattos (ipê roxo) and *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S. O. Grose (ipê amarelo) with measured data with the technique of growth ring analysis. In the regression model were investigated covariates associated with size and morphology of crown, competitive status, sanity and the load of lianas in the crown, as descriptors of the basal area increment rate. The study was carried out with Amazon rainforest trees, measured in the municipality of Porto Acre, Acre state, in particular area under sustainable forest management adopted by IMAC – Institute of environment of Acre. With the Pressler borer were collected, the height of the dbh, four rolls of increment of 0.5 mm in diameter and approximately 10 cm in length, obeying the cardinal points. The rolls were extracted from trees *H. impetiginosus* sample (n = 30) and *H. serratifolius* (n = 35) in a diametric amplitude between 13.5 cm to 88.1 cm dbh, totaling 260 rolls of increment. The width of the growth rings was measured on the rays towards bark/pith, in each roll with increment of tablet, with magnifying glass attached and TSAP-Win™ Scientific software. The width of the growth rings were rebuilt the dimensions of the dbh and the increment rates corresponding to the period from 2011 to 2014. The regression model was adjusted for Ordinary Least Squares considering hypothetical normal distribution, Generalized Linear Models considering distribution Gamma and logarithmic link function. The selection of the covariates considered the correlation with periodic basal area growth. The selected model had selected variables the diameter (dbh), height (h), h/d ratio and Hegyi competition index. The presence of multicollinearity between the covariates was corrected by Ridge Regression procedure. Based on statistical criteria and residual evaluation, adjusted growth model with the addition of the constant  $K = 0,024$  to the coefficients of the model proved to be suitable to describe the variation of periodic annual increment in basal area (IPAg).

**Keywords:** Ridge Regression; Dendrochronology; Periodic Increment.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Extensão e densidade relativa de (A) *Handroanthus impetiginosus* e (B) *H. serratifolius* na Amazônia Legal Brasileira. Os pontos brancos representam locais de coleções de herbário e os pontos pretos amostras de registros da espécie no inventário Radam Brasil ..... 20
- Figura 2 – Estrutura anatômica da madeira de *H. impetiginosus*. As setas indicam o limite dos anéis de crescimento, marcados pela faixa de parênquima marginal ..... 23
- Figura 3 – Mapa de localização das duas áreas de estudo, situadas no município de Porto Acre, Estado do Acre, Brasil. .... 29
- Figura 4 – Modelo esquemático utilizado para a medição dos raios de copa em campo com hipsômetro Vertex IV. .... 32
- Figura 5 – Modelo esquemático utilizado para a medição de variáveis de tamanho das árvores-amostra: d=diâmetro a altura do peito; h=altura total; hbc=altura na base da copa; cc=comprimento da copa; dc=diâmetro da copa. .... 32
- Figura 6 – Extração do rolo de incremento (A); Condicionamento para transporte (B) e secagem (C); Identificação e marcação das zonas de crescimento e contagem dos anéis anuais (D). .... 36
- Figura 7 – Gráficos de dispersão entre incremento periódico em área basal em função das variáveis independentes: dap - diâmetro a altura do peito em cm (a); h - altura em m (b); h/d - relação altura/diâmetro (c); dc - diâmetro de copa em m (d); APHC - Área de projeção de copa em m<sup>2</sup> (e); IA - índice de abrangência (f); IC<sub>Hegy</sub> - índice de competição dependente da distância de Hegyi (g). .... 47
- Figura 8 – Incremento periódico em área basal de *H. serratifolius* e *H. impetiginosus*, com base no incremento médio em cada classe de tamanho. .... 49
- Figura 9 – Distribuição das lianas na copa de *H. serratifolius* (ipê amarelo) e *H. impetiginosus* (ipê roxo): (Classe de Liana 1) árvores livres de lianas, n=35; (Classe de Liana 2) presença de lianas no fuste, n=18; (Classe de Liana 3) presença no fuste e copa, n=8; (Classe de Liana 4) presença no fuste e copa severa, n=0. .... 50
- Figura 10 – Traço de cume (*Ridge trace*), demonstrando os coeficientes de regressão padronizados em função de valores de K. .... 55
- Figura 11 – Fator de inflação da variância para as variáveis explanatórias. .... 55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipo de zona de crescimento encontrada e o nível de distinção dos anéis de crescimento para <i>H. serratifolius</i> e <i>H. impetiginosus</i> , segundo IAWA (1989).....	22
Tabela 2 – Modelos de incremento periódico anual em área basal desenvolvidos por Cunha (2013) para espécies tropicais no leste do estado do Acre. ....	38
Tabela 3 – Expressões para o cálculo do Fator de Inflação da Variância para Mínimos Quadrados Generalizados. ....	40
Tabela 4 – Estatísticas de ajuste e precisão de modelos de regressão. ....	42
Tabela 5 – Parâmetros do modelo desenvolvido por Cunha (2013) para <i>Cedrela odorata</i> e estatística de validação pelo Teste Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) para <i>H. serratifolius</i> e <i>H. impetiginosus</i> . ....	43
Tabela 6 – Parâmetros do modelo desenvolvido por Cunha (2013) para <i>Amburana cearensis</i> e estatística de validação pelo Teste Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) para <i>H. serratifolius</i> e <i>H. impetiginosus</i> . ....	44
Tabela 7 – Parâmetros do modelo desenvolvido por Cunha (2013) para <i>Copaifera paupera</i> e estatística de validação pelo Teste Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) para <i>H. serratifolius</i> e <i>H. impetiginosus</i> . ....	45
Tabela 8 – Parâmetros do modelo desenvolvido por Cunha (2013) para <i>Swietenia macrophylla</i> e estatística de validação pelo teste qui-quadrado ( $\chi^2$ ) para <i>H. serratifolius</i> e <i>H. impetiginosus</i> . ....	46
Tabela 9 – Correlação das variáveis potenciais mensuradas e calculadas com IPAg. ....	47
Tabela 10 – Estatísticas e parâmetros do modelo de incremento periódico em área basal para H. calculado por MQO para <i>H. serratifolius</i> e <i>H. impetiginosus</i> . ....	51
Tabela 11 – Diagnóstico de colinearidade para as variáveis independentes. ....	52
Tabela 12 – Estatísticas para o modelo de regressão por MQO, e o Fator de Inflação da Variância. ....	52
Tabela 13 – Estatísticas e parâmetros para o modelo de incremento periódico em área basal calculado por MQG para <i>H. serratifolius</i> e <i>H. impetiginosus</i> . ....	53
Tabela 14 – Estatísticas para o modelo de regressão por MQG, e o fator de inflação da variância de cada covariável. ....	54
Tabela 15 – Coeficientes de regressão, valores da constante K e VIF no modelo de incremento estimado pelo método Ridge Regression (RR). ....	56
Tabela 16 – Resultados do modelo de regressão ponderado e modelo de regressão por MQO. ....	57

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIC	Critério de Informação de Akaike
BIC	Critério Bayesiano de Schwarz
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
DAP	Diâmetro à Altura do Peito
GPS	Global Positioning System
IAWA	The International Association of Wood Anatomists
IMAC	Instituto de Meio Ambiente do Estado do Acre
IPAg	Incremento Periódico Anual em Área Basal
MQG	Mínimos Quadrados Generalizados
MQO	Mínimos Quadrados Ordinários
PMFS	Plano de Manejo Florestal Sustentável
RMSE	Root Mean Square Error
RR	Ridge Regression
UPA	Unidade de Produção Anual
VIF	Variance Inflation Factor

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>1.1 JUSTIFICATIVA</b> .....	16
<b>1.2 OBJETIVOS</b> .....	17
1.2.1 Objetivo geral .....	17
1.2.2 Objetivos específicos .....	17
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
<b>2.1 CARACTERIZAÇÃO E PESQUISAS GERAIS SOBRE O GÊNERO <i>Handroanthus</i></b> .....	18
2.1.1 <i>Handroanthus impetiginosus</i> (Ipê-roxo) .....	19
2.1.2 <i>Handroanthus serratifolius</i> (Ipê-amarelo) .....	19
<b>2.2 ANÉIS DE CRESCIMENTO DE ESPÉCIES TROPICAIS E PERIODICIDADE DE CRESCIMENTO</b> .....	21
<b>2.3 MODELAGEM DO CRESCIMENTO</b> .....	23
2.3.1 Modelos de crescimento .....	24
2.3.2 Modelos de crescimento para árvore individual .....	25
2.3.3 Validação e aplicabilidade de modelos de crescimento .....	25
<b>2.4 SOLUÇÃO PARA MODELOS DE PREDIÇÃO COM PROBLEMA DE MULTICOLINEARIDADE</b> .....	26
2.4.1 Solução matemática Regressão de Cumeieira de Hoerl e Kennard (1970) .....	27
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	29
<b>3.1 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO</b> .....	29
3.1.1 Seleção das espécies .....	30
3.1.2 Obtenção dos dados dendrométricos e morfométricos .....	31
3.1.3 Crescimento periódico anual em área basal (IPAg) .....	35
<b>3.2 MODELOS DE INCREMENTO PERIÓDICO ANUAL EM ÁREA BASAL (IPAg)</b> .....	37
3.2.1 Validação das equações para espécies tropicais desenvolvidas por Cunha (2013) .....	37
3.2.2 Modelagem da equação de regressão para <i>H. serratifolius</i> e <i>H. impetiginosus</i> . .....	38
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	43
<b>4.1 VALIDAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE INCREMENTO EM ÁREA BASAL ELABORADAS POR CUNHA (2013) PARA CEDRO (<i>Cedrela odorata</i>), CEREJEIRA (<i>Amburana cearensis</i>), COPAÍBA (<i>Copaifera paupera</i>) E MOGNO (<i>Swietenia macrophylla</i>) NA ESTIMATIVA DO IPAg DE <i>H. serratifolius</i> E <i>H. impetiginosus</i>. .....</b>	43

<b>4.2 MODELAGEM DO INCREMENTO PERIÓDICO ANUAL EM ÁREA BASAL (IPAg)</b> .....	46
4.2.1 Correlação e seleção das variáveis .....	46
4.2.2 Modelo de incremento periódico anual em área basal .....	50
4.2.3 Multicolinearidade em Mínimos Quadrados Ordinários e a Regressão de Cumeeira ( <i>Ridge Regression – RR</i> ).....	54
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	58
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	59
<b>APÊNDICE A – GRÁFICOS DE DISPERSÃO DAS VARIÁVEIS PARA OS DADOS DE INCREMENTO PERIÓDICO ANUAL EM ÁREA BASAL (IPAG) E AS COVARIÁVEIS. D1=DIÂMETRO A ALTURA DO PEITO; H=ALTURA TOTAL; HC= ALTURA COMERCIAL; HBC= ALTURA NA BASE DA COPA; CC= COMPRIMENTO DE COPA; DC=DIÂMETRO DE COPA; APHC= ÁREA DE PROJEÇÃO HORIZONTAL DA COPA; PCC= PROPORÇÃO DE COPA; IA=ÍNDICE DE ABRANGÊNCIA; HD=RELAÇÃO ALTURA/DIÂMETRO; IS=ÍNDICE DE SALIÊNCIA; FC=FORMAL DE COPA; IC=ÍNDICE DE COMPETIÇÃO DE HEGYI</b> .....	65
<b>APÊNDICE B – ÁRVORE-AMOSTRA DE <i>Handroanthus serratifolius</i> SERVINDO COMO APOIO PARA A <i>Guadua</i> sp. (TABOCA), DECORRENTE DA ABERTURA DE CLAREIRA.</b> .....	66
<b>APÊNDICE C – ALGUNS PROGRAMAS SAS UTILIZADOS NESTA PESQUISA....</b>	67

## 1 INTRODUÇÃO

Em florestas naturais, a taxa de extração fundamentada na associação de critérios que contemplem a estrutura da floresta e o ritmo de crescimento das espécies ainda é rara. Geralmente, o planejamento do manejo é realizado em nível de grupos de espécies com características distintas, não havendo a demonstração do real comportamento de cada espécie dentro da floresta. Somado a isso, existem circunstâncias em que os critérios de manejo não devem ser definidos apenas para a espécie, mas devem considerar o tipo e a estrutura da floresta.

Um exemplo frequente é a ocorrência do bambu como elemento principal ou secundário do sub-bosque (SILVEIRA, 2005; ACRE, 2006). No Acre, os planos de manejo aprovados não levaram em consideração a fragilidade da tipologia florestal, explorando-a com os mesmos princípios considerados para floresta densa, sem a ocorrência dessa gramínea.

A agressividade dessa espécie, após o corte de árvores, justifica a combinação de ciclos de cortes curtos, baixa intensidade de exploração e rotação das espécies a serem exploradas em cada ciclo (D'OLIVEIRA et al., 2013). Assim, conhecer o ritmo de crescimento das espécies e a dinâmica florestal é uma necessidade permanente de investigação.

Neste sentido, a gestão florestal sustentada necessita de dados confiáveis, hoje, inexistentes pela falta de rede de parcelas permanentes com medições de longo prazo. Para enfrentar essa falta, justifica-se a aplicação da análise de tronco para reconstruir o incremento a qualquer momento e, a partir dele, modelar o incremento periódico como variável dependente, proporcionando a diluição de possíveis erros de estimativa, corrigindo a flutuação do crescimento intra-anual, decorrente das condições ambientais (FINGER, 2010).

Em decorrência da variação de sítio e das condições de concorrência existentes no povoamento em florestas inequiâneas, a análise e a descrição da influência de variáveis dendrométricas, morfométricas e de competição devem ser consideradas na construção de modelos.

Essas informações associadas à ferramenta de modelagem de equações de crescimento florestal podem fornecer um registro confiável da evolução do conhecimento sobre as funções e estrutura da floresta, garantindo precisão e flexibilidade.

Contudo, frente à diversidade de espécies e condições de crescimento, a modelagem do crescimento das árvores deve considerar um conjunto muito menor de árvores, em grupos

funcionais (p.e. VANCLAY, 1991; PHILLIPS et al., 2004) ou árvore individual (p.e. SILVA et al., 2002).

Diante disso, os objetivos deste trabalho são analisar os fatores que influenciam o crescimento das espécies *Handroanthus serratifolius* e *H. impetiginosus* e ajustar uma equação capaz de prever o incremento periódico em área basal, como forma de fornecer subsídios ao manejo florestal no sudoeste da Amazônia.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A intensidade de extração e as taxas de corte ainda apresentam-se como um gargalo à garantia de sustentabilidade nos planos de manejo em florestas tropicais, pois não consideram o real potencial de crescimento das espécies dos tipos florestais. Da mesma forma, nesses estudos, não considerar a árvore como unidade de amostra impede inferir sobre a real capacidade de crescimento da espécie, que varia com a sua dimensão, a dimensão da copa e o grau de exposição da copa à luz decorrente da competição com outras espécies vegetais.

Pesquisas que visam avaliar a capacidade de recuperação do volume comercial das florestas tropicais naturais justificam a estratificação por grupos funcionais de espécies arbóreas comerciais ou árvore individual em virtude dos diferentes ritmos de crescimento, necessidades ambientais, intensidades de incidência de luz, dentre outros, onde estas respondem diferentemente ao espaço de crescimento disponível.

Na Amazônia, há modelos de crescimento para árvores individuais que consideram, como variáveis descritoras, a dimensão do tronco, da copa e a competição com árvores vizinhas, descrevendo o crescimento de *Cedrela odorata*, *Amburana cearenses*, *Copaifera paupera* e *Swietenia macrophylla* no leste do estado do Acre, ajustados por Cunha (2013). Nesta pesquisa, objetiva-se ampliar os conhecimentos quanto ao incremento potencial das espécies arbóreas *H. serratifolius* e *H. impetiginosus* no leste do estado do Acre, fornecendo informações específicas para essas espécies e tipologia florestal, a partir da modelagem do incremento periódico anual em área basal e verificar a validação das equações específicas de uma espécie para as demais pertencentes ao mesmo grupo funcional.

Assim, teremos embasamento para fornecer informações relevantes à garantia da sustentabilidade dos planos de manejo para essas espécies e para que possam ser aplicadas pelos órgãos ambientais do estado.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Contribuir com o conhecimento sobre a taxa de crescimento periódico em área basal para árvores individuais de *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.O.Grose (ipê amarelo) e *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos (ipê roxo) na floresta amazônica do Estado do Acre, com o propósito de auxiliar as práticas de manejo florestal.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- a) Descrever e caracterizar os anéis de crescimento de *Handroanthus serratifolius* e *Handroanthus impetiginosus*, demonstrando o uso da dendrocronologia na determinação do incremento de árvores individuais em floresta tropical.
- b) Avaliar as equações definidas por Cunha (2013) para espécies madeiras da floresta Amazônica com o propósito de descrever o crescimento periódico em área basal de *Handroanthus serratifolius* e *Handroanthus impetiginosus*.
- c) Reconstruir o incremento periódico em área basal mediante o emprego de análise de tronco parcial;
- d) Desenvolver um modelo de incremento periódico em área basal, descrevendo a correlação dele com as variáveis morfométricas da copa e competição;

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CARACTERIZAÇÃO E PESQUISAS GERAIS SOBRE O GÊNERO *Handroanthus*

As espécies do gênero *Handroanthus* Mattos são plantas arbóreas pertencentes à família Bignoniaceae, endêmicas da América tropical e subtropical. Esse gênero está amplamente distribuído no continente americano e é encontrado em populações naturais em quase todos os países da América Latina, com exceção do Chile (JUSTINIANO et al., 2000).

As espécies do gênero têm comportamento fenológico bastante similar, sendo quase todas decíduas, de crescimento baixo a moderado (LORENZI, 1992). Não estão associadas a uma determinada formação vegetal, podendo ocorrer em Floresta de Terra Firme, Floresta Estacional Perenifólia, Floresta Ombrófila (= Floresta Pluvial) e Floresta Ombrófila Mista (LOHMANN, 2015). No Acre, ocorre preferencialmente em florestas com bambu (SHANLEY & MEDINA, 2005).

As espécies de ipê, como são conhecidas, variam quanto a sua abundância e preferência por habitat, mas são semelhantes em muitos aspectos relacionados com a sua ecologia e reação a tratamentos silviculturais. São plantas heliófitas e requerem algum tipo de distúrbio (natural ou induzido) para estabelecerem-se por regeneração natural, desde que exista uma fonte ou um banco de sementes nas proximidades. São, portanto, susceptíveis ao manejo florestal, necessitando níveis de extração suficientemente altos para permitir a entrada de luz no interior da floresta (JUSTINIANO et al., 2000).

Em quase todas as espécies de *Handroanthus*, a fenologia reprodutiva e vegetativa estão intimamente ligadas com a disponibilidade de água no solo, sendo que algumas espécies requerem chuvas esporádicas, do tipo que se produz em época seca, para estimular o florescimento (BORCHERT, 1994).

Na Amazônia, a floração ocorre entre os meses de julho a dezembro (período caracterizado por estação seca). No Acre, ocorre entre os meses de julho a agosto, porém, permanece florido num período muito curto. O gênero pode apresentar comportamento biológico irregular, existindo variações na floração e na frutificação. Alguns autores afirmam que há necessidade de estudos, principalmente quando se refere a sua biologia reprodutiva em áreas exploradas e não exploradas. Alencar et al. (1979), a partir do acompanhamento fenológico no período de onze anos na floresta tropical úmida de terra firme, localizada na Reserva Ducke, estado do Amazonas, observaram que a espécie apresenta floração e frutificação duas vezes no mesmo ano e de forma irregular.

O gênero reúne várias espécies produtoras de madeira pesada, muito durável e de cor pardo castanho, geralmente características de árvores de crescimento lento. No Acre, as duas espécies exploradas e comercializadas no mercado madeireiro local são *Handroanthus impetiginosus* (ipê amarelo) e *Handroanthus impetiginosus* (ipê roxo).

#### 2.1.1 *Handroanthus impetiginosus* (Ipê-roxo)

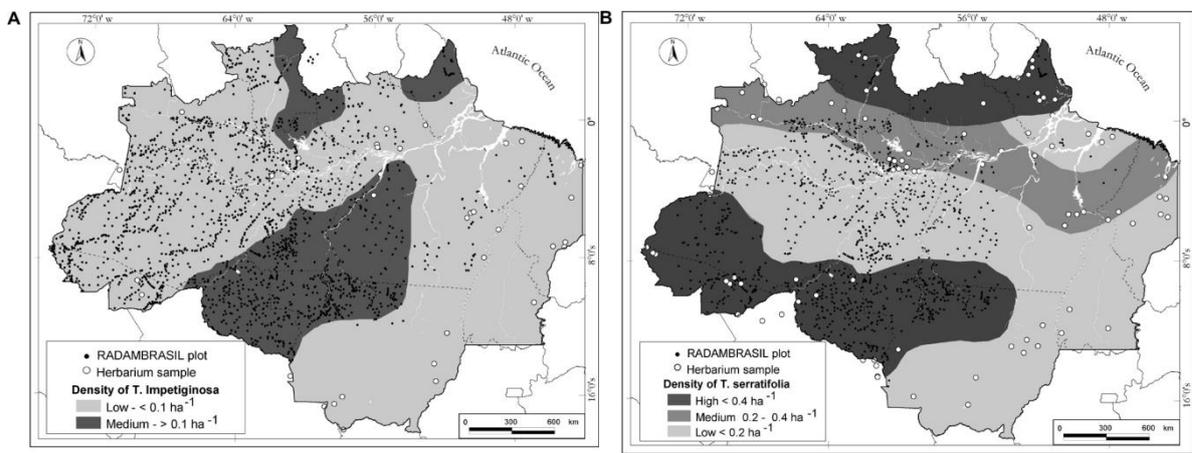
Árvore grande que usualmente alcança a posição de dossel superior ou emergente na floresta primária (PARROTA, 1995), com altura de 20-30 m no interior da floresta e tronco de 60-90 cm de diâmetro, ocorrendo medidas excepcionais de até 130 cm (JUSTIANO et al., 2000). Ritz & López (1990) indicam que, em condições naturais, os ipês roxos (*H. impetiginosa* e *H. heptaphylla*) mostram um incremento em altura que oscila entre 0,5 e 1,5 m por ano, alcançando dois metros em casos excepcionais. De crescimento lento a moderado, apresenta IMA de 5,50 m<sup>3</sup>/ha/ano (CAMPOS FILHO & SARTORELLI, 2015), a madeira é muito pesada, apresentando densidade 0,96 g/cm<sup>3</sup> (LORENZI, 2008), alburno distinto, cerne pardo-acastanhado, geralmente uniforme, sendo comum apresentar reflexos esverdeados (CAMPOS FILHO & SARTORELLI, 2015). A copa caracteriza-se por ser redonda e densa (JUSTINIANO et al., 2000). Planta decídua, heliófita, característica das florestas semidecíduas e pluvial. Apresenta ampla dispersão, porém descontínua em toda a sua área de distribuição. Ocorre tanto no interior da floresta primária como nas formações secundárias (LORENZI, 2008).

#### 2.1.2 *Handroanthus serratifolius* (Ipê-amarelo)

Árvore de porte médio a grande que usualmente alcança posição de dossel superior ou emergente em floresta primárias ou secundárias (PARROTA, 1995), com tronco de 60-80 cm de diâmetro. Em algumas florestas alcança até 50 metros (JUSTINIANO, 2000), sendo que o crescimento médio anual de *H. serratifolius* é relativamente lento, com uma média de 0,67 m em altura e 0,84 cm em diâmetro (KROLL et al., 1994), apresentando IMA de 6,6 m<sup>3</sup>/ha/ano (CAMPOS FILHO & SARTORELLI, 2015). Madeira pesada com densidade de 1,08 g/cm<sup>3</sup>, rica em cristais de lapachol, infinitamente durável sob quaisquer condições, cor castanha, com alburno distinto do cerne (CAMPOS FILHO & SARTORELLI, 2015). Possui copa pequena e irregularmente formada (KROLL et al., 1994), é decídua, heliófita, característica da floresta pluvial densa. É também largamente dispersa nas formações secundárias, como capoeiras e capoeirões, porém, tanto na mata como na capoeira, prefere solos bem drenados situados nas encostas. A sua dispersão é geralmente uniforme e sempre muito esparsa (LORENZI, 2008).

Ambas as espécies são amplamente distribuídas em toda a Amazônia brasileira, (Figura 1), tipicamente coexistentes dentro de uma determinada região ou floresta, sendo a densidade média das árvores >30 cm de diâmetro 0,11 e 0,32 árvores por ha para *H. impetiginosus* e *H. serratifolius*, respectivamente, ocorrendo em maior densidade no oeste do estado do Acre, de acordo com o inventário Radam Brasil (SCHULZE et al., 2008).

Figura 1 – Extensão e densidade relativa de (A) *Handroanthus impetiginosus* e (B) *H. serratifolius* na Amazônia Legal Brasileira. Os pontos brancos representam locais de coleções de herbário e os pontos pretos amostras de registros da espécie no inventário Radam Brasil.



Fonte: SCHULZE et al. (2008).

Nas atividades de exploração florestal, como descrito por Justiniano (2000), ambas as espécies têm sido exploradas e comercializadas como sendo uma só, refletindo um impacto negativo nas populações menos abundantes. No Brasil, mesmo havendo uma correta identificação taxonômica das espécies desse gênero na execução do inventário florestal, tanto no manejo como na atividade de comercialização, essas ainda são tratadas com o mesmo nome comum.

No mercado interno de produtos florestais, o preço médio do metro cúbico da madeira é informado pelo nome comum. O preço cotado para a tora de ipê é de 550,00 reais/m<sup>3</sup> (CEPEA, 2014), e a prancha de ipê alcança aproximadamente, 2.380,00 reais/m<sup>3</sup> (CEPEA, 2016). No Acre, a tora de ipê, no ano de 2015, apresentava um preço de 500,00 reais/m<sup>3</sup> na serraria, de acordo com pesquisa pela autora, apresentando o maior valor entre as espécies comercializadas na região.

As madeiras consideradas de alto valor pertencem a espécies valorizadas nos mercados de exportação na forma serrada e beneficiada. No ano de 2016, as exportações de

ipê no Acre somaram US\$ 188,164 mil, representando um crescimento de 192,91% em comparação ao ano de 2015, quando foram exportados US\$ 64,240 mil (SECEX, 2016).

## 2.2 ANÉIS DE CRESCIMENTO DE ESPÉCIES TROPICAIS E PERIODICIDADE DE CRESCIMENTO

A árvore é um ser vivo imóvel, cuja copa, tronco e raízes são capazes de reagir a fatores ambientais. Determinadas partes recebem os sinais do meio e outras reagem a esses sinais. Assim, os anéis anuais podem expressar, de uma forma muito complexa, a soma de todas as mudanças ambientais, permitindo que se façam medições dessas condições e de seus efeitos, tanto no ano de crescimento atual, como no passado (SCHWEINGRUBER, 1989).

Embora os princípios de datação dos anéis em árvores tenha sido descoberto na Grécia 322 a.C. pelo filósofo Theophrastus de Eresus ao reconhecer a natureza anual dos anéis. Apenas em 1901, o americano A. E. Douglass, considerado o pai da dendrocronologia, relacionou princípios dendrocronológicos simples com a pesquisa histórica, climatologia e astronomia (SCHWEINGRUBER, 1989).

A partir dos estudos de A. E. Douglass, outros pesquisadores desenvolveram trabalhos, como Jacoby (1989) e Gourlay (1995) que documentaram a existência de dois anéis por ano para árvores da África Oriental, crescendo em regiões com duas estações secas. Investigações em regiões sempre úmidas mostraram que os padrões de zona de crescimento nos troncos não poderiam ser atribuídos às correspondentes alterações no clima (COSTER, 1928 apud BOTOSSO, 2007, p. 50).

Por outro lado, Worbes (1995), em estudos nas florestas de várzeas na Amazônia Centra, constatou a formação de anéis em decorrência de alagações anuais dos rios Amazonas e Negro. Segundo o autor, a dormência cambial e os anéis anuais em árvores tropicais ocorrem devido às estações de seca ou inundações, que, em períodos secos do ano com duração de dois a três meses e uma precipitação menor que 60 mm/mês, induz a formação de anéis. Essa periodicidade do crescimento também é indicada pelo comportamento de queda das folhas. Tomazello Filho et al. (2000) encontraram que as árvores de espécies decíduas, como *Handroanthus serratifolius* e *Cedrella fissilis*, em estação experimental no estado de São Paulo, apresentam longos períodos, de até oito a nove meses, de dormência cambial, coincidentes com a queda das folhas.

As taxas de crescimento do tronco das árvores das diferentes espécies geralmente estão estreitamente relacionadas aos eventos fenológicos e às variações climáticas. No

entanto, além das condições climáticas, outros fatores podem exercer importante influência, como a idade, o vigor e a posição sociológica das árvores na população e as variações edáficas, dentre outras (TOMAZELLO FILHO et al., 2000).

Em outros termos, uma árvore crescendo abaixo do dossel denso recebe pouca ou nenhuma iluminação direta, o que reduz a fotossíntese e a atividade cambial, de modo que os anéis formados sejam estreitos. Em situação inversa, caso seja liberada após um período de supressão, poderá haver maior crescimento e, então, a formação de anéis mais largos. O mesmo ocorre em situação de competição com árvores vizinhas (SCHWEINGRUBER, 1989).

De acordo com Finger (2010), para descrever a variabilidade das taxas de crescimento em árvores individuais, o uso de uma variável de dimensão como variável dependente pode ser correlacionada com o efeito da competição sobre a forma e a dimensão da copa e as dimensões da árvore objeto.

A formação de anéis de crescimento em espécies tropicais está diretamente ligada ao estresse climático que induz a dormência cambial nas árvores (WORBES, 1999), sendo nítida a relação com a produção e a queda de folhas, a floração e a frutificação (JACOBY, 1989). Em árvores de espécies decíduas, p.e. *Handroanthus serratifolius*, a dormência cambial coincide com a queda das folhas (TOMAZELLO FILHO et al., 2000).

Para a distinção dos anéis de crescimento em *H. serratifolius* e *H. impetiginosus*, IAWA (1989) define a zona de crescimento com base em três tipos de estruturas: diferença na densidade do lenho inicial e do lenho tardio na madeira; faixas de parênquimas em toda a seção transversal, apresentando poucas fileiras de células e uma maior concentração de vasos no lenho inicial do que no lenho tardio (Tabela 1).

Tabela 1 – Tipo de zona de crescimento encontrada e o nível de distinção dos anéis de crescimento para *H. serratifolius* e *H. impetiginosus*, segundo IAWA (1989).

Espécie	Família	Zona de Crescimento	Dormência cambial*	Distinção dos anéis
<i>H. serratifolius</i> e <i>H. impetiginosus</i>	Bignoniaceae	Parênquima axial paratraqueal vasicêntrico a aliforme, confluyente; maior presença de vasos no lenho inicial, obstruídos por inclusões orgânicas; difuso, solitários e em múltiplos; finas linhas de parênquima marginal.	Estação seca amazônica coincidente com a queda das folhas	Pouco distintos

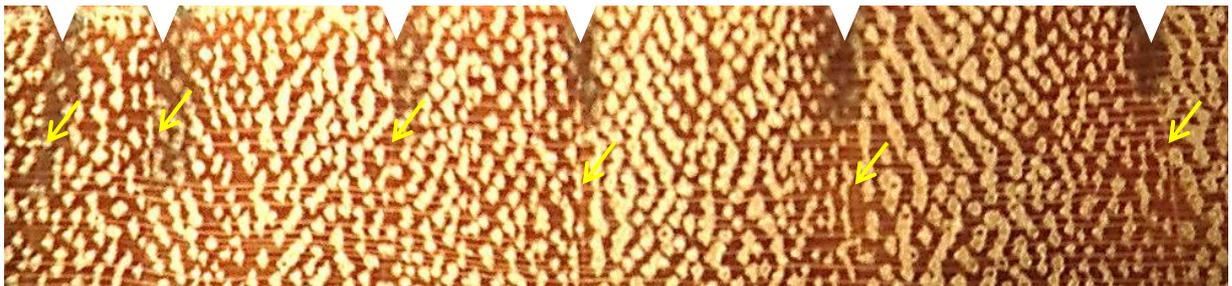
\*Período de redução de crescimento descrito por Alencar et al. (1979) e Justiniano et al. (2000).

Fonte: Autora (2017).

Como recomendações, pode ser apontado que:

- a) na descrição da zona de crescimento das espécies *H. serratifolius* e *H. impetiginosus*, a alternância de direção no sentido casca/medula e medula/casca na operação de lixamento facilita a visualização do parênquima marginal e evita regiões com as fibras dobradas em uma direção, além de necessitar de uma pressão adequada no acabamento, em virtude do processo ser manual.
- b) a extração de quatro rolos de incremento por árvore-amostra corrige eventuais erros de medição, em condições que os rolos de incremento pertencentes a uma única árvore apresentam anéis mais aglomerados e finos em uma direção e mais espaçados e largos em outra direção (medula excêntrica).

Figura 2 – Estrutura anatômica da madeira de *H. impetiginosus*. As setas indicam o limite dos anéis de crescimento, marcados pela faixa de parênquima marginal.



Fonte: Autora (2017).

A confirmação do potencial dendrocronológico para estimar-se a idade e o crescimento diamétrico das árvores é uma etapa vencida para algumas espécies tropicais, contudo, é importante a ampliação do conhecimento para locais ou espécies ainda não estudadas (MATTOS et al., 2011).

A medição do crescimento por análise de tronco parcial permite suprir a falta de medições contínuas de longo prazo e também surge como uma alternativa ao método destrutivo de análise de tronco completa. Os desvios que podem ocorrer nessa técnica são reduzidos com o aumento de amostras, em que são extraídos quatro rolos de incremento na altura do dap para cada árvore-amostra.

### 2.3 MODELAGEM DO CRESCIMENTO

No crescimento e produção florestal, o desenvolvimento de modelos e sistemas de simulação de crescimento apresenta um papel importante, pois permite reproduzir biometricamente uma floresta e a sua estrutura (PRETZSCH, 2008).

Os modelos que expressam o crescimento podem ser classificados de acordo com o nível de detalhe que fornecem, como aplicáveis à floresta, à classe de tamanho ou para a árvore. Podendo ser distinguidos entre modelos deterministas, quando fornecem uma estimativa do crescimento esperado de um povoamento florestal, indicando a tendência média esperada para uma população. No entanto, devido à influência dos fatores ambientais, esse crescimento pode ser menor ou maior do que o esperado. Já os modelos estocásticos tentam ilustrar o crescimento por variação natural, proporcionando boas previsões para diferentes cenários, cada um com uma probabilidade específica de ocorrência (VANCLAY, 1994).

O mesmo autor ainda ressalta que modelos desnecessariamente complicados podem resultar em maiores custos computacionais, perda na precisão das estimativas e dificuldade em entender e avaliar a utilidade do modelo, sendo de suma importância atentar-se a questionamentos como: i) a abordagem faz sentido biologicamente?; ii) o modelo funcionará para a aplicação desejada aos dados de entrada?; iii) qual escala de dados foi usada para desenvolver o modelo?; iv) as suposições e as inferências do modelo aplicam-se à situação?; v) que confiança pode ser esperada nas previsões do modelo?; vi) ser cético e exigir provas.

### **2.3.1 Modelos de crescimento**

Os primeiros modelos de crescimento florestal foram construídos no início da década de 1960 e, a partir de 1980, foram desenvolvidas novas técnicas rapidamente em decorrência da expansão da capacidade computacional, surgindo os modelos ecofisiológicos, que estabeleciam relações causais complexas para prever os processos de crescimento florestal em relação às condições ecológicas (PRETZSCH, 2008).

Conforme o mesmo autor, a história subsequente dos modelos florestais forneceu um registro do conhecimento crescente sobre as funções e estruturas florestais, bem como os métodos cada vez mais sofisticados de previsões de crescimento florestal a longo prazo. Por outro lado, não houve uma sequência contínua de melhores modelos que substituíssem os anteriores, tornando-os inferiores, mas diferentes tipos de modelos com diversos objetivos e concepções foram desenvolvidos simultaneamente, ou seja, o melhor modelo seria aquele que cumprisse melhor o seu objetivo.

A pesquisa de crescimento florestal deriva das relações de crescimento de árvores em parcelas experimentais já estabelecidas e agrega os resultados em modelos de crescimento florestal, permitindo, assim, que as consequências relacionadas ao rendimento, financeiras e

ecológicas de novos regimes de gestão ou oriundas de distúrbios possam ser previstas sem estabelecer novas experiências, pois, devido à característica de longevidade dos povoamentos florestais, novos regimes de manejo simplesmente não possam ser testados experimentalmente (PRETZSCH, 2008).

### **2.3.2 Modelos de crescimento para árvore individual**

Pretzsch et al., (2002) ressaltam que modelos de crescimento em nível de povoamento apresentam a deficiência de apenas descrever os valores médios da floresta. Ao contrário, os modelos de árvore individual apresentam-se mais detalhados e permitem descrever povoamentos puros e mistos, de todas as estruturas etárias e padrões, proporcionando maior flexibilidade, definindo-os como particularmente mais adequados para responder a novos propósitos de manejo.

Esses modelos são preferíveis, em algumas circunstâncias, porque mantêm informações sobre cada árvore em uma floresta de forma detalhada, o que proporciona o maior nível de informação e, a partir da obtenção de dados adequados, podem fornecer, de forma confiável, o rendimento sustentável da madeira, além de permitir examinar os impactos do manejo florestal no povoamento (VANCLAY, 1994; WEISKITTEL et al., 2011).

Em modelos que descrevem o crescimento de árvore individual, é imprescindível obter as características da árvore, como variáveis de dimensão, e o máximo de fatores de perturbação, como competição simétrica e assimétrica, dentre outros fatores que possam interagir e afetar o crescimento (FINGER, 2010).

No sudoeste da Amazônia, Braz (2010) e Cunha (2013) desenvolveram, respectivamente, estudo de crescimento com grupos de espécies, definidos pelo grau de crescimento e de árvores individuais, por espécie.

### **2.3.3 Validação e aplicabilidade de modelos de crescimento**

Modelos de crescimento, em geral, devem ser elaborados numa perspectiva de curto ou médio prazo, sendo propostos para certas espécies ou tipos de floresta em condições locais, devendo existir implicações com a alteração das condições ou aplicação do modelo numa área geográfica mais ampla ainda (PRETZSCH et al., 2002).

Rykiel Jr. (1996) ressalta que a validação não é um procedimento para testar a teoria científica ou para certificar a "verdade" da compreensão científica atual, mas uma demonstração que um modelo, dentro do seu domínio de aplicabilidade, possui uma gama satisfatória de precisão, consistente com a aplicação pretendida. No caso da análise se o modelo é aceitável para uso, não é assumido como uma verdade absoluta, nem mesmo que é o melhor modelo disponível. Em outros termos, um modelo é declarado válido dentro de um contexto específico.

Em estudos com espécies madeireiras tropicais na Amazônia, Cunha (2013) identificou que muitos sistemas de predição teriam aplicabilidade restrita sem a modelagem de outra dimensão estimável como o crescimento em altura, o ingresso das classes de diâmetro, a mortalidade e a regeneração. No entanto, o mesmo autor relata que, no ambiente Amazônico, a obtenção de dados confiáveis do crescimento em altura é uma tarefa difícil.

Rykiel Jr. (1996) abordou a restrição de uso de modelos devido a disponibilidade de dados. Em sentido pragmático, afirmou que um modelo só precisa ser bom o suficiente para realizar os objetivos da tarefa a que se aplica, ou seja, se o contexto mudar, o modelo deve ser revalidado. No entanto, isso não invalida o modelo para o contexto em que foi ajustado originalmente.

#### 2.4 SOLUÇÃO PARA MODELOS DE PREDIÇÃO COM PROBLEMA DE MULTICOLINEARIDADE

Na Ciência Florestal, a análise de regressão de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) é um método estatístico usual, apresentando-se como uma ferramenta prática para a análise de dados. A "análise de regressão múltipla é uma técnica estatística empregada para analisar a relação entre uma única variável dependente e múltiplas variáveis independentes (preditoras, X)" (HAIR et al, 2009) ou seja, a regressão múltipla procura prever uma variável resposta (dependente, Y), assumindo uma relação linear com diversas variáveis independentes, tendo como objetivo resumir a correlação entre  $X_i$  e  $Y_i$  em termos da direção (positiva ou negativa) e magnitude (fraca ou forte) dessa associação (FIGUEIREDO FILHO et al., 2011).

No entanto, é observável nesse método que, diante de um número grande de covariáveis, é comum que algumas dessas variáveis, ou combinações lineares entre elas, sejam altamente relacionadas, resultando em um problema denominado multicolinearidade (COSTA, 2015).

Muitos procedimentos buscam detectar a existência de multicolinearidade, os mais simples e usualmente utilizados, os chamados métodos informais, como: a) analisar se o efeito que a exclusão ou a inclusão de uma variável provoca grandes alterações nos coeficientes de regressão estimados, ou efeito semelhante, se uma observação associada a um coeficiente é alterada ou retirada; b) se coeficientes de regressão apresentam resultados não-significativos em testes individuais para variáveis independentes sabidamente importantes; c) se coeficientes de regressão não apresentam o sinal algébrico esperado em consonância com experiências anteriores; e, além desses, os métodos de exame do determinante  $X'X$ , análise da matriz de correlação, análise dos auto-vetores e auto-valores de  $X'X$  e fatores de inflação da variância (BELSLEY et al., 1980; DRAPER e SMITH, 1998; SCOLFORO, 2005). Diante da presença de multicolinearidade, um dos métodos alternativos para melhorar a precisão e o ajuste podem ser empregadas a regressão em componentes principais e a regressão em cristas ou cumeeira.

A colinearidade ocorre quando as variáveis independentes de um modelo estão correlacionadas em maior ou menor grau do que entre a variável dependente, resultando na inflação da variância dos estimadores da regressão. Os valores limites de detecção da influência da colinearidade não são definidos de forma unânime. Montgomery e Peck (2006) consideram que não devem exceder quatro ou cinco, Draper e Smith (1998), Monserud e Sterba (1996), Freund e Wilson (1998) e Scolforo (2005) propõem que o Fator de Inflação da Variância (VIF) seja menor que 10.

#### **2.4.1 Solução matemática Regressão de Cumeeira de Hoerl e Kennard (1970)**

Na presença de multicolinearidade (ou seja, existência forte de correlação entre duas (ou mais) variáveis independentes), Hoerl e Kennard apresentaram uma solução matemática que consiste em adicionar um pequeno valor constante,  $K$ , aos elementos diagonais da matriz de correlação e, em seguida, resolver de maneira usual os coeficientes de regressão. Assim, o modelo passa a ser expresso por  $\beta^* = (X'X + kI_p)^{-1} X'y$ , onde a constante  $K$  assume qualquer valor positivo, geralmente entre zero e um. Quando  $K$  é zero, as estimativas são iguais às resultantes nos Mínimos Quadrados Ordinários e quanto maior o valor de  $K$ , maior o viés (BARE e HANN, 1981).

De acordo com os autores, a regressão de cumeeira apresenta três critérios para a seleção do "melhor" valor de  $K$ , sendo estes: traço de cumeeira, fator de inflação de variância e determinante da matriz de correlação.

A análise de crista ou traço de cumeeira consiste em estimar o valor  $K$ , para o qual as estimativas de  $\beta^*$  se estabilizem-se.

O Fator de Inflação da Variância (VIF) é considerado alto quando maior que 10, o que induziria à inclusão de variáveis desnecessárias no modelo,  $\leq 10$  esse valor é considerado adequado. Quando o determinante da matriz de correlação for  $< 1$ , existe multicolinearidade e quanto mais próximo do valor 1, afastando-se de zero, reduz o problema da multicolinearidade (MONSERUD e STERBA, 1996; CHATTERJEE et al., 2000; SCOLFORO, 2005).

O método de regressão em cumeeira é usual em estudos de melhoramento, genética e reprodução (DIAS, 2008; CARDOSO et al. 2008; COSTA, 2015; YAMAGUCHI, 1985). Hilt e Seegrist (1977) consideram-no uma técnica estatística útil aos silvicultores, ao permitir estimar coeficientes para modelos de regressão múltipla, quando as variáveis independentes estão altamente correlacionadas.

Na área florestal Bare e Hann (1981) estudaram a aplicabilidade do método como ferramenta para lidar com multicolinearidade em regressão linear múltipla. A primeira aplicação demonstra a utilidade da regressão de cume para a seleção de variáveis independentes durante o desenvolvimento de um modelo de crescimento da área basal do pinus ponderosa. O uso da regressão de cume produziu um modelo preditivo significativo com coeficientes interpretáveis. Em uma segunda aplicação, com um modelo previamente especificado, a regressão de cume é usada para desenvolver um modelo descritivo para estimar o valor da terra. No último caso, o objetivo foi produzir estimativas precisas e estáveis dos parâmetros do modelo e não prever a variável dependente.

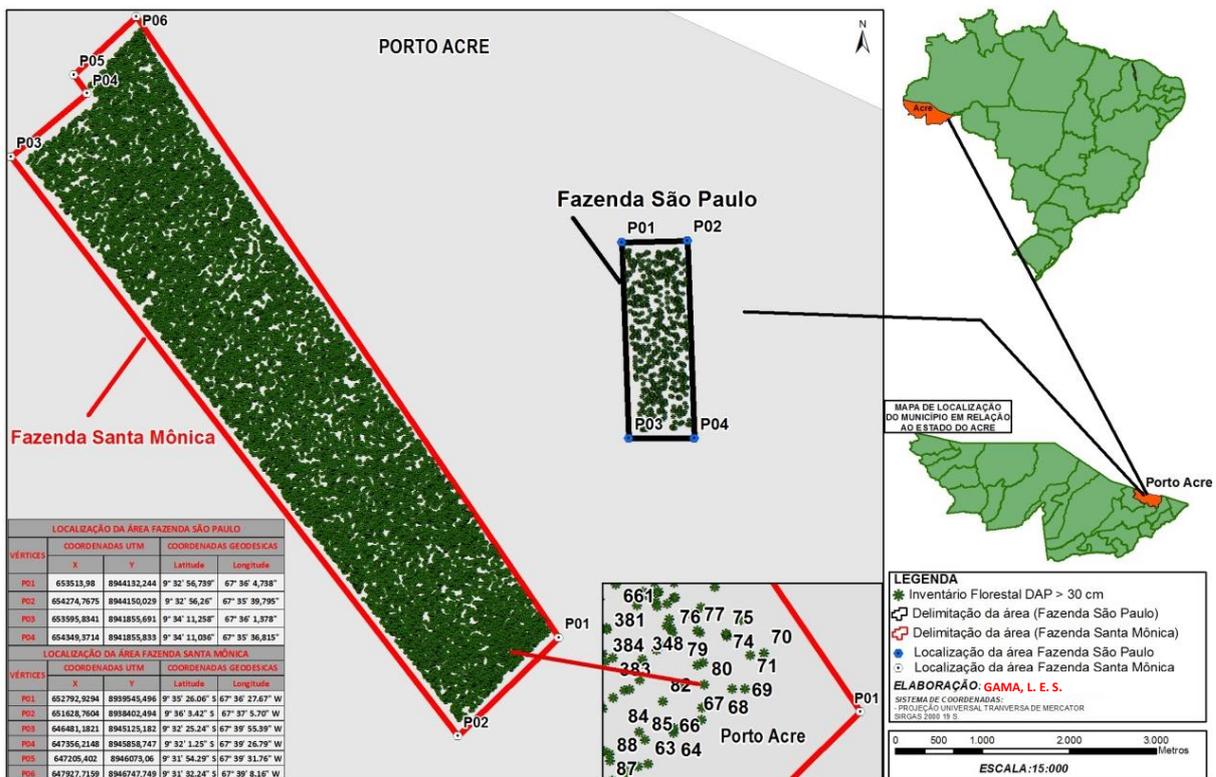
Em uma terceira aplicação, Angelo (1994) utiliza o procedimento *Ridge Regression* – *RR* como um estimador alternativo ao método dos Mínimos Quadrados Ordinários, para os casos de modelos econométricos com matrizes de dados mal condicionados, na qual, dada a maior estabilidade, esses estimadores são mais recomendados.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

O estudo foi realizado com dados medidos em dois locais: Fazenda São Paulo e Fazenda Santa Mônica, localizadas no km 50 e 47 da Rodovia AC 10, respectivamente, no município de Porto Acre, Estado do Acre, Brasil, Figura 3.

Figura 3 – Mapa de localização das duas áreas de estudo, situadas no município de Porto Acre, Estado do Acre, Brasil.



Fonte: Autora (2017).

Os dados foram medidos em duas Unidades de Produção Anual (UPAs) definidas em um Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS), aprovado pelo IMAC - Instituto do Meio Ambiente do Acre. A UPA/Fz. São Paulo possui 228 hectares e UPA/Fz. Santa Mônica 1.382 hectares, exploradas no ano de 2008 e 2013, respectivamente.

O clima nos locais avaliados foi, segundo a classificação Köppen, do tipo Am, equatorial, quente e úmido, temperaturas médias anuais variando entre 24,5 °C e 32 °C, precipitação média anual entre 1800 e 2000 mm.ano<sup>-1</sup>, característico em todo o estado e região amazônica (ACRE, 2006).

Nos meses de outubro a abril comumente ocorrem chuvas torrenciais, contrastando com a estação seca, que ocorre entre os meses de junho e agosto. (SOMBROEK, 2001).

As principais classes de solo para a UPA/Fz. Santa Mônica são ARGILOSO VERMELHO Distrófico latossólico, ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abrupto, desestruturado, sem afloramentos rochosos e profundos. Para a UPA/Fz. São Paulo ARGISSOLO VERMELHO Distrófico latossólico e ALISSOLO CRÔMICO Argilúvico típico, textura média/argilosa.

A vegetação nos dois locais é classificada como floresta primária, com as tipologias florestais: Floresta aberta com bambu mais Floresta Aberta com Palmeira, tipologias predominantes no estado do Acre (ACRE, 2006), com a maioria das espécies despida de folhas (decíduas) na estação seca e com a formação de novas folhas a partir dos meses de outubro-novembro.

Com base em observações de campo, as áreas apresentam árvores de grande porte, formando três ou mais estratos com um dossel médio de, aproximadamente, 25 a 35 metros de altura, com diâmetros que alcançam, com facilidade, um metro.

### 3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS

O levantamento dos dados consistiu em duas etapas que serão descritas nos tópicos a seguir.

#### 3.1.1 Seleção das espécies

A localização das espécies foi obtida através de coordenadas geográficas a partir do inventário censitário (100% das árvores medidas com diâmetro e altura do peito (dap) iguais ou superiores a 30 cm, como previsto na Instrução Normativa Nº 5, de 11 de dezembro de 2006). Árvores com dap menores que 30 cm foram encontradas com caminhamento na floresta.

Para a seleção das espécies, foi realizado um estudo prévio na UPA/Fz. São Paulo, com 56 árvores de espécies madeireiras e de valor comercial, como: *Astronium lecointei* Ducke, *Handroanthus impetiginosus* (Mart. Ex DC.) Mattos, *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.O. Grose, *Dipteryx odorata* Willd., *Hymenaea courbaril* L. e *Bertholletia excelsa* H.B.K. Neste estudo, foi monitorado o crescimento por meio de dendrômetros de banda a partir de janeiro de 2011. Entretanto, devido à falta de repetibilidade da amostragem das

árvores com dendrômetros, foram considerados como critérios de seleção: a) visibilidade dos anéis de crescimento; b) frequência das espécies na área para obter-se um número suficiente em cada classe diamétrica; c) facilidade para obtenção de amostras de rolo de incremento; d) valor comercial da madeira.

Das seis espécies, *H. serratifolius* e *H. impetiginosus* foram selecionadas para o presente estudo devido à frequência nas classes diamétricas, visibilidade dos anéis de crescimento e facilidade para obtenção de amostras de rolos de incremento.

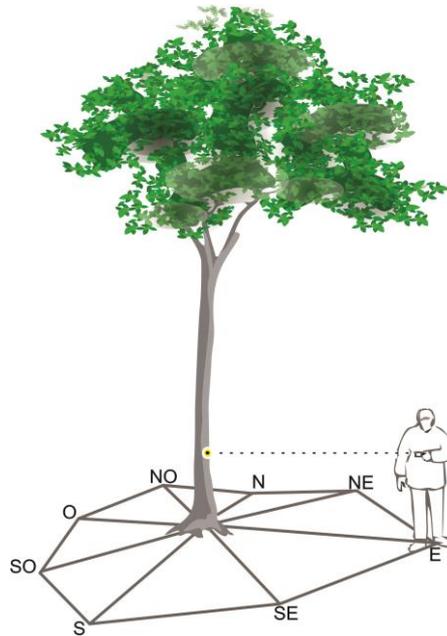
### **3.1.2 Obtenção dos dados dendrométricos e morfométricos**

As variáveis dendrométricas de tamanho e forma foram medidas em coletas de campo realizadas nas duas áreas. As árvores foram, primeiramente, localizadas nas UPA's por meio de coordenadas por GPS em conjunto com mapa base do inventário florestal ou por caminhar na floresta, quando se tratava de árvores com dap < 30 cm.

As variáveis dendrométricas de dimensão e forma medidas foram:

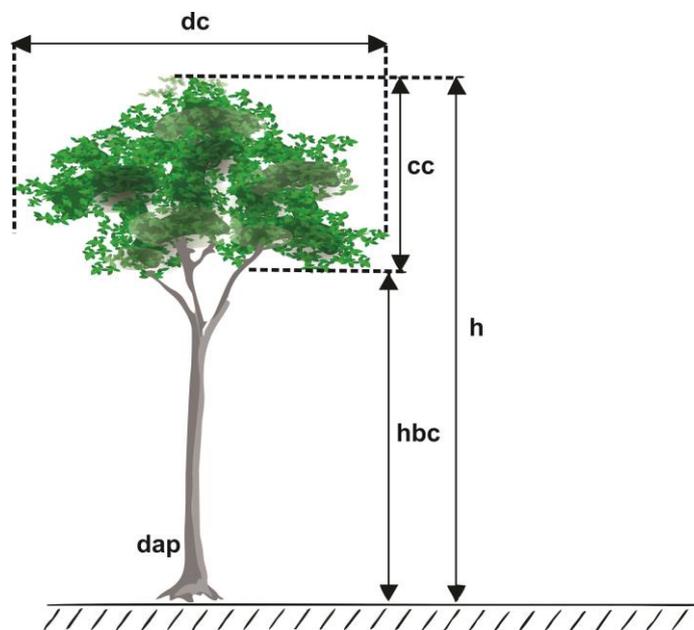
- a) Diâmetro à altura do peito (dap): medida com fita diamétrica, em centímetros (Figura 4);
- b) Altura total: medida com hipsômetro Vertex IV, em metros (Figura 5);
- c) Comprimento da copa: medida com hipsômetro Vertex IV, em metros (Figura 5);
- d) Raios de copa: medidos em metros em oito direções, segundo os pontos cardeais e colaterais, com auxílio de hipsômetro Vertex IV (Figura 4);

Figura 4 – Modelo esquemático utilizado para a medição dos raios de copa em campo com hipsômetro Vertex IV.



Fonte: Adaptado de Pretzsch (2009).

Figura 5 - Modelo esquemático utilizado para a medição de variáveis de tamanho das árvores-amostra:  $d$ =diâmetro a altura do peito;  $h$ =altura total;  $hbc$ =altura na base da copa;  $cc$ =comprimento da copa;  $dc$ =diâmetro da copa.



Fonte: Adaptado de Cunha (2013).

Quanto às variáveis qualitativas, foram obtidas:

- a) Posição sociológica: indica a posição vertical da árvore amostra em relação às suas vizinhas (KRAFT, 1884 apud ASSMANN, 1968, p. 84);

- b) Posição da copa: Definida segundo a intensidade de luz que chega à copa (DAWKINS, 1963), sendo classificadas como: (1) completa luz vertical e lateral; (2) completa luz vertical; (3) certa luz vertical; (4) certa luz lateral; (5) sem luz direta;
- c) Forma de copa: As árvores-amostra foram classificadas de acordo com Dawkins (1963), segundo a forma da copa em: (1) círculo completo (perfeita); (2) círculo irregular (boa); (3) meio círculo (tolerável); (4) menos de meio círculo (pobre); (5) poucos ramos (muito pobre).
- d) Infestação de liana: Avaliados de forma visual, os níveis de infestação como: (1) árvore livre de liana, (2) presença no fuste, (3) presença no fuste e na copa, (4) presença no fuste e na copa severa (KAINER et al., 2006; CUNHA, 2013).

Índices morfométricos foram calculados e incluídos às covariáveis explicativas da variabilidade do crescimento periódico em área basal, conforme descrito por Burguer (1939 apud FINGER, 2010, p. 50), a quem se devem as primeiras caracterizações e modelos de copa.

- a) Comprimento de copa em metros (cc) definido pela diferença entre a altura da árvore (h) e altura na base da copa (hbc).
- b) Diâmetro da copa em metros (dc) determinado a partir do raio médio oriundo dos oito raios de copa.
- c) Área de projeção de copa

A área de projeção de copa sobre o solo descreve o espaço ocupado pela árvore e foi determinada por:

$$\text{Área de proj. de copa} = \frac{\pi}{4} * dc^2 \quad (1)$$

- d) Proporção de copa

A proporção de copa corresponde à relação entre o comprimento da copa e a altura total da árvore, funcionando como um dos indicadores de vitalidade e também do grau de competição sofrido (FINGER, 2010). Dada pela fórmula:

$$\%_{copa} = \frac{cc}{h} * 100 \quad (2)$$

## e) Índice de abrangência

O índice de abrangência é expresso pela relação entre o diâmetro da copa e a altura da árvore e serve como indicador da necessidade de espaço vital da árvore com o aumento da idade e altura. Obtido por:

$$IA = \frac{dc}{h} \quad (3)$$

## f) Relação h/d

A relação h/d é a relação entre a altura da árvore e o diâmetro à altura do peito. Caracteriza a estabilidade das árvores, quanto mais alta a relação h/d tanto maior a instabilidade da árvore.

$$h/d = \frac{h}{dap} \quad (4)$$

## g) Índice de Saliência ou Índice de Espaço de Crescimento de Seebach

Esse índice expressa quantas vezes o diâmetro de copa é maior que o dap. É obtido pela relação entre o diâmetro de copa e o diâmetro a altura do peito, ou seja:

$$IS = \frac{dc}{dap} \quad (5)$$

## h) Formal de copa

O formal da copa é expresso pela relação entre o diâmetro e o comprimento da copa. Quanto menor o formal de copa, maior o manto de copa, resultando em maior a produtividade. Pode ser obtido pela fórmula:

$$fc = \frac{dc}{cc} \quad (6)$$

Na sequência da descrição numérica da concorrência, foi calculada, para cada árvore amostra, o índice de competição dependente da distância de Hegyi, proposto por Sabatia e Burkhart (2012). Na determinação, foi considerado um expoente unitário para o cociente de tamanho ( $d_j/d_i$ ). Para o termo da distância ( $1/dist_{ij}$ ) entre a árvore objeto ( $d_i$ ) e as competidoras ( $d_j$ ), testou-se potências variando entre 0,0 a 0,75 com intervalos de 0,05. A

partir da análise de estabilização das estatísticas, adotou-se o valor de 0,35 para o expoente. Diversos autores (p.e. Lorimer, 1983) utilizam um expoente para uso em quantificação da competitividade em florestas mistas.

Assim, o índice de Hegyi passou a ser expresso, como:

$$IC_{\text{Hegyi}} = \sum_{j=1} \left[ \frac{d_j}{(d_i * dist_{ij}^{0,35})} \right] \quad (7)$$

Tendo como referência a árvore objetivo, a competição vertical foi considerada como proposto por Schwinning e Weiner (1998), sendo declaradas competidoras as árvores circunvizinhas que se localizavam dentro de uma área formada por dois ângulos verticais de 45°, denominada zona aberta para o crescimento. Assim, baseado nesse pressuposto, empregou-se a seguinte expressão para selecionar, de forma numérica, as árvores competidoras:

$$\text{Tang } 45^\circ = \frac{h_j - hbc_i}{Dist_{ij}} = 1 \rightarrow Dist_{ij} \leq h_j - hbc_i \quad (8)$$

onde:  $h_j$ ,  $hbc_i$  e  $Dist_{ij}$  = altura total de cada árvore competidora, altura na base da copa e distância horizontal entre a  $i$ -ésima árvore objetivo e a  $j$ -ésima árvore competidora, respectivamente.

Cada árvore competidora teve mensuradas: a altura e a altura comercial (definida pela distância do nível do solo ao primeiro galho), o diâmetro à altura do peito ( $d_j$ ), a distância desde a árvore objetivo ( $Dist_{ij}$ ), assim como o nome vulgar e científico da árvore.

### 3.1.3 Crescimento periódico anual em área basal (IPAg)

O crescimento periódico em área basal foi determinado pelo método de diferenciação anatômica e classificação das zonas de crescimento (Worbes, 1995) em rolos de incremento de 0,5 mm de diâmetro e de, aproximadamente, 10 cm de comprimento, extraídos radialmente do fuste na altura do dap (Cunha, 2013), obedecendo aos pontos cardeais.

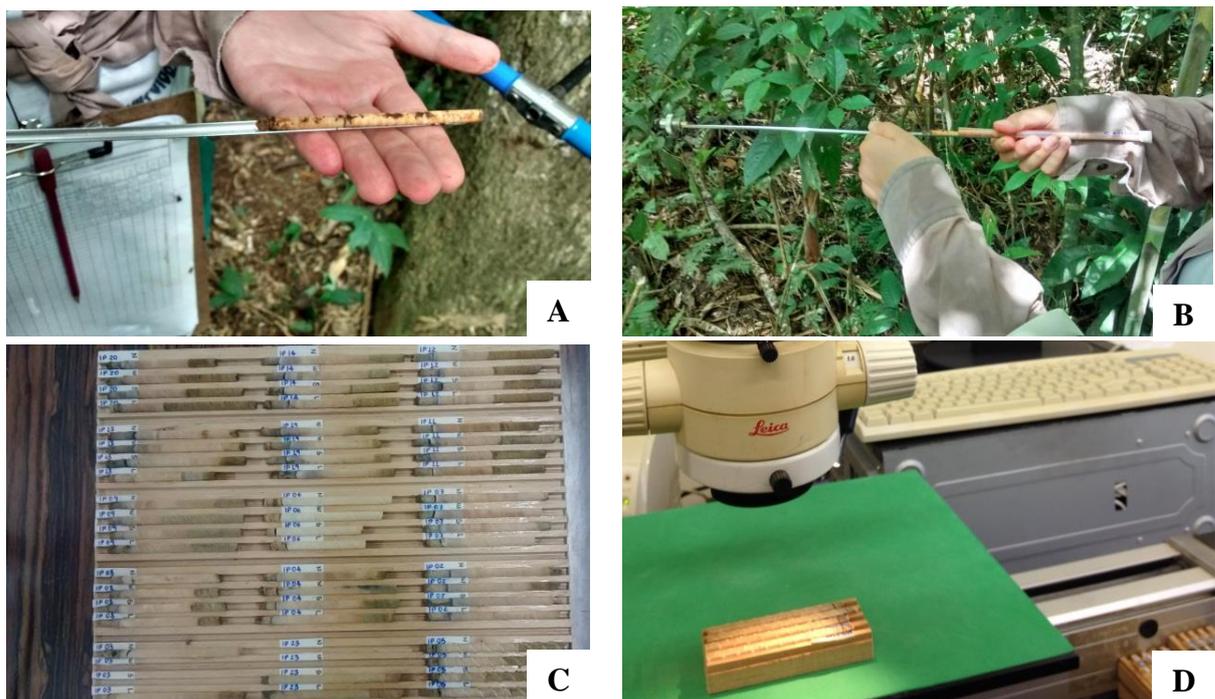
Os rolos de incremento foram extraídos de 65 árvores amostra de *H. impetiginosus* (n=30) e *H. serratifolius* (n=35), totalizando 260 rolos de incremento, quatro para cada árvore-amostra, coletados e acondicionados individualmente em canudos (Figura 2B) e, posteriormente, secos em condições ambientais (Figura 2C).

Para controle de amostragem adotou-se como base a distribuição retangular das classes diamétricas e a facilidade de acesso às árvores-amostra.

A preparação das amostras consistiu na fixação dos rolos de incremento com um adesivo à base de PVA, em um suporte de madeira de dimensões 30 cm por 20 cm, contendo ranhuras alongadas de dimensões de 0,5 mm. Para o preparo da superfície das amostras de madeira, utilizou-se uma lixadeira circular com cintas de lixa, obedecendo a sequência de grão 100, 125, 150, 180, 220 e 340.

Posteriormente, em virtude da presença de pó nos poros das amostras decorrente do processo de lixamento, estas foram submetidas a jatos de ar com o uso de um compressor de ar elétrico.

Figura 6 - Extração do rolo de incremento (A); Condicionamento para transporte (B) e secagem (C); Identificação e marcação das zonas de crescimento e contagem dos anéis anuais (D).



Fonte: Autora (2017).

No processo de lixamento, foi realizado o lixamento nos dois sentidos da amostra, primeiramente, casca-medula e, posteriormente, medula-casca, evitando, assim, a sobreposição das fibras do lenho, facilitando a visualização do parênquima marginal.

É importante que a superfície das amostras seja preparada com muito cuidado, para aumentar a visibilidade das zonas de crescimento. Worbes (1995) afirma que, na preparação

de amostras, o método de lixar utilizando lixas com grão decrescente e umedecendo a amostra com água durante a observação, muitas vezes, melhora os contrastes dos limites das zonas de crescimento.

A partir da correta marcação, definição e identificação das camadas de crescimento, os anéis de crescimento foram contados e o incremento radial medido em uma mesa micrométrica com deslocamento horizontal, acoplada a um microscópio estereoscópico com precisão de 0,01 mm, usando o programa Time Series Analysis Program – 1996 (RINN,1992).

Com as medidas do incremento radial e o diâmetro da árvore, foi determinado o incremento periódico anual em área basal em centímetro quadrado (cm<sup>2</sup>) em anos anteriores, obtendo o diâmetro inicial em centímetros (cm) para cada árvore individual pela expressão:

$$IPAg_i = \left[ \frac{\pi}{4} (dap - dap_{-t}^2) \right] / t \quad (9)$$

onde: IPAg<sub>i</sub> = Incremento periódico anual em área basal em centímetros quadrados/ano; dap = diâmetro à altura do peito no final do período em cm; dap<sub>-t</sub> = diâmetro à altura do peito no início do período em cm; t= período em anos igual a 3 anos, t=3.

## 3.2 MODELOS DE INCREMENTO PERIÓDICO ANUAL EM ÁREA BASAL (IPAg)

### 3.2.1 Validação das equações para espécies tropicais desenvolvidas por Cunha (2013)

A validação das quatro equações propostas por Cunha (2013), Tabela 2, baseou-se nos seguintes critérios estatísticos: valor de Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e a distribuição gráfica dos resíduos calculados entre os valores observados de incremento de *H. serratifolius* e *H. impetiginosus* e os estimados pelas equações de Cedro (*Cedrela odorata*); Cerejeira (*Amburana cearensis*); Copaíba (*Copaifera paupera*) e Mogno (*Swietenia macrophylla*).

Tabela 2 – Modelos de incremento periódico anual em área basal desenvolvidos por Cunha (2013) para espécies tropicais no leste do estado do Acre.

Covariáveis	Equações			
	<i>Cedrela odorata</i>	<i>Amburana cearensis</i>	<i>Copaifera paupera</i>	<i>Swietenia macrophylla</i>
Intercepto	-0,05564	0,01811	0,02822	0,01992
Diâmetro (d)	0,000499	-	-	-
Diâmetro de copa (dc)	-	-0,00153	-0,00048	-0,00031
Comprimento de copa (cc)	-0,00286	-	-	-
Abragência (dc/h)	-	0,03532	-	-
Proporção de copa (cc/h)	0,07213	-	-	-
Relação hd (h/d)	0,07702	0,01727	-	-
Competição de Hegyi (IC)	0,00852	0,00501	0,006822	0,005962
Liana2	0,004059	-	-	-
Liana3	0,01282	-	-	-

Fonte: Autora (2017).

Observou-se o valor de Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) expresso pela fórmula descrita a seguir, sendo o melhor modelo aquele que apresentou menor valor de Qui-quadrado.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{\hat{y}_i}, \quad (10)$$

onde:  $\chi^2$  = valor de Qui-quadrado;  $y_i$  = variável observada da  $i$ -ésima árvore;  $\hat{y}_i$  = variável estimada da  $i$ -ésima árvore.

A análise gráfica dos resíduos, por sua vez, permitiu verificar o ajuste das equações ao longo de toda a amplitude dos dados observados, sendo o melhor modelo aquele que apresentou menor variação de desvios.

### 3.2.2 Modelagem da equação de regressão para *H. serratifolius* e *H. impetiginosus*.

No processo de construção do modelo, a escolha das covariáveis foi ponderada entre considerações como: a forma do modelo, o poder explicativo, o número de variáveis independentes e a despesa de mensurá-las.

O incremento periódico anual em área basal (2011 – 2014) foi testado como variável dependente, tendo como variáveis independentes as variáveis dendrométricas, morfométricas e os índices de competição.

### 3.2.2.1. Análise de correlação de Pearson

Na análise de correlação de Pearson, o incremento periódico anual em área basal (IPAg) foi relacionado com todas as variáveis morfométricas e dendrométricas da árvore, com o objetivo de estudar a relação existente entre a variável dependente e as covariáveis, buscando inferir sobre as possíveis causas e efeitos na variação da taxa de incremento em área basal. Considera-se a correlação entre variáveis importante para modelagem da regressão, assim, esse grau de relação foi medido pelo coeficiente de correlação de Pearson, estimado a partir da expressão abaixo:

$$\text{Corr}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n xy}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n x^2)(\sum_{i=1}^n y^2)}}, \quad (11)$$

onde:  $\text{Corr}(x, y)$  corresponde a relação entre as variáveis  $x$  e  $y$ .

A análise foi realizada utilizando o procedimento PROC CORR no sistema estatístico SAS (*Statistical Analysis System*) (SAS Institute Inc., 2009).

Complementando a avaliação de correlação entre variáveis, foi realizada uma análise exploratória com gráficos de dispersão entre IPAg e as covariáveis para verificar o comportamento de linearidade entre elas.

### 3.2.2.2. Construção do modelo de incremento

Inicialmente, foi utilizado o método de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) proposto por Carl Friedrich Gauss em 1795, formando um modelo de regressão com as variáveis preditoras de maior correlação parcial com a variável dependente e poder explanatório ( $Pr < 0,05$ ) a partir do teste  $t$  de Student. O cálculo foi realizado com o procedimento PROC REG do sistema estatístico SAS (*Statistical Analysis System*) (SAS Institute Inc., 2009).

Como proposto por Cunha (2013), não se utilizou método de seleção das covariáveis, sendo estas selecionadas manualmente, com a inclusão das variáveis de tamanho e competição da árvore e, posteriormente, com a inclusão separadamente de covariáveis de forma e a exclusão de preditoras não significativas.

Em uma segunda análise, foi empregado o método dos Mínimos Quadrados Generalizados (MQG), proposto por Nelder e Wedderburn (1972), a partir do procedimento

PROC GENMOD com distribuição Gama (DIST GAMMA) e função de ligação logarítmica (LINK LOG), utilizando as mesmas variáveis do modelo linear estimado por MQO.

Os cálculos foram realizados no sistema estatístico SAS (*Statistical Analysis System*) (SAS Institute Inc., 2009). A seleção dos modelos considerou os critérios AIC (Critério de Informação de Akaike), BIC (Critério Bayesiano de Schwarz) e poder explanatório significativo ( $Pr < 0,05$ ) para os coeficientes a partir do teste qui-quadrado ( $\chi^2$ ).

Para a comparação gráfica dos resíduos dos métodos MQO e MQG, foi realizada a conversão das estimativas logarítmicas dos IPAg. Apesar de, em alguns casos, a significância do erro não ser constatada quando da comparação de estimativas (Leite e Regazzi, 1992), optou-se pela aplicação do fator de correção para discrepância logarítmica conhecida por fator de correção de Meyer (SCHNEIDER et al., 2009).

A colinearidade entre as covariáveis foi expressa pelo “*Variance Inflation Factor – VIF*” (Fator de Inflação da Variância), sendo considerado que os valores superiores a 10 induziriam à inclusão de variáveis desnecessárias no modelo (DRAPER e SMITH, 1966). Para essa análise no método MQO, foi utilizado o procedimento REG com a opção VIF no sistema estatístico SAS (*Statistical Analysis System*) (SAS Institute Inc., 2009). Já, para o método de MQG, o VIF foi calculado no pacote MS Office Excel, a partir das expressões na Tabela 3:

Tabela 3 – Expressões para o cálculo do Fator de Inflação da Variância para Mínimos Quadrados Generalizados.

Forma de variação	Símbolo	Fórmula
Soma de quadrado da regressão	SQr	$(y - \hat{y})^2$
Soma de quadrado total	SQt	$(y - \bar{y})^2$
Coeficiente de determinação	R <sup>2</sup>	$1 - \frac{SQr}{SQt}$
Fator de inflação da variância	VIF	$\frac{1}{1 - R^2}$

Fonte: Autora (2017).

No diagnóstico de colinearidade, foi analisado o Número de Condição (NC), razão entre o maior e o menor autovalor, definindo-se  $NC = \lambda_{\text{máx}}/\lambda_{\text{mín}}$ ; o Índice de Condição

(*Condition Index*), correspondendo às raízes quadradas da relação entre o maior autovalor e cada autovalor individual; e Proporção de Variância (*Proportion of Variation*), em que, para cada variável, o procedimento REG gera a proporção da variância estimada por cada componente principal.

Conforme Montgomery e Peck (2006),  $NC < 100$ , a multicolinearidade não constitui problema sério; se  $100 \leq NC \leq 1000$ , a multicolinearidade é de moderada a forte; e  $NC > 1000$  constitui indício de multicolinearidade severa. Para o Índice de Condição, valores em torno de 10, começa a ser observada a presença de colinearidade e, em torno de 30, tornam-se um sinal claro da evidência de colinearidade. Para proporção de variância, valores maiores que 0,5 indicam que as estimativas de regressão tendem a ser afetadas (BELSLEY et al., 1980). Esses três critérios foram calculados com o procedimento REG com opção TOL VIF COLLIN.

### 3.2.2.3. Método de regressão de cumeeira (*Ridge Regression*)

Quando da existência de multicolinearidade foi utilizada a solução matemática proposta por Hoerl e Kennard (1970), denominada de regressão de cumeeira (*Ridge Regression*), como alternativa ao MQO e MQG. O método consiste em adicionar um pequeno valor constante, K, aos elementos diagonais da matriz de correlação e, em seguida, resolver, de maneira usual, os coeficientes de regressão.

Consideramos a regressão linear padrão como:

$$Y = X\beta + \alpha + \epsilon \quad (12)$$

Por conveniência, também assumimos que  $X'X$  está na forma de correlação. Sendo assim, os mínimos quadrados ordinários, MQO, estimador de  $\beta$  é, então, dado por:

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y \quad (13)$$

E o estimador  $\beta^*$  da regressão de cumeeira, para um  $k > 0$  fixo, é então:

$$\beta^* = (X'X + kI_p)^{-1}X'y \quad (14)$$

Para definição da constante K “ótima”, usou-se, como critério, o traço de cumeeira (*Ridge Trace*), que consiste em retas que tendem para a origem quando k cresce. O valor

ótimo é identificado com o início da estabilização da reta, ou seja, os coeficientes dos parâmetros não apresentam mudança significativa em seus valores.

#### 3.3.2.4. Análise estatística

Inicialmente, a análise considerou os três aspectos estatísticos de maior importância quando se faz a modelagem de equações de regressão: a) homogeneidade de variância; b) Normalidade; e c) Independência de resíduos, como proposto por Schneider et al. (2009). Para o teste de condicionantes, foi utilizado o procedimento PROC REG com a opção, WHITE, DW e DWPROB, e o procedimento PROC UNIVARIATE, com opção NORMAL. (SAS Institute Inc., 2009).

Como medidas de ajuste, os critérios de diagnóstico baseados nos dados observados e estimados foram calculados, avaliando-se o erro padrão da estimativa (RMSE) e o coeficiente de determinação, conforme as expressões na Tabela 3.

Tabela 4 – Estatísticas de ajuste e precisão de modelos de regressão.

<b>Critério</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Fórmula</b>
Erro padrão da estimativa	RMSE	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2}{n - k}}$
Coeficiente de determinação	R <sup>2</sup>	$1 - \frac{SQr}{SQt}$

Fonte: Autora (2017).

Toda a análise foi realizada com o apoio de gráficos de resíduos para avaliar a eficiência da equação ajustada e diagnosticar a presença de observações influentes denominadas “outliers”.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 VALIDAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE INCREMENTO EM ÁREA BASAL ELABORADAS POR CUNHA (2013) PARA CEDRO (*Cedrela odorata*), CEREJEIRA (*Amburana cearensis*), COPAÍBA (*Copaifera paupera*) E MOGNO (*Swietenia macrophylla*) NA ESTIMATIVA DO IPAg DE *H. serratifolius* E *H. impetiginosus*.

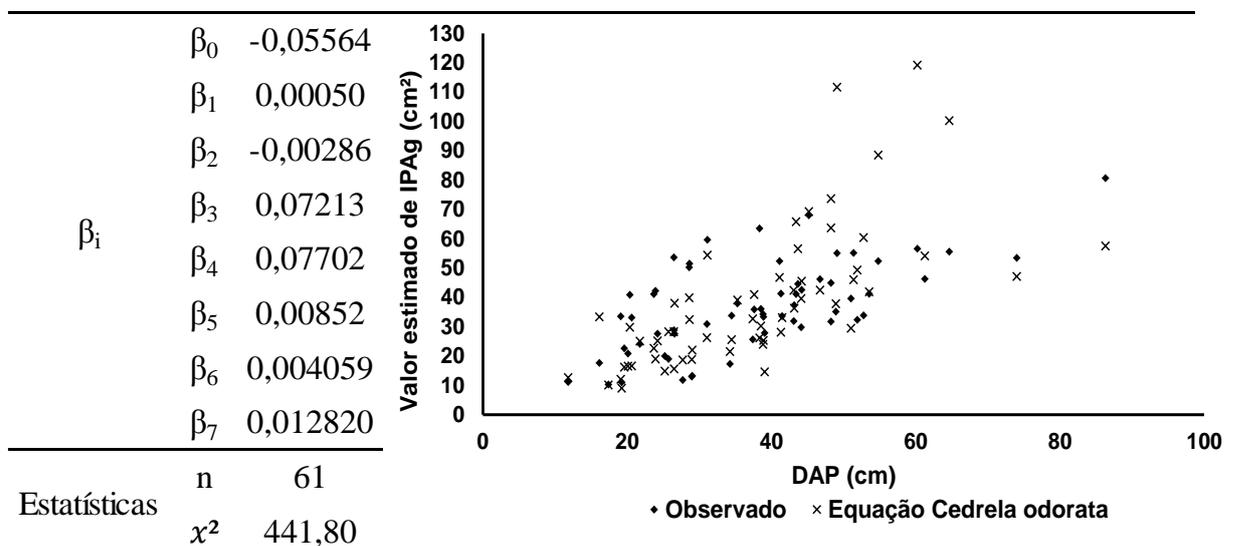
O incremento periódico anual em área basal calculado pelas equações de Cunha para Cedro, Cerejeira, Copaíba e Mogno, utilizando como, preditores potenciais, o tamanho e a morfometria da árvore, o *status* competitivo, a posição social e a carga de lianas na copa, quando comparados com os valores medidos em *H. serratifolius* e *H. impetiginosus*, mostrou diferenças que inviabilizam o emprego dessas equações para descrever o incremento das duas espécies de ipê. Essas diferenças foram evidenciadas no Teste de Aderência de Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e nos gráficos dos valores observados e estimados pela respectivas regressões.

As estimativas IPAg calculadas com a função do Cedro (*Cedrela odorata*), Expressão 15, apresentou diferença significativa pelo Teste Qui-quadrado ( $\chi^2_{\text{calculado}}=441,80$ ;  $\chi^2_{\text{tabelado}}=79,08$ ;  $p<0,000$ ) a uma probabilidade de 95% de significância, (Tabela 5).

$$g[E(IPAg_i)] = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \beta_2 \cdot cc + \beta_3 \cdot \frac{cc}{h} + \beta_4 \cdot hd + \beta_5 \cdot IC + \beta_6 \cdot Liana2 + \beta_7 \cdot Liana3 \quad (15)$$

onde: IPAg=incremento periódico anual em área basal estimado; g=função de ligação recíproca;  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_7$ =coeficientes de regressão.

Tabela 5 – Parâmetros do modelo desenvolvido por Cunha (2013) para *Cedrela odorata* e estatística de validação pelo Teste Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) para *H. serratifolius* e *H. impetiginosus*.



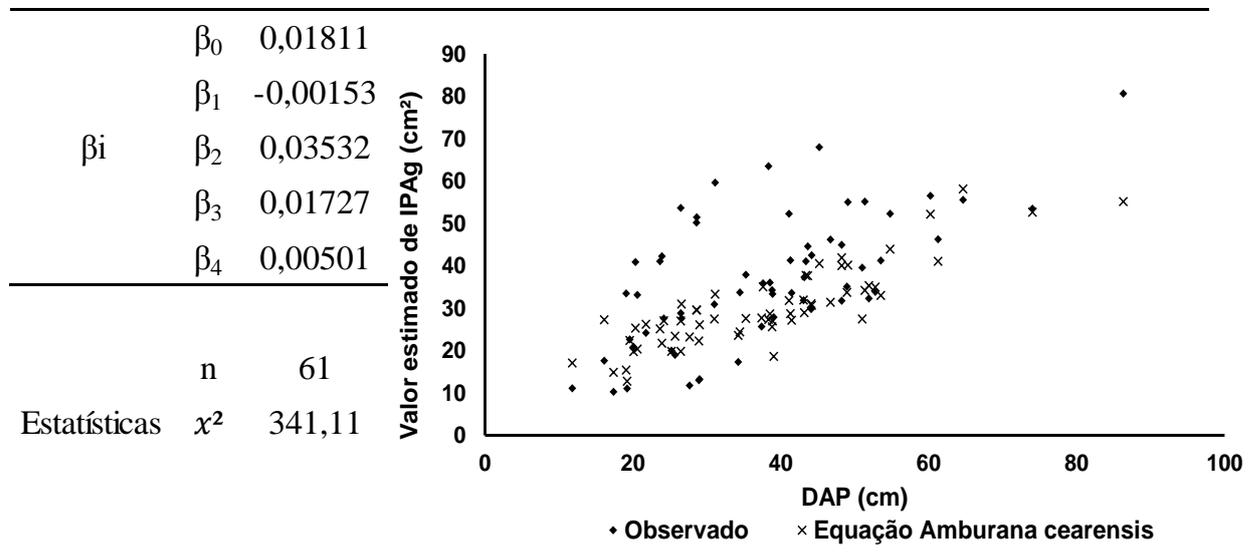
Fonte: Autora (2017).

As estimativas calculadas com o modelo de cerejeira (*Amburana cearenses*), Expressão 16, também apresentaram o Teste Qui-quadrado com diferença significativa ( $\chi^2_{\text{calculado}}=341,11$ ;  $\chi^2_{\text{tabelado}}=79,08$ ;  $p<0,000$ ) a uma probabilidade de 95% de significância, (Tabela 6).

$$g[E(IPAg_i)] = \beta_0 + \beta_1 \cdot dc + \beta_2 \cdot dc/h + \beta_3 \cdot hd + \beta_4 \cdot IC \quad (16)$$

onde: IPAg=incremento periódico anual em área basal estimado; g=função de ligação recíproca;  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_4$ =coeficientes de regressão.

Tabela 6 – Parâmetros do modelo desenvolvido por Cunha (2013) para *Amburana cearensis* e estatística de validação pelo Teste Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) para *H. serratifolius* e *H. impetiginosus*.



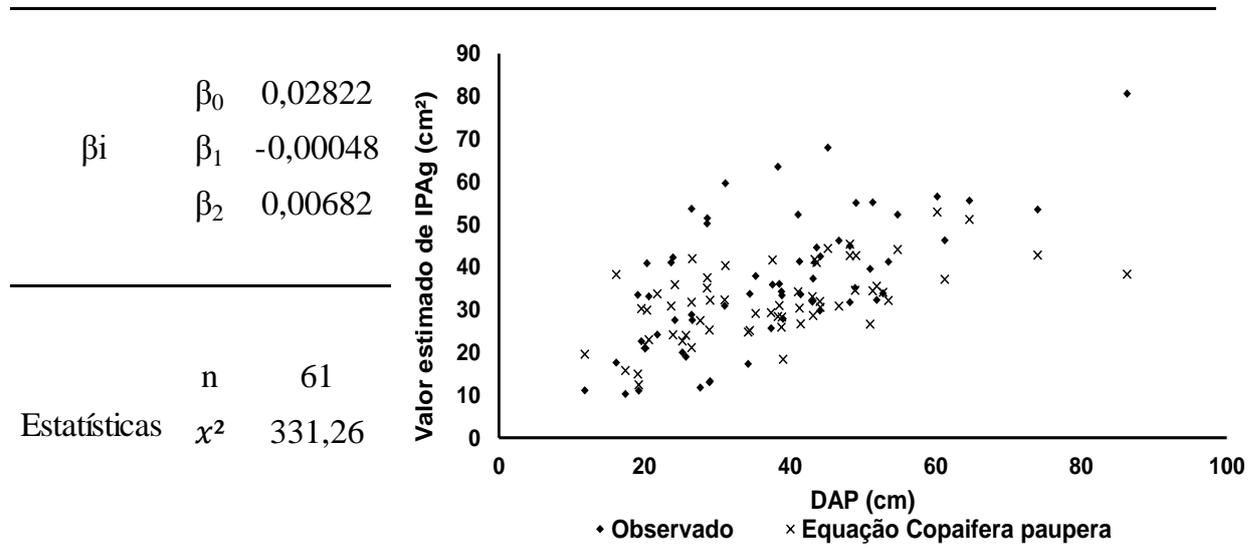
Fonte: Autora (2017).

Para o modelo copaíba (*Copaifera paupera*), Expressão 17, a estatística pelo Teste Qui-quadrado também mostrou diferença significativa entre os valores observados e estimados ( $\chi^2_{\text{calculado}} = 331,26$ ;  $\chi^2_{\text{tabelado}}=79,08$ ;  $p<0,000$ ) a uma probabilidade de 95% de significância, (Tabela 7).

$$g[E(IPAg_i)] = \beta_0 + \beta_1 \cdot dc + \beta_2 \cdot IC \quad (17)$$

onde: IPAg=incremento periódico anual em área basal estimado; g=função de ligação recíproca;  $\beta_0, \beta_1$  e  $\beta_2$ =coeficientes de regressão.

Tabela 7 – Parâmetros do modelo desenvolvido por Cunha (2013) para *Copaifera paupera* e estatística de validação pelo Teste Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) para *H. serratifolius* e *H. impetiginosus*.



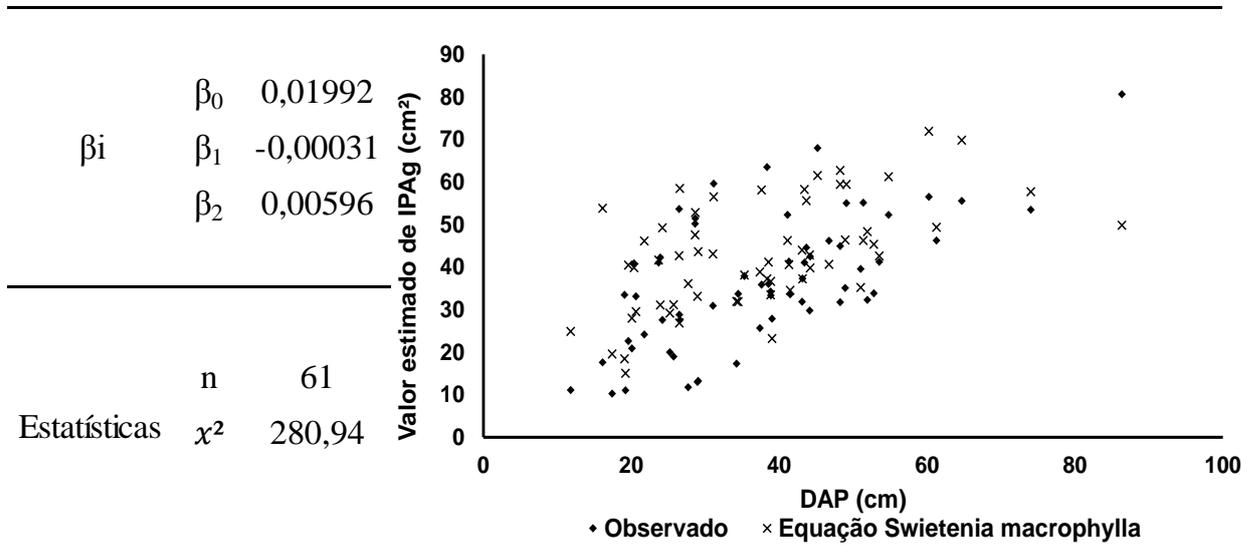
Fonte: Autora (2017).

O modelo de regressão para mogno (*Swietenia macrophylla*), Expressão 18, como para as demais equações calculadas por Cunha (2013), apresentou estimativas com diferença significativa pela estatística de Qui-quadrado ( $\chi^2_{\text{calculado}}=280,94$ ;  $\chi^2_{\text{tabelado}}=79,08$ ;  $p<0,000$ ) a uma probabilidade de 95% de significância, (Tabela 8).

$$g[E(IPAg_i)] = \beta_0 + \beta_1 \cdot dc + \beta_2 \cdot IC \quad (18)$$

Em que: IPAg=incremento periódico anual em área basal estimado; g=função de ligação recíproca;  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$ =coeficientes de regressão.

Tabela 8 – Parâmetros do modelo desenvolvido por Cunha (2013) para *Swietenia macrophylla* e estatística de validação pelo teste qui-quadrado ( $\chi^2$ ) para *H. serratifolius* e *H. impetiginosus*.



Fonte: Autora (2017).

A análise gráfica mostrou subestimativas do incremento periódico em área basal de árvores com dap entre 25 a 50 cm quando utilizadas as equações de *Cedrela odorata*, *Amburana cearenses* e *Copaifera paupera*.

A equação ajustada para *Swietenia macrophylla* foi a que apresentou menor valor da estatística Qui-quadrado, no entanto, ao contrário das demais equações, apresentou uma superestimativa do IPAg em árvores com dap <40 cm, o que pode ser resultado do menor número de observações encontradas nessas classes durante o processo de amostragem.

As estimativas de IPAg calculadas com as equações de Cunha (2013) diferiram estatisticamente à probabilidade de 95% de significância pelo Teste Qui-quadrado, indicando que as equações não devem ser utilizadas para estimar os incrementos de *H. serratifolius* e *H. impetiginosus*.

## 4.2 MODELAGEM DO INCREMENTO PERIÓDICO ANUAL EM ÁREA BASAL (IPAg)

### 4.2.1 Correlação e seleção das variáveis

A análise de correlação entre as variáveis potenciais para descrever o IPAg permitiu identificar o diâmetro (dap), altura (h), relação altura/diâmetro (h/d), diâmetro de copa (dc), área de projeção horizontal de copa (APHC), índice de abrangência (IA) e o índice de competição de Hegyi (IC), Tabela 9, apresentando correlações moderada a alta, conforme classificação qualitativa proposta por Callegari-Jacques, (2003).

Tabela 9 – Correlação das variáveis potenciais mensuradas e calculadas com IPAg.

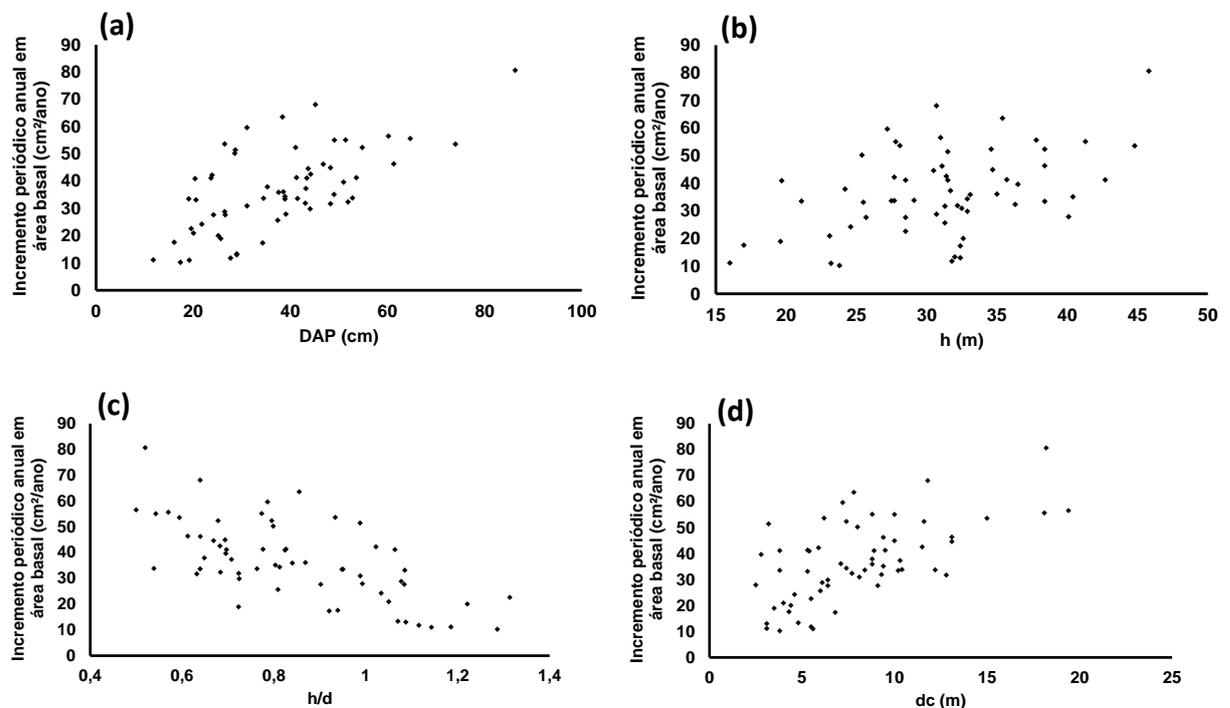
Corr.(y,x)	dap	h	h/d	dc	APHC	IA	IC
Pearson (r)	0,64685	0,45747	-0,65572	0,61523	0,58967	0,47685	-0,49492
Pr>[r]	<,0001	0,0002	<,0001	<,0001	<,0001	0,0001	<,0001

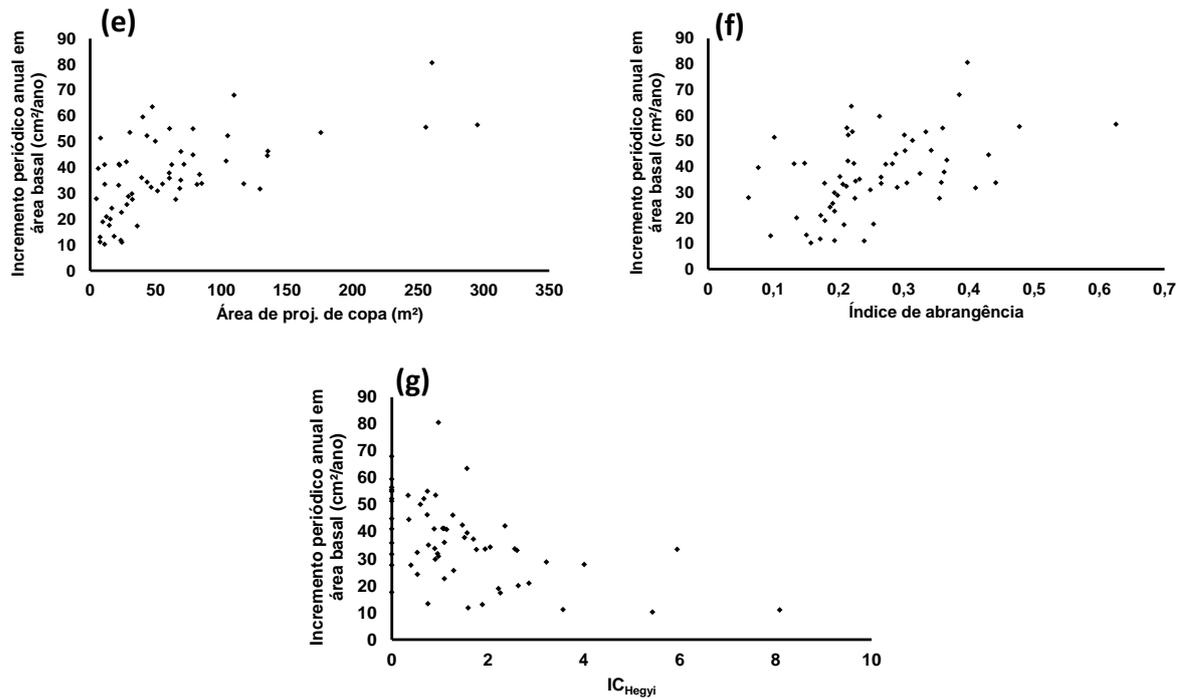
onde: dap: Diâmetro inicial da árvore em 2011 obtido pela reconstrução do crescimento por meio de análise parcial de tronco.

Fonte: Autora (2017).

A análise gráfica da dispersão dessas variáveis (Figura 7a) mostrou que o incremento periódico em área basal (IPAg) tem forte correlação linear positiva com o dap ( $0,60 \leq r < 0,90$ ). Essa variável corresponde a um dos atributos da árvore mais comumente usados na modelagem de florestas, pois é sensível às atividades de manejo, estando relacionado ao crescimento da altura e à mortalidade das árvores, pode ainda ser empregada como um substituto para a idade (Pokharel, 2008).

Figura 7 – Gráficos de dispersão entre incremento periódico em área basal em função das variáveis independentes: dap - diâmetro a altura do peito em cm (a); h - altura em m (b); h/d – relação altura/diâmetro (c); dc – diâmetro de copa em m (d); APHC – Área de projeção de copa em m<sup>2</sup> (e); IA – índice de abrangência (f); ICHegeyi – índice de competição dependente da distância de Hegyi (g).





Fonte: Autora (2017).

A forte correlação linear positiva com diâmetro de copa ( $d_c$ ) indica que a taxa de incremento foi maior à medida que aumentou o diâmetro de copa. Este é susceptível de aumento a medida que a árvore assume posições sociológicas melhores, com copa mais alta e diminui com o aumento da competição com árvores vizinhas, Figura 7d. Portanto, a correlação positiva com o IPAg é explicada devido a árvores com grandes diâmetros de copa terem mais folhagem e área de superfície para fotossíntese (SCHOMAKER et al., 2007).

A análise da correlação também revelou forte correlação linear negativa entre IPAg e a relação  $h/d$ , Figura 7c, e moderada correlação linear ( $0,30 \leq r < 0,60$ ) com o  $IC_{Hegyi}$ , e altura da árvore. A relação  $h/d$  negativa indica que árvores mais grossas e baixas agregaram mais área basal do que árvores finas e altas (CUNHA, 2013; ROMAN et al., 2009; TONINI & ARCO-VERDE, 2005; DURLO et al., 2004).

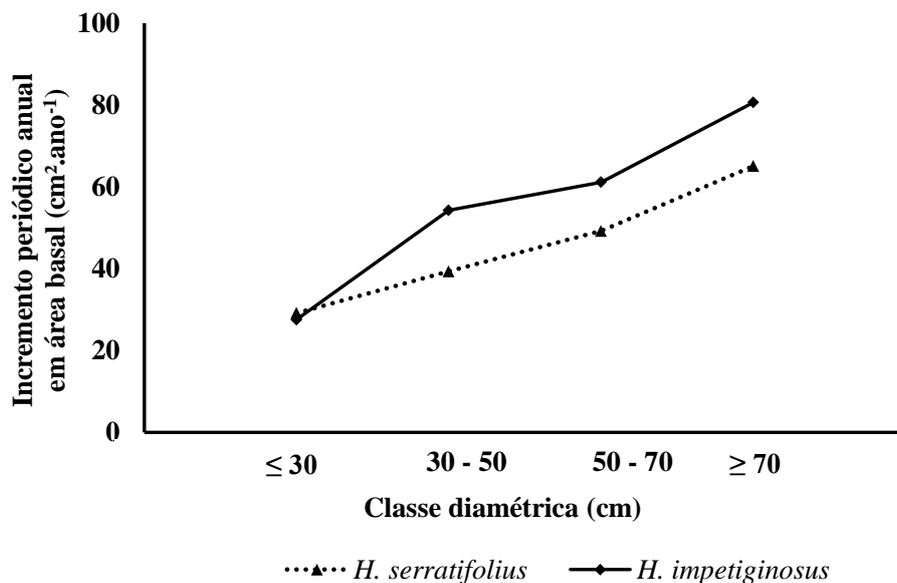
O decréscimo exponencial da competição, medido pelo índice de Hegyi, Figura 7g, elucidou o comportamento do *status* competitivo, em que as árvores objetivo com níveis de competição elevado tiveram menor incremento em área basal quanto menor o seu porte, ( $dap \leq 50\text{cm}$ ; IPAg médio  $33,92 \text{ cm}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$ ;  $IC_{\text{máximo}} = 8,089$ ), enquanto árvores grandes, sob menor competição, tiveram maior incremento anual em área basal ( $dap \geq 50\text{cm}$ ; IPAg médio  $45,82 \text{ cm}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$ ;  $IC_{\text{máximo}} = 0,9726$ ), Figura 8.

Na amostragem, as árvores-amostra de *H. serratifolius* e *H. impetiginosus* apresentaram o incremento médio na classe de  $dap \leq 30$  ( $n=17$ ;  $n=6$ ) de  $29,2 \text{ cm}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$  e  $27,5$

$\text{cm}^2.\text{ano}^{-1}$ , com desvios de 14,2 e 16,2, respectivamente para as espécies. Para as classes de 30 a 50 ( $n=15$ ;  $n=15$ ), foram obtidos os incrementos médios de  $39,4 \text{ cm}^2.\text{ano}^{-1}$  e  $54,3 \text{ cm}^2.\text{ano}^{-1}$  com desvios de 12,2 e 21,8, respectivamente; e para a classe de 50 a 70 ( $n=2$ ;  $n=8$ ) os incrementos médios de  $49,2 \text{ cm}^2.\text{ano}^{-1}$  e  $61,1 \text{ cm}^2.\text{ano}^{-1}$ , com desvios 10,3 e 21,7  $\text{cm}^2.\text{ano}^{-1}$ , respectivamente. Para a classe  $\geq 70$  ( $n=1$ ;  $n=1$ ), o incremento médio foi de 65,1 e 80,6  $\text{cm}^2.\text{ano}^{-1}$  medido em apenas uma árvore encontrada na área de amostragem.

O mesmo padrão de crescimento foi observado para as duas espécies, *H. serratifolius* e *H. impetiginosus*, embora graficamente (Figura 8) apresente diferença entre as curvas. Entretanto ao se calcular o incremento para árvores das duas espécies com mesmo diâmetro observou-se que, por exemplo, para o diâmetro de 70 cm o *H. impetiginosus* incrementou 0,50 mm em diâmetro enquanto o *H. serratifolius* aumentou 0,36 mm, comprovando ser possível a utilização de um modelo único para estimar o incremento para ambas as espécies.

Figura 8 - Incremento periódico em área basal de *H. serratifolius* ( $n=35$ ) e *H. impetiginosus* ( $n=30$ ), com base no incremento médio em cada classe de tamanho.



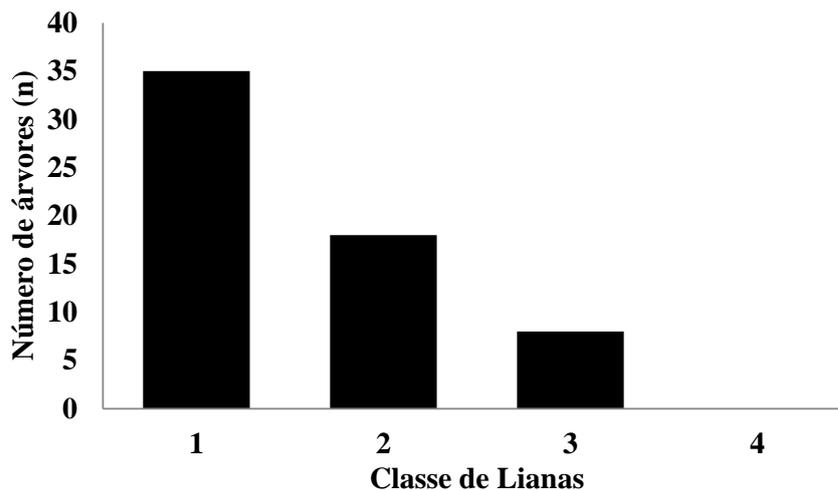
Fonte: Autora (2017).

As variáveis explanatórias restantes, como a área de projeção de copa, Figura 7e, e o índice de abrangência, Figura 7f, apresentaram moderada correlação linear positiva, seguidas das variáveis descritoras da copa como: comprimento de copa (cc), índice de saliência (IS) e formal de copa (FC), com fraca correlação linear ( $0,00 < r < 0,30$ ). As variáveis qualitativas, como forma da copa, posição da copa e carga de lianas, também foram fracamente correlacionadas, indicando não serem variáveis importantes para prognosticar o crescimento em área basal (Apêndice A).

A ausência de correlação significativa entre carga de lianas e IPAg contradiz observações de Cunha (2013), em que resultados da ANOVA para o efeito da carga de lianas na copa sobre o incremento (IPAg) mostraram que árvores de *Cedrela odorata* com menores taxas de crescimento tiveram maior ocupação de lianas na copa.

No entanto, a distribuição das lianas nas árvores de ipê (Figura 9) demonstra que, neste estudo, 18 árvores-amostra apresentaram infestação de lianas apenas no fuste, não exercendo influência sobre a copa. E as árvores-amostra, nas quais houve ocorrência de lianas nas copas (Classe de lianas 3, n=8), não foi suficiente para permitir inferência sobre o efeito no crescimento em área basal de árvores de ipê.

Figura 9 – Distribuição das lianas na copa de *H. serratifolius* (ipê amarelo) e *H. impetiginosus* (ipê roxo): (Classe de Liana 1) árvores livres de lianas, n=35; (Classe de Liana 2) presença de lianas no fuste, n=18; (Classe de Liana 3) presença no fuste e copa, n=8; (Classe de Liana 4) presença no fuste e copa severa, n=0.



Fonte: Autora (2017).

Kainer et al. (2006) demonstram que a fraca correlação entre infestação por lianas em árvores de castanheira (*Bertholletia excelsa*) e o crescimento diamétrico atribui-se a diferentes camadas de lianas distribuídas dentro da copa da árvore sem necessariamente encobrir as folhas da árvore.

#### 4.2.2 Modelo de incremento periódico anual em área basal

O modelo ajustado pelo Método de Mínimos Quadrados teve as variáveis dendrométricas como as de melhor capacidade para explicar o crescimento periódico em área basal o dap, aqui, considerado como o medido no início do intervalo de três anos de

crescimento, a variável independente de maior correlação, seguida da altura (h). As demais variáveis selecionadas foram a relação h/d e o índice dependente da distância de Hegyi, como variável quantificadora da competição entre árvores.

A transformação da variável dependente em logaritmo natural (lnIPAg) e mais a adição de um termo logarítmico como variável independente (ln*d*) no modelo de regressão melhorou o ajuste e atendeu ao critério de significância das variáveis.

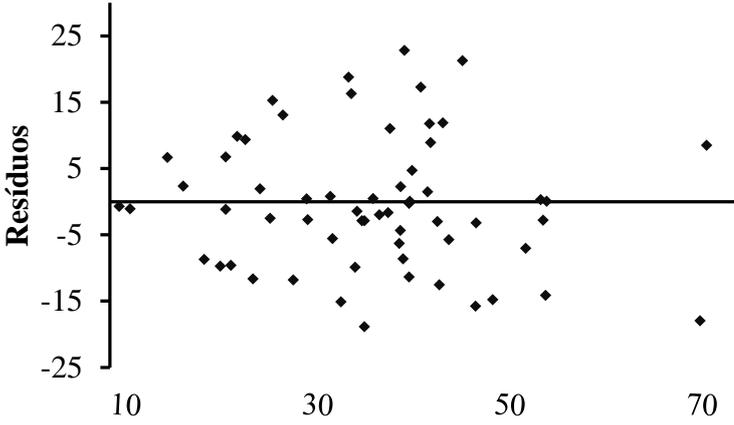
Assim, o modelo selecionado foi expresso por:

$$\ln(IPAg) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln d + \beta_2 \cdot h + \beta_3 \cdot hd + \beta_4 \cdot IC \quad (19)$$

onde: ln (IPAg): Incremento periódico anual em área basal com transformação logarítmica; ln*d*: Diâmetro inicial em cm com transformação logarítmica; h: Altura em m; hd: Relação h/d também denominada de grau de esbeltez; IC: Índice de competição de Hegyi.

Os coeficientes do modelo de regressão foram significantes a 5% de probabilidade, com o modelo descrevendo 62% da variação total ( $R^2=0,62$ ). O erro percentual foi de 8,7% com distribuição de resíduos sem tendência de sub- ou super estimativas; porém com forte evidência de heterogeneidade de variância, embora a variável dependente tenha sido logaritmizada, demonstrada pela forma de cone da distribuição dos resíduos (gráfico adjunto a Tabela 10).

Tabela 10 – Estatísticas e parâmetros do modelo de incremento periódico em área basal para *H. serratifolius* e *H. impetiginosus*.

Parâmetros	$\beta_0$	11,32285	
	$\beta_1$	-2,08810	
	$\beta_2$	0,09263	
	$\beta_3$	-3,76901	
	$\beta_4$	-0,06708	
Estatísticas	n	61	
	$R^2$	0,62	
	RMSE	0,30619	
	CV%	8,7	

Fonte: Autora (2017).

A análise das condicionantes de regressão confirmou a heterogeneidade de variância, com valor de probabilidade ligeiramente maior que 0,05 ( $p>0,05$ ) pelo teste de White ( $p=0,0694$ ), a normalidade dos dados pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ( $p=0,1345$ ) e independência dos resíduos pelo teste de Durbin e Watson ( $p=0,8227$ ).

No entanto, o emprego de modelo multilinear com repetição de variáveis resultou em intercorrelação de variáveis independentes, Tabela 11, a qual ficou demonstrada com o diagnóstico de colinearidade pelo número de condição (NC=36979,1). A proporção de variância (>0,5) mostra as variáveis que estão envolvidas e, em conjunto com o Índice de Condição (>30), fornece uma medida do grau em que a correspondente estimativa de regressão foi degradada pela presença de colinearidade.

Tabela 11 – Diagnóstico de colinearidade para as variáveis independentes.

Diagnóstico de colinearidade							
Número	Autovalores	Índice de condição	Proporção da variância				
			Intercepto	ln d	h	hd	IC
1	4,43157	1,00000	0,00001355	0,00001246	0,00010486	0,00012875	0,01152
2	0,50299	2,96825	0,00001588	0,0003477	0,00035477	0,000000679880	0,63092
3	0,05240	9,19652	0,00003126	0,0004764	0,00736	0,03363	0,35306
4	0,01293	18,51510	0,00639	0,00296	0,0808	0,01362	0,00004636
5	0,00011984	192,30222	0,99355	0,99651	0,9114	0,95262	0,00445

Fonte: Autora (2017).

A existência de heterocedasticidade e autocorrelação de variáveis independentes é considerada problema na modelagem, pois viola as pressuposições básicas da teoria dos modelos lineares e não lineares (HESS et al., 2015).

O Fator de Inflação da Variância (VIF - *Variance Inflation Factor*) de cada variável independente, Tabela 12, apresentou valores entre 49,8 e 1,39. Embora não existam critérios formais para decidir se um VIF é grande o suficiente para afetar os valores estimados (SAS Institute Inc., 2009), alguns autores consideram que  $VIF > 10$  indicam sérios problemas de multicolinearidade (DRAPER e SMITH, 1966; MONSERUD e STERBA, 1996; FREUND e WILSON, 1998).

Tabela 12 – Estatísticas para o modelo de regressão por MQO, e o Fator de Inflação da Variância.

Coeficiente	Mínimos quadrados				
	Estimado	Erro padrão	Valor t	Valor p	Inflação da variância
$\beta_0$	11,32285	2,3801	4,76	0,0000	0
$\beta_1$	-2,08810	0,6862	-3,04	0,0035	49,81849
$\beta_2$	0,09263	0,0265	3,50	0,0009	18,11994
$\beta_3$	-3,76901	0,8822	-4,27	0,0001	20,43690
$\beta_4$	-0,06708	0,0304	-2,21	0,0309	1,39496

Fonte: Autora (2017).

Diagnosticada a colinearidade, a alternativa de re-estimar o modelo com emprego dos Mínimos Quadrados Generalizados (MQG) gerou uma equação precisa, com estimativa de erro médio semelhante ao encontrado com o procedimento MQO ( $\approx 0,31$ ) e valores baixos para AIC (461) e BIC (474), Tabela 13. A equação resultante utilizou a Distribuição Gama com função de ligação logarítmica.

Os MQG são uma extensão do modelo linear clássico, com vantagem que a distribuição não necessita ser normal, podendo assumir distribuição da família exponencial (TURKMAN e SILVA, 2000). Além disso, tem-se a variável em sua natureza estocástica original, evitando trabalhar com proporções ou porcentagens para a utilização da metodologia estatística usual (DÍAZ e COUTO, 1999).

Tabela 13 – Estatísticas e parâmetros para o modelo de incremento periódico em área basal calculado por MQG para *H. serratifolius* e *H. impetiginosus*.

Parâmetros	$\beta_0$	12,0593	
	$\beta_1$	-2,2827	
	$\beta_2$	0,0971	
	$\beta_3$	-3,9229	
	$\beta_4$	-0,0767	
Estatísticas	n	61	
	AIC	461,3702	
	BIC	474,0354	
	RMSE	0,31067	

Fonte: Autora (2017).

A distribuição dos resíduos do modelo ajustado por MQG, adjunta a Tabela 13, confirmou o potencial da equação calculada para estimar o IPAg com pequena redução da amplitude e distribuição dos resíduos, quando comparada com a obtida pelo MQO. Embora com a melhoria geral do modelo ajustado, os valores de VIF apresentaram mudanças nos valores (Tabela 14), porém a colinearidade não foi reduzida a níveis desejados.

Tabela 14 – Estatísticas para o modelo de regressão por MQG, e o fator de inflação da variância de cada covariável.

Parâmetros	Estimados	Erro padrão	Limites de confiança à 95%		$\chi^2$	Valor p	VIF
$\beta_0$	12,0593	2,2850	7,5809	16,5377	27,85	<,0001	0
$\beta_1$	-2,2827	0,6525	-3,5616	-10,0370	12,24	0,0005	33,2226
$\beta_2$	0,0971	0,0248	0,0486	0,1457	15,38	<,0001	32,1543
$\beta_3$	-3,9229	0,8395	-5,5682	-22,7760	21,84	<,0001	24,9377
$\beta_4$	-0,0767	0,0279	-0,1313	-0,0221	7,58	0,0059	1,3626

Fonte: Autora (2017).

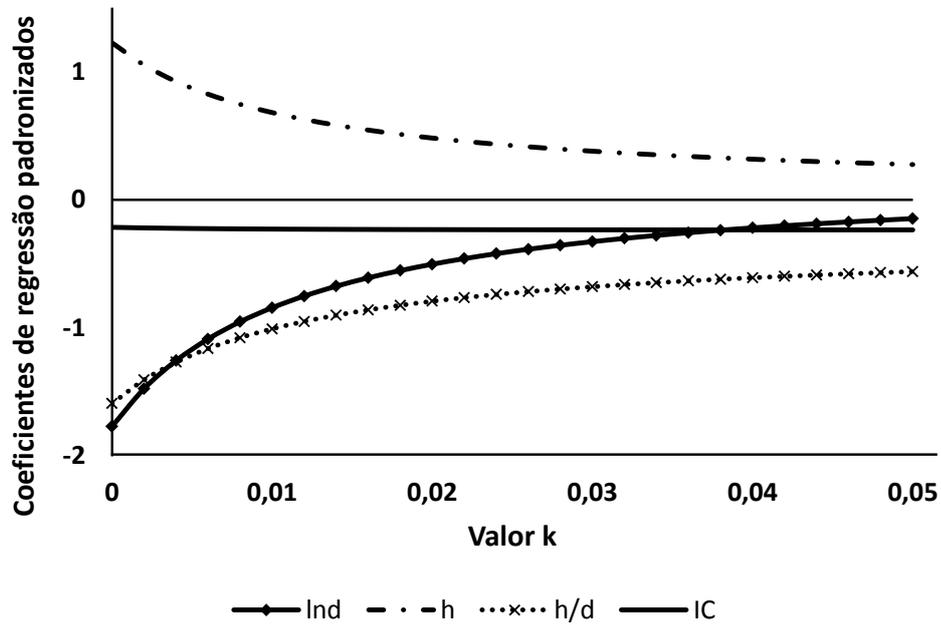
#### 4.2.3 Multicolinearidade em Mínimos Quadrados Ordinários e a Regressão de Cumeeira (*Ridge Regression – RR*)

A reestimativa dos parâmetros do modelo de regressão calculado por MQO pelo procedimento de regressão de Cumeeira visando contornar a existência da colinearidade reduziu o VIF abaixo de seis, com emprego do ponderador  $K=0,024$ .

O uso do traço de cume (*Ridge Trace*) auxiliou no encontro de um valor de  $K$ , localizado no ponto em que a plotagem dos coeficientes de regressão ( $b^*$ ) e os valores alternativos de  $K$  indicam que os  $b^*$  tendem a estabilizar-se, seguida da diminuição do VIF para cada valor de  $b^*$ , Figura 10 e 11.

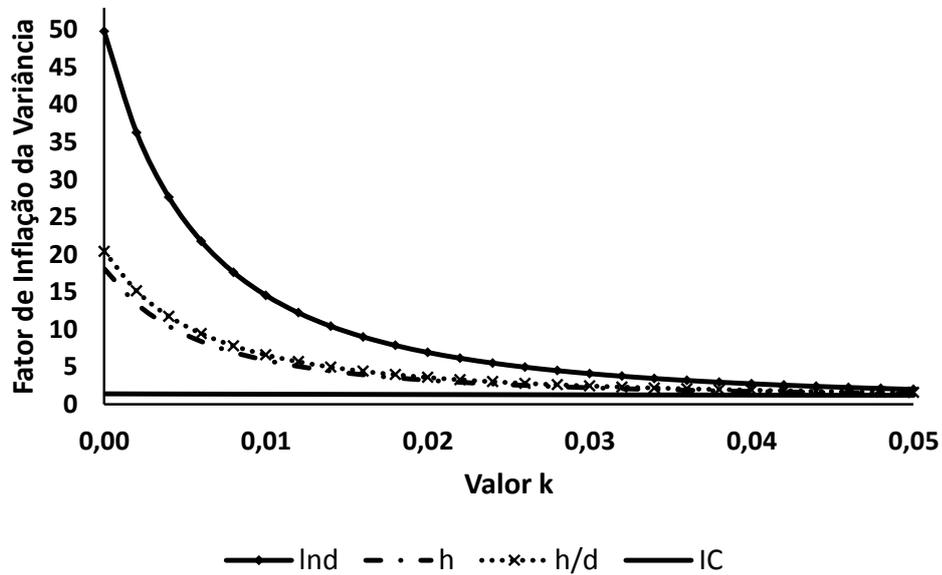
A seleção do valor de  $K$  pode ainda ser realizada, segundo sugerido por Hoerl e Kennard (1970), pelo valor de  $K$  que: (a) estabiliza o *ridge trace*; (b) possibilita os coeficientes não apresentarem valores absolutos não condizentes esperados *a priori*; (c) possibilita os coeficientes com sinais teoricamente impróprios, quando  $K=0$ , terem sinais apropriados e; (d) a soma dos quadrados dos resíduos não será significativamente alta.

Figura 10 - Traço de cume (*Ridge trace*), demonstrando os coeficientes de regressão padronizados em função de valores de K.



Fonte: Autora (2017).

Figura 11 - Fator de inflação da variância para as variáveis explanatórias.



Fonte: Autora (2017).

Embora os coeficientes de regressão sejam relativamente estáveis quando associados a valores crescentes de K, o traço sugere que, em  $K=0,024$  os coeficientes estabilizaram-se e o

erro padrão da estimativa (RMSE) não aumentou substancialmente (aumento de 4,74%), conforme a Tabela 15. Pequeno aumento na magnitude do erro é esperado com a variação do valor de K. Bare e Hann (1981) encontraram um acréscimo de apenas 3%, compatível com o valor encontrado neste estudo.

Além da estabilização dos coeficientes, vale ressaltar a hipótese de quanto maior o valor de K, maior seria o viés, o que levou Marquardt (1970) a propor limitar o aumento do valor K, tal que o VIF máximo esteja entre dez e um, mais próximo de um, se possível.

Neste estudo, o VIF máximo decresceu quando K aumenta, tendo sido selecionado o valor K de 0,024, corroborando com o recomendado por Monserud e Sterba (1996).

Tabela 15 – Coeficientes de regressão, valores da constante K e VIF no modelo de incremento estimado pelo método *Ridge Regression* (RR).

$\beta_i$	RIDGE (K=n)											
	0	0,010	0,020	0,022	0,024	0,026	0,028	0,030	0,032	0,034	0,036	0,038
$\beta_0$	11,3229	7,5549	6,1676	5,9888	<b>5,8300</b>	5,6880	5,5602	5,4446	5,3395	5,2435	5,1555	5,0745
$\beta_1$	-2,0881	-0,9945	-0,5935	-0,5420	<b>-0,4963</b>	-0,4554	-0,4188	-0,3856	-0,3556	-0,3281	-0,3030	-0,2800
VIF	49,8	12,2	6,9	6,2	<b>5,5</b>	5,0	4,5	4,1	3,7	3,4	3,2	2,9
$\beta_2$	0,0926	0,0515	0,0365	0,0345	<b>0,0328</b>	0,0313	0,0299	0,0287	0,0276	0,0266	0,0256	0,0248
VIF	18,1	5,1	3,2	2,9	<b>2,7</b>	2,5	2,3	2,2	2,1	2,0	1,9	1,8
$\beta_3$	-3,7690	-2,3879	-1,8769	-1,8108	<b>-1,7520</b>	-1,6993	-1,6518	-1,6088	-1,5696	-1,5337	-1,5008	-1,4704
VIF	20,4	5,7	3,6	3,3	<b>3,0</b>	2,8	2,6	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0
$\beta_4$	-0,0671	-0,0713	-0,0726	-0,0728	<b>-0,0729</b>	-0,0730	-0,0731	-0,0731	-0,0732	-0,0732	-0,0733	-0,0733
VIF	1,4	1,3	1,3	1,3	<b>1,3</b>	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2
RMSE	0,3062	0,3131	0,3190	0,3199	<b>0,3207</b>	0,3214	0,3221	0,3228	0,3233	0,3239	0,3244	0,3248
R <sup>2</sup>	0,62	0,60	0,59	0,59	<b>0,58</b>	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,57	0,57

Fonte: Autora (2017).

As estimativas de  $b^*$ , obtidas por MQO (K=0) e por Regressão de Cumeeira (K=0,024), apresentadas na Tabela 16, evidenciaram o efeito de K sobre as estimativas paramétricas, com redução dos valores absolutos dos coeficientes.

Tabela 16 – Resultados do modelo de regressão ponderado e modelo de regressão por MQO.

Coeficiente	Mínimos quadrados Ordinários				Regressão de Cumeeira (k=0,024)			
	Estimado	Erro padrão	Valor t	Valor p	Estimado	Erro padrão	Valor t	Valor p
$\beta_0$	11,32285	2,38011	4,76	0,0000	5,83003	0,88333	6,60	0,0000
$\beta_1$	-2,08810	0,68619	-3,04	0,0035	-0,49627	0,23890	-2,08	0,0418
$\beta_2$	0,09263	0,02650	3,50	0,0009	0,03283	0,01073	3,06	0,0033
$\beta_3$	-3,76901	0,88222	-4,27	0,0001	-1,75196	0,35467	-4,94	0,0000
$\beta_4$	-0,06708	0,03038	-2,21	0,0309	-0,07289	0,03054	-2,39	0,0200
<b>R<sup>2</sup></b>	0,62				0,58			
<b>Erro padrão</b>	0,3062				0,3207			
<b>Máx. VIF</b>	49,8				5,5			
<b>Mín. VIF</b>	1,4				1,3			

Fonte: Autora (2017).

O pequeno valor de K necessário para estabilizar todos os coeficientes de regressão corrobora com o encontrado por Brown e Beattie (1975), em que a quantidade de viés introduzida na análise é relativamente pequena.

A equação ajustada por regressão de cumeeira permitiu utilizar todas as variáveis significativas no modelo ajustada por MQO, mesmo sendo variáveis que apresentaram intercorrelação, com VIF >10. A opção de omissão dessas variáveis resultaria em um modelo mal especificado, que não obedeceria aos critérios de abordagem biológica e estrutura de um modelo com o objetivo de predição do incremento, priorizando variáveis que expliquem tanto os fatores que influenciam no crescimento esperado, assim como os que o limitaram.

Os estimadores de *Ridge* podem ser recomendados como um estimador alternativo na presença de multicolinearidade entre variáveis independentes, como é frequentemente em modelos de predição de rendimento florestal (SHIN, 1990; PIMENTEL et al., 2007).

Diante da detecção de multicolinearidade e ao ter equações limitadas, deve-se optar por tratar a intercorrelação de forma a corrigir essa condição (p.e. BARE & HANN, 1981; REZENDE, et al., 1996; ANGELO, 1998; MARCHIORETTO et al., 2007; DIAS, 2008; ALMEIDA et al. 1986).

## 5 CONCLUSÕES

A análise de tronco com procedimento de amostragem não destrutiva com o Trado de Pressler em árvores de *H. serratifolius* e *H. impetiginosus* em floresta tropical pluvial em Porto Acre, Acre, permite quantificar o crescimento periódico anual, sendo um método útil na determinação de dados de avaliação e modelagem do crescimento.

Os anéis de crescimento das espécies apresentam camada de crescimento semelhante com a presença de parênquima marginal e menor presença de vasos no lenho tardio. *Handroanthus impetiginosus* apresenta cerne pardo-acastanhado, com reflexos esverdeados e *Handroanthus serratifolius*, lenho castanho.

As equações ajustadas por Cunha (2013) para estimar o incremento de Cedro (*Cedrela fissilis*), Copaíba (*Copaifera paupera*), Mogno (*Swietenia macrophylla*) e Cerejeira (*Amburana cearenses*) não são aplicáveis para estimar os incrementos periódicos anuais de *H. serratifolius* e *H. impetiginosus*, rejeitando a hipótese de validação para essas espécies manejadas em florestas inequiâneas.

Os fatores que expressam a dimensão, a forma da árvore e a competição entre árvores contribuíram para explicar a variação do incremento periódico anual em área basal das espécies. A equação do incremento periódico em área basal com transformação logarítmica da variável dependente mostrou acurácia e precisão quando utilizado o diâmetro na forma logarítmica, altura, relação h/d e o índice de competição de Hegyi como variáveis descritoras do modelo, apresentando, porém, alta colinearidade entre as variáveis.

A regressão de cumeeira para a estimação dos coeficientes de regressão, quando da presença de intercorrelação de variáveis independentes, mostra aplicabilidade na redução desse efeito. O valor de ponderação K possibilita o emprego do modelo na estimativa do incremento periódico em área basal de *Handroanthus serratifolius* e *Handroanthus impetiginosus* em Floresta Pluvial Tropical, no estado do Acre, Brasil.

## REFERÊNCIAS

- ACRE. Governo do Estado do Acre. **Zoneamento Ecológico-Econômico do Acre**, Fase II: documento síntese-escala 1:250.000. Rio Branco: Sema, 2006.
- ALENCAR, J. C.; ALMEIDA, R. A.; FERNANDES, N. P. Fenologia de espécies florestais em floresta tropical úmida de terra firme na Amazônia Central. **Acta Amazônica**. Manaus, v. 9, n.1, p. 163-198, mar. 1979.
- ALMEIDA, J. M. C. et al. Produtividade de fatores na pecuária de corte: uma avaliação por meio do estimador de cume. **Rev. Econ. Rural**. Brasília, v.24, n.2, p. 179-85, abr./jun.1986.
- ANDREASSEN, K.; TOMTER, S. M. Basal area growth models for individual trees of Norway spruce, Scots pine, birch and other broadleaves in Norway. **Forest Ecology and Management**, v. 180, p.11-24, Jul. 2003.
- ANGELO, H. Análise da produtividade dos fatores na indústria madeireira do Distrito Federal por meio de regressão de cumeeira (ridge regression). **Revista Árvore**. Viçosa, v.18, n.2, p.142-147, mai./ago. 1994.
- ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. Oxford: Pergamon Press, 1970, 506 p.
- BARE, B. B.; HANN, D.W. Applications of Ridge Regression in Forestry. **Forest Science**. v. 27, n.2, p. 339-348, Jun. 1981.
- BELSLEY, D. A., KUH, E., & WELSCH, R. E. **Regression diagnostics: identifying influential data and collinearity**. New York: John Wiley & Sons, 1980. 292 p.
- BORCHERT, R. "Soil and Stem Water Storage Determine Phenology and Distribution of Tropical Dry Forest Trees." **Ecology**. v. 75, n. 5, p. 1437-449, jul. 1994.
- BRAZ, E. M. **Subsídios para o planejamento de manejo de florestas tropicais da Amazônia**. 2010. 236f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.
- BRIENEN, R.J.W.; ZUIDEMA, P. A. **Anillos de crecimiento de árboles maderables en Bolivia**: Su potencial para el manejo de bosques y una guía metodológica. PROMAB/IGEMA, Riberalta, 2003. 33 p.
- BOTOSSO P. C. Fenologia como instrumento no acompanhamento da periodicidade e formação de anéis de crescimento no tronco de espécies arbóreas. In: Rego GM, Negrelle RRB, Morellato LPC, editores. **Fenologia**: Ferramenta para Conservação, Melhoramento e Manejo de Recursos Vegetais Arbóreas. Colombo: Embrapa Florestas; 2007.
- BROWN, W. G.; BEATTIE, B. R. Improving estimates of economic parameters by use of ridge regression with production function applications. **American Journal Agricultural Economics**. v.57, n.1, p. 21-32, Feb. 1975.
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003. 255 p.
- CAMPOS FILHO, E. M., SARTORELLI, P. A. R. **Guia de árvores com valor econômico**. São Paulo: Agroicone, 2015. 132 p.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. CEPEA. Departamento de Economia, Administração e Sociologia - ESALQ/USP. Maio, 2014 N° 149. Disponível em: <<http://http://cepea.esalq.usp.br/>>. Acesso em 17 out. 2016.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. Departamento de Economia, Administração e Sociologia - ESALQ/USP. Janeiro, 2016 N° 169. Disponível em: <<http://http://cepea.esalq.usp.br/>>. Acesso em 17 out. 2016.

CHATTERJEE, S.; HADI, A. S.; PRICE, B. **Regression analysis by example**. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 2000. 359 p.

COSTA, L. A. **Novo estimador de cumeira de Rao com aplicação em seleção genômica**. 2015. 126f. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2015.

CUNHA, T. A. **Crescimento de Espécies Florestais Madeiráveis como subsídio para o Manejo Florestal na Amazônia Ocidental**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2013.

DAWKINS, H. C. Crown diameters: their relationship to bole diameter in tropical trees. **Commonwelth Forest Review**, v. 42, n.4, p. 318-333, Dec. 1963.

DIAS, R. A. P. **Diagnóstico e redução da influência da multicolinearidade na estimação de efeitos genéticos aditivos e não-aditivos em uma população de bovinos compostos (*Bos taurus* x *Bos indicus*)**. 2008. 93 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2008.

DÍAZ, M. P.;COUTO, H. T. Z. Modelos generalizados para a mortalidade de árvores de *Eucalyptus grandis* no Estado de São Paulo, Brasil. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, n. 56, p. 101-111, dez. 1999.

D'OLIVEIRA, M. V. N. et al. Can forest management be sustainable in a Bamboo forest? A 12-year case study of forest dynamics in Antimary State Forest, Acre State, Brazilian Western Amazon. **Forest Ecol. Manage.** v. 310, p. 672-679, 15 Dec. 2013.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3.ed. New York, Ed. John Wiley & Sons, 1998. 705 p.

DURLO, M.A.; SUTILI, F.J.; DENARDI, L. Modelagem da copa de *Cedrela fissilis* Vellozo. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 79-89, dez. 2004.

FARRAR, D. E.; GLAUBER, R. R. Multicollinearity in Regression Analysis: The Problem Revisited. **The Review of Economic and Statistics**. v. 49, n.1, p. 92-107, Feb. 1967.

FERREIRA, E. J. L. O bambu é um desafio para a conservação e o manejo de florestas no sudoeste da Amazônia. **Ciência e Cultura**. São Paulo, v. 66, n.3, p. 46-51, set. 2014.

FIGUEIREDO FILHO, D. et al. O que fazer e o que não Fazer com a Regressão: pressupostos e aplicações do modelo linear de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). **Revista Política Hoje**. v. 20, n. 1, 2011.

FINGER, C. A. G. **Apostila de crescimento e produção florestal**. 2010, 123 p.

- FREUND, R.J.; WILSON, W.J. **Regression analysis: statistical modeling of a response variable**. San Diego: Academic Press, 1998. 444p
- GOURLAY, I. D. The definition of seasonal growth zones in some African *Acacia* species: a review. **IAWA Journal**. v. 16, n. 4, p. 353-359, 1995.
- HAIR JR., J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688 p.
- HILT, D. E.; SEEGRIST, D. W. Ridge: a computer program for calculating ridge regression estimates. **Research Note NE-236**. Upper Darby, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. 7p.
- HOERL, A. E. e KENNARD, R.W. Ridge regression; biased estimation for non orthogonal problems. **Technometrics**. v. 12, n.1, p. 55-67, Feb. 1970.
- INTERNATION ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS. List of Microscopic Features for Hardwood Identification. **IAWA Bulletin**, v.10, n.3, p.219-332, 1989.
- JUSTINIANO, M. J.; FREDERICKSEN, T. S.; NASH, D. **Ecología y Silvicultura de Especies Menos Conocidas – Tajibos o Lapachos *Tabebuia* spp. Gomes ex A.P. de Candolle**, Bignoniaceae. Serie de libros Ecología y Silvicultura del Proyecto BOLFOR. Santa Cruz, Bolivia, 2000. 65 p.
- JACOBY, G. C. Overview of tree-ring analysis in tropical regions. **IAWA Bulletin**, v. 10, n. 2, p. 99-108, Jan. 1989.
- KAINER, K. A. et al. Liana loads and their association with *Bertholletia excelsa* fruit and nut production, diameter growth and crown attributes. **Journal of Tropical Ecology**. v.22, n.2, p.147-154, Mar. 2006.
- KROLL B., NALVARTE W. & MARMILLOD D. 1994. **Arboles del Perú (Especies forestales de Dantas)**. Universidad Agraria La Molina- COTESU - Organización Suiza para el Desarrollo y la Cooperación. Lima 100, Peru.
- LEITE, H. G.; REGAZZI, A. J. Métodos estatísticos para avaliar a igualdade de equações volumétricas. **Revista Árvore**. Viçosa, v.16, n.1, p.59-71, jan./abr. 1992.
- LOHMANN, L.G. 2015 *Bignoniaceae* in **Lista de Espécies da Flora do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB112474>>. Acesso em 17 out. 2016.
- LÓPEZ, J.A. et al. 1990. **Árboles comunes del Paraguay**. Paraguay, Cuerpo de Paz. 425 p.
- LORENZI, H. **Árvores Brasileiras**. Editorial Plantarum. 1. ed. São Paulo: Ed. Plantarum, 1992. 241 p.
- LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 5. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2008. v.1. 368p.
- LORIMER, C.G. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. **Forest Ecology and Management**, v. 6, n.4, p. 343-360, Oct. 1983.

- MARCHIORETTO, M. A.; MAUHS, J.; BUDKE, J. C. Fenologia de espécies arbóreas zoocóricas em uma floresta psamófila no sul do Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v.21, n.1, p.193-201, jan./mar. 2007.
- MARQUARDT, D. W. Generalized inverses, ridge regression, biased linear estimation, and nonlinear estimation. **Technometrics**. v.12, n.3, p. 591–256, Aug. 1970.
- MATTOS, P. P. et al. A dendrocronologia e o manejo florestal sustentável em florestas tropicais. **Embrapa Florestas**, Colombo, n. 218, p. 1 – 35, ago. 2011.
- MONSERUD, R.; STERBA, H. A basal area increment model for individual trees growing in even-and-uneven-aged forest stands in Austria. **Forest Ecology and management**. Amsterdam, v. 80, n.1, p. 57-80, Jan. 1996.
- MONTGOMERY, D.C.; PECK, E.A. **Introduction to linear regression analysis**. New York: J. Wiley, 1981. 504 p.
- NELDER, J., & WEDDERBURN, R. Generalized Linear Models. **Journal of the Royal Statistical Society**. v. 135, n.3, p. 370-384, 1972.
- PARROTA, J. A. The influence of overstory composition on understory colonization by native species in plantations on a degraded tropical site. **Journal Vegetal Science**, v.6, n.5, p. 627-636, Oct. 1995.
- PARROTA, J.A.; FRANCIS, J. K.; ALMEIDA, R.R. 1995. **Trees of the Tapajós: a photographic field guide**. USDA Forest Service, Río Piedras, Puerto Rico, 1995. 370 p.
- PIMENTEL, E.C.G. et al. Use of ridge regression for the prediction of early growth performance in crossbred calves. **Genetics and Molecular Biology**. São Paulo, v. 30, n. 3, p. 536-544, 2007.
- POKHAREL, B. **A critical evaluation of diameter increment modelling in the Great Lakes region**, 2008. 148 p. Dissertation, (Doctor of Philosophy in Forest Science) - Michigan Technological University, Houghton, MI, 2008.
- PRETZSCH, H. **Forest dynamics, growth and yield. From measurement to model**. Heidelberg: Springer, 2009. 664 p.
- PRETZSCH, H., BIBER, P., DURSKEY, J. The single tree-based stand simulator SILVA: Construction, application and evaluation. **Forest Ecology and Management**. Amsterdam, v. 162, n. 1, p. 3–21, 1 Jun. 2002.
- PUTZ, F. E.; DYKSTRA, D. P.; HEINRICH, R. Why poor logging practices persist in the tropics. **Conservation Biology**. Malden, v. 14, n. 4, p. 951- 956, Aug., 2000.
- REZENDE, J. L. P.; SILVA, M. L.; PEREIRA, J. J. Caracterização tecnológica da produção de pequenas e grandes empresas florestais do Estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v.20, n.3, p.331-342, 1996.
- RINN, F. TSAP, version 3.0, reference manual: computer program for tree ring analysis and presentation. Heidelberg: Dipl. Phys., 1996. 263 p.

- ROMAN, M.; BRESSAN, D. A.; DURLO, M. A. Variáveis morfométricas e relações interdimensionais para *Cordia trichotoma* (Vell.). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 4, p. 473-480, out./dez., 2009.
- RYKIEL, E. J. J. Testing ecological models: the meaning of validation. **Ecological Modelling**. v. 90, n.3, p. 229 – 244, 1 Nov., 1996.
- SABATIA, C.O.; BURKHART, H.E. Competition among loblolly pine trees: Does genetic variability of the trees in a stand matter? **Forest Ecology and Management**. v. 263, n.1, p.122-130, 1 Jan., 2012.
- SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P.; SOUZA, C. A. M. **Análise de regressão aplicada a Engenharia Florestal**. 2. ed. Santa Maria: FACOS-UFSM, 2009. 294 p.
- SCHOMAKER, M. E., ZARNOCH, S.J., BECHTOLD, W.A., et al. **Crown condition classification: a guide to data collection and analysis**. Gen. Tech. Rep. SRS – 102. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, Asheville, NC, 2007. 92 p.
- SCHULZE, M. et al. Evaluating ipê (*Tabebuia*, Bignoniaceae) logging in Amazonia: sustainable management or catalyst for forest degradation? **Biological Conservation**. v. 141, n. 8, p. 2071–2085, Aug., 2008.
- SCHWEINGRUBER, F. H. **Tree rings: basics and applications of dendrochronology**. Dordrecht: D. Reidel Pub. Co., 1988. 292 p.
- SCHWINNING, S.; WEINER, J. Mechanisms determining the degree of size asymmetry in competition among plants. **Oecologia**. v. 113, n.4, p. 447-455, Feb., 1998.
- SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal: parte I: modelos de regressão linear e não-linear; parte II: modelos para relação hipsométrica, volume, afilamento e peso de matéria seca**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. 352 p.
- SECRETARIA DE COMÉRCIO EXTERNO. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC). Disponível em: <[http://http://www.mdic.gov.br/](http://www.mdic.gov.br/)>. Acesso em 17 out. 2016.
- SHANLEY, P.; MEDINA, G. (Ed.). **Frutíferas e plantas úteis na vida amazônica**. Belém: Cifor; Embrapa Amazônia Oriental; Imazon, 2005. p. 51-60.
- SILVEIRA, M. **A floresta aberta com bambu no sudoeste da Amazonia: padrões e processos em múltiplas escalas**. Rio Branco: Ediufac, 2005. 127 p.
- SHIN, M. Y. The use of ridge regression for yield prediction models with multicollinearity problems. **Journal of Korean Forestry Society**. v.79, n.3, p. 260-268, 1990.
- SOMBROEK, W. Spatial and Temporal Patterns of Amazon Rainfall: Consequences for the planning of Agricultural occupation and the protection of primary forests. **Ambio**. v. 30, n. 7, p. 388-396, Nov., 2001.
- SAS Institute Inc., 2009. **SAS/ETS 9.1 User's Guide**. SAS Institute Inc., Cary. NC..
- TOMAZELLO FILHO, M. et al. Periodicidade e taxa de crescimento de espécies florestas decíduas - *Tabebuia serratifolia*, ipê amarelo, Bignoniaceae e *Cedrela fissilis*, cedro,

Meliaceae - e perenifólias - *Dipteryx alata*, cumarú, Leg. Faboideae e *Esenbeckia leiocarpa*, guarantã, Rutaceae - na Região Sudeste do Estado de São Paulo. In: XIII CONGRESSO DA SOCIEDADE BOTÂNICA DE SÃO PAULO, 9., 2000, São Paulo/SP. **Anais...** São Paulo/SP: Instituto de Biociências, 2000. p. 42.

TONINI, H.; ARCO-VERDE, M.F. Morfologia da copa para avaliar o espaço vital de quatro espécies nativas da Amazônia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 40, n. 7, p. 633- 638, jul. 2005.

TURKMAN, M.A.A.; SILVA, G.L. **Modelos Lineares Generalizados da teoria à prática**. Universidade de Lisboa, 2000. 153p.

VANCLAY, J. K. Aggregating tree species to develop diameter increment equations for tropical rainforests. **Forest Ecology and Management**. Amsterdam, v. 42, n.3, p. 143 – 168, Aug. 1991.

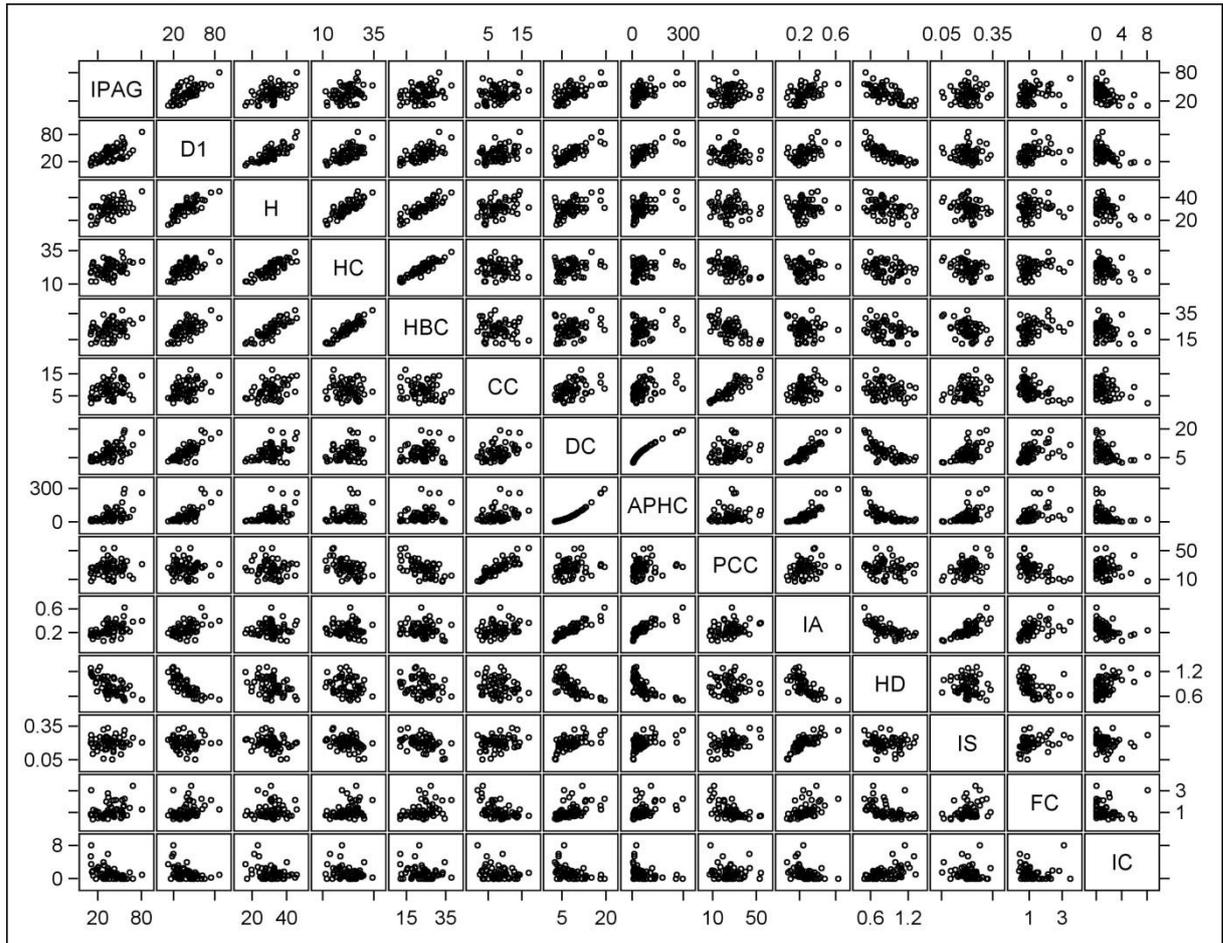
VANCLAY, J. K. **Modelling Forest Growth and Yield: applications to mixed tropical forests**. United Kingdom: CAB International, 1994. 312 p.

WORBES, M. Annual growth rings, rainfall-dependent growth and long-term growth patterns of tropical trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela. **Journal of Ecology**. v. 87, n.3, p. 391-403, Jun., 1999.

WORBES, M. How to measure growth dynamics in tropical trees: a review. **IAWA Journal**, v. 16, n. 4, p. 337-351, Jan., 1995.

YAMAGUCHI, L. C. T. et al. Matriz de oferta agropecuária: uma aplicação de novas técnicas de regressão de cume. **Rev. Econ. Rural**. Brasília, v.23, n.2, p. 235-49, abr./jun. 1985.

**APÊNDICE A – GRÁFICOS DE DISPERSÃO DAS VARIÁVEIS PARA OS DADOS DE INCREMENTO PERIÓDICO ANUAL EM ÁREA BASAL (IPAG) E AS COVARIÁVEIS. D1=DIÂMETRO A ALTURA DO PEITO; H=ALTURA TOTAL; HC= ALTURA COMERCIAL; HBC= ALTURA NA BASE DA COPA; CC= COMPRIMENTO DE COPA; DC=DIÂMETRO DE COPA; APHC= ÁREA DE PROJEÇÃO HORIZONTAL DA COPA; PCC= PROPORÇÃO DE COPA; IA=ÍNDICE DE ABRANGÊNCIA; HD=RELAÇÃO ALTURA/DIÂMETRO; IS=ÍNDICE DE SALIÊNCIA; FC=FORMAL DE COPA; IC=ÍNDICE DE COMPETIÇÃO DE HEGYI;**



**APÊNDICE B – ÁRVORE-AMOSTRA DE *Handroanthus serratifolius* SERVINDO COMO APOIO PARA A *Guadua* sp. (TABOCA), DECORRENTE DA ABERTURA DE CLAREIRA.**



## APÊNDICE C – ALGUNS PROGRAMAS SAS UTILIZADOS NESTA PESQUISA.

A) Gráficos de dispersão em forma de matriz:

```

PROC SGSCATTER DATA=A;
    MATRIX IPAG D H HC HBC CC DC APHC PCC IA HD IS FC IC;

LABEL IPAG='IPAg'
    D1='d'
    H='h'
    HC='hc'
    HBC='hbc'
    CC='cc'
    DC='dc'
    APHC='dc/d'
    PCC='cc/h'
    IA='dc/h'
    HD='h/d'
    IS='cc/d';
    FC='FC';
    IC='IC';

RUN;
    QUIT;

```

B) Ridge Regression:

```

TITLE 'PARA AJUSTAR O MODELO POR MÍNIMOS QUADRADOS ORDINÁRIOS E
VERIFICAR A SIGNIFICÂNCIA DOS COEFICIENTES';

PROC REG;
    MODEL LNIPAG= LND H HD IC / VIF TOL COLLIN CORR;
    OUTPUT OUT=REG1 R=RES P=PRED;

RUN;
    QUIT;

TITLE 'PARA CALCULAR A RIDGE REGRESSION';

PROC REG DATA=A OUTVIF PLOTS (ONLY)=RIDGE (UNPACK VIFAXIS=LOG) OUTSEB
RSQUARE OUTEST=SAIDA OUTSTB COVOUT RIDGE=0 TO 0.05 BY 0.002;

MODEL LNIPAG= LND H HD IC / VIF TOL COLLIN CORR;
    PLOT/RIDGEPLOT NOMODEL NOSTAT;

RUN;
    QUIT;

```