

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

**CRESCIMENTO DE ESPÉCIES FLORESTAIS MADEIRÁVEIS  
COMO SUBSÍDIO PARA O MANEJO FLORESTAL NA  
AMAZÔNIA OCIDENTAL**

**TESE DE DOUTORADO**

**Thiago Augusto da Cunha**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2013**

**CRESCIMENTO DE ESPÉCIES FLORESTAIS MADEIRÁVEIS  
COMO SUBSÍDIO PARA O MANEJO FLORESTAL NA  
AMAZÔNIA OCIDENTAL**

**por**

**Thiago Augusto da Cunha**

Tese apresentada ao curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração de Manejo Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do grau de  
**Doutor em Engenharia Florestal**

**Orientador:** Prof. Dr. César Augusto Guimarães Finger

**Santa Maria, 2012, RS, Brasil**

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

Augusto da Cunha, Thiago  
CRESCIMENTO DE ESPÉCIES FLORESTAIS MADEIRÁVEIS COMO  
SUBSÍDIO PARA O MANEJO FLORESTAL NA AMAZÔNIA OCIDENTAL /  
Thiago Augusto da Cunha.-2013.  
105 p.; 30cm

Orientador: César Augusto Guimarães Finger  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2013

1. Incremento de árvores individuais 2. Modelo Linear  
Generalizado 3. Eficiência do crescimento 4.  
Autoecologia I. Augusto Guimarães Finger, César II.  
Título.

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Tese de Doutorado

**CRESCIMENTO DE ESPÉCIES FLORESTAIS MADEIRÁVEIS  
COMO SUBSÍDIO PARA O MANEJO FLORESTAL NA  
AMAZÔNIA OCIDENTAL**

Elaborada por

**Thiago Augusto da Cunha**

como requisito parcial para a obtenção do grau de  
**Doutor em Engenharia Florestal**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Paulo Renato Schneider, Dr.**  
(Presidente)

**César Augusto Guimarães Finger, Dr. (UFSM)**  
(Orientador)

**Jorge Antonio de Farias, Dr. (UFSM)**

**Christina Lynn Staudhammer, PhD. (University of Alabama)**

**Sebastião do Amaral Machado, Dr. (UFPR)**

**Santa Maria, 25, de Fevereiro de 2013.**



*Dedico especialmente a meus pais:*

*Antônio de Pádua Vasconcelos da Cunha e*

*Maria Célia Augusto da Cunha*

*pelo apoio imprescindível para lograr mais este objetivo que tracei  
em minha vida*

## **AGRADECIMENTOS**

Neste trabalho, procurei escrever com parcimônia no uso da estatística e esforço na interpretação silvicultural dos resultados. Para tal, tive a orientação de grandes professores da área florestal. Por isso, merece agradecimento o meu orientador Prof. Dr. César Augusto Guimarães Finger os professores Paulo Renato Schneider, Miguel Antão Durlo e Frederico Dimas Fleig pela co-orientação e pelo apoio imprescindível para o desenvolvimento deste trabalho. Também quero agradecer ao professor Frank Wadsworth pela leitura crítica desse trabalho e sugestões úteis.

Agradeço ao governo brasileiro por meio da CAPES, órgão federal de relevante importância para o fomento da educação superior, pela concessão de bolsa de estudo a qual apoiou a concretização deste Curso de Doutorado e o estágio de doutorado no exterior junto ao Professor Hubert Hasenauer da Universität Bodenkultur. Ao CNPq junto ao Projeto Universal que foi aprovado para dar apoio financeiro a esta pesquisa.

Quero agradecer ao Pesquisador da EMBRAPA – Acre Evandro Figueiredo Orfanó pelo apoio imprescindível e, sobretudo, boa vontade para a disponibilização das áreas de estudo para a realização desta pesquisa.

Também merece agradecimento a empresa Serraria São Lucas pelo apoio técnico durante as coletas de dados.

Aos amigos mateiros Raimundo, Francisco (in memoria), Ismael e Jorge pelo apoio e acompanhamento durante as caminhadas na floresta para coleta de dados na Amazônia.

## RESUMO

Tese de Doutorado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal  
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

### CRESCIMENTO DE ESPÉCIES FLORESTAIS MADEIRÁVEIS COMO SUBSÍDIO PARA O MANEJO FLORESTAL NA AMAZÔNIA OCIDENTAL

AUTOR: THIAGO AUGUSTO DA CUNHA  
ORIENTADOR: Dr. CÉSAR AUGUSTO GUIMARÃES FINGER  
Data e Local da defesa: Santa Maria, 25 de Fevereiro de 2013.

Dados confiáveis de crescimento de árvores são muito importantes no contexto do manejo florestal. Características próprias da árvore como a arquitetura e a competição estão associadas diretamente com o crescimento em diâmetro e altura. Estudos anteriores indicaram que essas variáveis podem descrever a variação do incremento. No entanto, o efeito dessas variáveis na modelagem do crescimento de árvores tropicais precisa ser mais bem estudado, para discutir efetivamente as práticas de manejo florestal atuais. Portanto, nessa pesquisa reconstruiu-se o incremento periódico anual em área basal (IPAg) de quatro espécies de árvores madeiráveis de vida longa da Amazônia: Cedro (*Cedrela odorata*); Cerejeira (*Amburana cearensis*); Copaíba (*Copaifera paupera*) e Mogno (*Swietenia macrophylla*) com o objetivo de explicar a variação de IPAg, propondo um modelo de crescimento tipo de árvore individual utilizando os seguintes preditores potenciais: tamanho e morfometria da árvore; o *status* competitivo; a posição social e a carga de lianas na copa. O modelo foi ajustado considerando a distribuição de probabilidade Gama no contexto de Modelo Linear Generalizado. Em base a critérios estatísticos e avaliação residual, o modelo de crescimento demonstrou ser adequado para explicar a variação de IPAg e revelou variáveis dendrométricas que englobam grande parte dos efeitos que moldaram a variação observada do IPAg, apresentando boa abrangência dos dados observados em situações onde o crescimento é complexo e variado entre as espécies. As árvores quando amostradas em boas condições de sítio, expressado por boa exposição da copa à luz solar e, portanto, pouca competição, apresentaram as maiores taxas de IPAg, no período avaliado, do que aquelas encontradas sob forte competição por árvores vizinhas. Além disso, as variáveis carga de lianas na copa, para Cedrela, o diâmetro de copa e o *status* competitivo de Hegyi influenciaram de forma significativa o IPAg. Árvores amostradas em densidade maior do que 25 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup> mostraram queda significativa do IPAg%. No contexto de incremento em área basal por área ocupada na floresta (eficiência da copa), todas as quatro espécies mostraram-se mais eficientes quando em melhor posição social e quando com copas estreitas e longas (formal de copa pequeno). Entre as espécies a *Cedrela odorata* foi a mais eficiente no crescimento, comportamento que reforça a importância da liberação das árvores o que proporcionaria melhor exposição da copa à luz solar.

**Palavras-chave:** Incremento de árvores individuais; Modelo Linear Generalizado; Eficiência do crescimento; Autoecologia.

## ABSTRACT

Tese de Doutorado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal  
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

### GROWTH OF FOREST TIMBER SPECIES AS IMPROVEMENTS TO THE FOREST MANAGEMENT IN WESTERN AMAZON

AUTHOR: THIAGO AUGUSTO DA CUNHA  
ADVISOR: Dr. CÉSAR AUGUSTO GUIMARÃES FINGER  
Date and Place of Defense: Santa Maria, February 25<sup>th</sup>, 2013.

Reliable growth data from trees are very important in the context of forest management. Tree-characteristics such as architecture and competition are associated with diameter growth. Previous studies analyzing tree growth changes have indicated that these variables can describe these effects more effectively. However, the precise role of these effects in the growth modeling of tropical trees needs to be studied further to discuss more effectively the actual forest management practices. Here, we reconstructed the periodic annual basal area increment (IPAg) of four long-lived timber species from the Amazon forest: Cedro (*Cedrela odorata*); Cerejeira (*Amburana cearensis*); Copaíba (*Copaifera paupera*) e Mogno (*Swietenia macrophylla*) aiming to explain the IPAg variation by developing a individual-tree growth model using the following potential predictors: tree size, morphometric data, competition; crown position and liana load. The model was fitted using a Gamma distribution in the context of Generalized Linear Models. The statistics criteria and residual distributions showed that growth model was adequate to adjust the observed IPAg data and revealed some dendrometric variables that were involved into the effects that lead the observed variation in IPAg, presenting a broad range of the observed data in situations where growth is complex and variable between species. Trees sampled in good site conditions - expressed as a good crown exposure to light, and therefore low competition - presented higher growth rates than trees sampled under high competition from neighboring trees. Besides, the variables Liana load, for Cedrela, the crown diameter and the Hegyi competition index was demonstrated to be highly influential predictive variable. Also, trees sampled in densities greater than 25 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup> had their IPAg% significantly reduced. In the context of basal area increment yield by the space occupied in the forest (crown efficiency) the species presented mostly efficiency when growth in dominant position with thin and long crown (crown formal). Among the species, *Cedrela odorata* was the most efficient in growth. This behavior reinforces the importance of release trees to obtain better crown exposure.

**Keywords:** Individual tree-increment; Generalized Linear Model; Growth efficiency; Autoecology.

## LISTA DE ABREVIATURAS UTILIZADAS

Abreviação	Definição da variável	Unidade	Equação
IPAg	Incremento periódico anual em área basal	cm <sup>2</sup> .ano <sup>-1</sup>	$IPAg = \frac{\left[ \frac{\pi}{4} \cdot (2d_1 \cdot i_d + i_d^2) \right]}{4}$
IPAg%	Incremento periódico anual em área basal relativo ao diâmetro anterior	%	$IPAg\% = \left( \frac{IPAg}{AB_1} \right)$
EC	Eficiência da copa	cm <sup>2</sup> .m <sup>-2</sup> .ano <sup>-1</sup>	$EC = \frac{IPAg}{APC}$
APC	Área de projeção da copa	m <sup>2</sup>	$APC = dc^2 \cdot \left( \frac{\pi}{4} \right)$
g <sub>final</sub>	Área basal para o DMC	m <sup>2</sup>	$g_{final} = (1 + IPAg\%)^t \cdot g_{inicial}$
t	Tempo de passagem	Anos	$t = \frac{\ln(g_{final}) - \ln(g_{inicial})}{\ln(1 + IPAg\%)}$
$\overline{AB}$	Área basal média por Spurr	m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup>	$\overline{AB} = \frac{\sum_{j=1}^n \left\{ (j-1/2) \cdot \left[ \frac{(d_j / Dist_j)^2}{4} \right] \right\}}{n}$
DCM	Diâmetro mínimo de corte	-	-
IEC	Índice de exposição da copa	-	-
Liana	Carga de lianas na copa	-	-
dc	Diâmetro da copa	m	-
cc	Comprimento da copa	m	-
h	Altura total	m	-
d	Diâmetro a altura do peito	cm	-
hbc	Altura na base da copa	m	-

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - Planos de manejo florestal sustentável (PMFS) licenciados no Estado do Acre no período de 2007 a 2010. Extraído na integra de IMAC (2010). 20
- FIGURA 2 - Mapa de localização das Unidades de Produção Anual (UPA). As Isoietas foram obtidas de Sombroek (2001). 29
- FIGURA 3 - Número de indivíduos amostrados, segregados por classe de diâmetro. 32
- FIGURA 4 - Modelo esquemático utilizado para a medição de variáveis de tamanho das árvores objeto:  $d$ =diâmetro a altura do peito;  $h$ =altura total;  $hbc$ =altura na base da copa;  $cc$ =comprimento da copa;  $dc$ =diâmetro da copa. 34
- FIGURA 5 - Ilustração e fórmulas para o cálculo do incremento periódico anual em área basal.  $IPAg$ =incremento periódico anual em área basal ( $cm^2 \cdot ano^{-1}$ );  $d_1$ =diâmetro reconstruído utilizando os quatro últimos anéis de crescimento completos;  $d_2$ =diâmetro sem casca;  $i_d$ =incremento periódico em diâmetro;  $AB$ =área basal. 35
- FIGURA 6 - Macrofotografia da anatomia da madeira com delimitação dos anéis de crescimento (cavas) das espécies estudadas. Comprimento da barra horizontal=10 mm. 36
- FIGURA 7 - Esquema do critério para a seleção de árvores competidoras. A altura  $h_j$  foi corrigida em situações de inclinação do terreno.  $IEC1$ = posição social de forma que a copa receba luz direta vertical e lateral;  $IEC2$ =luz total de cima e lateral sombreada;  $IEC3$ =copa sem recebimento de luz direta. Árvores competidoras inclinadas, a distância  $Dist_{ij}$  foi considerada a partir do centro da copa da mesma (ponto  $x$ ) e não a partir da base do tronco. 40
- FIGURA 8 - Expectativa da relação entre o incremento em área basal ( $IPAg$ ) e o índice de saliência da árvore. Para um mesmo diâmetro ( $d$ ) apresenta maior capacidade fotossintética a árvore com maior diâmetro de copa ( $dc$ ), o que pode refletir em maiores taxas de crescimento. 44
- FIGURA 9 - Representação esquemática do processo para o ajuste dos modelos de incremento em área basal.  $IPAg$ =incremento periódico anual em área basal;  $LnIPAg$ =logaritmo natural de  $IPAg$ ;  $MLG$ =modelo linear generalizado. Modificado de Gea-Izquierdo e Cañellas (2009). 43
- FIGURA 10 - (a) Perfil de verossimilhança e valor  $F$  para o parâmetro  $\Lambda$  da transformação Box-Cox de  $LnIPAg$ . A faixa cinza mostra o intervalo de confiança. (b) Frequência observada do incremento periódico anual em área basal ( $IPAg$ ; histograma) e frequência esperada (linhas) do modelo Gama e Normal.  $D$ =estatística de Kolmogorov-Smirnov. O valor do parâmetro de forma da distribuição Gama foi de 2,9. 47

FIGURA 11 - Linhas espécie-específicas da associação entre incremento em área basal (IPAg) e variáveis de tamanho da árvore (d=diâmetro a altura do peito; h=altura total; cc=comprimento de copa; dc=diâmetro de copa). 54

FIGURA 12 - Linhas espécie-específicas da correlação de Pearson entre incremento em área basal (IPAg) e os índices de competição. ns=correlação não significativa entre IPAg e o referido índice de competição. 56

FIGURA 13 - Decréscimo exponencial da competição medido pelo índice de Hegyi com o aumento do porte das árvores objeto. 59

FIGURA 14 - Progressão da média (◆), mínimo, máximo e valores de interquartis do incremento periódico em área basal (IPAg) para diferentes condições de luz (IEC) ao longo das classes de diâmetro. DMC=diâmetro mínimo de corte (para *Swietenia* equivale a 70 cm; demais espécies 50 cm). Contraste de médias do IPAg entre IEC (ajustado por Tukey-Kramer) é indicado por letras abaixo das caixas. Linhas descontínuas indicam condições não amostradas. Tamanhos da amostra por classe são: *Cedrela* 6-30; *Amburana* 3-20; *Copaifera* 6-21; *Swietenia* 4-13. 62

FIGURA 15 - Árvores com maior eficiência no crescimento (EC) tenderam a ter copas que abrangem menor área de projeção no solo (APC) e quando em boa posição social. IEC1=copa recebendo luz vertical e lateral; IEC2=luz total de cima e lateral sombreada; IEC3=copa sem recebimento de luz direta. 64

FIGURA 16 - Diferença da eficiência da copa em árvores dominantes (IEC=1) com 100 e 300 m<sup>2</sup> de área de projeção da copa. EC=eficiência da copa. \*Em comparação com valor máximo da EC obtido de *Cedrela*. 65

FIGURA 17 - Diminuição da produção média do incremento em área basal com a diminuição do formal da copa por espécie. 66

FIGURA 18 - Decréscimo do incremento em área basal (IPAg) de árvores de *Cedrela* com o aumento da carga de lianas na copa: (Liana1) árvores livres de lianas, n=44; (Liana2) árvores com 50% da copa ocupada por lianas, n=55; (Liana3) árvores com >=75% da copa ocupada por lianas, n=21. Contraste de médias do IPAg entre as cargas de lianas (ajustado por Tukey-Kramer) é indicado por letras acima de cada barra do histograma. Wiskers representam um erro padrão. 68

FIGURA 19 - Valores observados (preto) e estimados (vermelho) com limites de confiança superior e inferior (linha descontínua) do modelo Gama de IPAg (Expressão 8) para *Cedrela* (a). Valores estimados (preto) em função dos observados por espécie (b). (*Cedrela odorata*=triângulo; *Amburana cearensis*=círculos; *Copaifera palpera*=quadrado; *Swietenia macrophylla*=estrela). 75

FIGURA 20 - Aumento do incremento periódico anual em área basal (IPAg) estimado por espécie em função do diâmetro e comprimento de copa e decréscimo em função da competição pelo índice de Hegyi. 77

FIGURA 21 - Redução do crescimento de *Cedrela*, *Amburana*, *Copaifera* e *Swietenia* devido à densidade de árvores competidoras circundante. Média (◆) e intervalo de

confiança a 95% são apresentados. O contraste de médias do IPAg% entre as classes de densidade (ajustado por Tukey-Kramer) é indicado por letras. A densidade foi calculada por Spurr empregando a Expressão 6. 81

FIGURA 22 - Influência de duas árvores vizinhas competidoras na forma da copa de uma árvore objeto de Cedrela. 82

FIGURA 23 - Distribuição de indivíduos por espécie. Área total de 4657 ha. 79



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Sumário de informações das espécies estudadas nas quatro UPA.	31
TABELA 2 - Valores médios, mínimo e máximo das variáveis dendrométricas coletadas por espécie.	39
TABELA 3 - Índices de competição utilizados.	42
TABELA 4 - Índices morfométricos utilizados para medir o efeito da competição passada.	44
TABELA 5 - Critérios para diagnóstico dos modelos de regressão 1 e 2.	51
TABELA 6 - Comparação dos Modelos. Coeficientes de regressão e ajuste estatístico para os Modelos 1 e 2 para o conjunto de dados, considerando todas as espécies agrupadas (Grupo).	70
TABELA 7 - Coeficientes de regressão em escala recíproca e ajuste estatístico do modelo de incremento Gama (expressão 8).	72
TABELA 8 - Efeito da posição social (IEC) na produtividade de área basal (IPAg%). Valores de produtividade foram calculados utilizando o incremento em área basal para árvores da classe de diâmetro 30-50 cm.	80
TABELA 9 - Efeito da posição social (IEC) na simulação do tempo de crescimento (anos) para a árvore passar de 30 cm para 50 cm. Para o cálculo utilizou-se os valores de produtividade da tabela 8, em escala centesimal, na fórmula da expressão.	80

## LISTA DE APÊNDICE

- APÊNDICE 1A - Apoio para verrumagem no acima das raízes tabulares (DAS) numa árvore de *Swietenia* (*Swietenia macrophylla*) na UPA da Fazenda Canary. 97
- APÊNDICE 1B - Seção transversal de *Copaifera* (*Copaifera paupera*) evidenciando os anéis de crescimento em que ocorre a secreção de óleo-resina pelos canais axiais presentes no parênquima axial marginal. 98
- APÊNDICE 1C - Regeneração de *Cedrela* (*Cedrela odorata*) sem iluminação direta da copa devido ao dossel fechado formado principalmente por *Guadua sp.* (Taboca). O indivíduo também estava atacado por *Hypsiphylia grandella*. 99
- APÊNDICE 2 - Gráficos de dispersão das variáveis duas a duas para os dados de incremento periódico anual em área basal (IPAg) e as covariáveis (por espécie). d=diâmetro a altura do peito; h=altura total; dc=diâmetro de copa; cc=comprimento de copa. dc/d=índice de saliência; dc/h=índice de abrangência; dc/cc=índice de copa; cc/h=proporção de copa; h/d=esbeltez. 100
- APÊNDICE 3 - Dispersão não heterocedástica do Deviance residuals do modelo de regressão Gama (modelo 2) para estimar o incremento periódico em área basal (IPAg). 104
- APÊNDICE 4 - Função Densidade e Probabilidade Gama. 105
- APÊNDICE 5 - Alguns programas SAS utilizados nesta pesquisa. 106

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
Justificativa e enquadramento do estudo	18
Objetivo geral	19
Objetivos específicos	19
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>20</b>
Manejo florestal	20
Crescimento das árvores	22
Modelagem do crescimento florestal	22
Anéis de crescimento em árvores tropicais	24
<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>28</b>
Área de estudo e espécies avaliadas	28
Levantamento dos dados	31
Covariáveis relacionadas ao crescimento	32
Incremento periódico anual em área basal (IPAg)	34
Produtividade em área basal (IPAg%)	37
Incremento por área de copa (Eficiência da copa)	37
Quantificação da competição	39
Quantificação do status competitivo	41
Densidade ótima para o crescimento em área basal	42
Morfometria da árvore como efeito da competição passada	43
Formulação do modelo de incremento em área basal (IPAg)	45
Medidas de ajuste do modelo de incremento	50
Análise residual	52

<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>53</b>
Crescimento e dimensão	53
Crescimento e competição	55
Análise dos índices de competição	56
Crescimento e exposição da copa à luz (IEC)	60
Análise de IPAg por classe de diâmetro e posição social	60
Eficiência do crescimento por posição social	63
Eficiência da copa (EC) e o conceito de Assmann	65
Crescimento e carga de lianas na copa de Cedrela	67
Modelagem do incremento em área basal (IPAg)	69
Comparação entre modelos (LnIPAg vs. IPAg)	69
Modelo de regressão Gama (IPAg)	70
Comportamento do modelo de regressão Gama	73
Por que liberar as árvores?	78
Implicações silviculturais	82
<b>CONCLUSÃO</b>	<b>86</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>88</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A floresta Amazônica apresenta um grande número de espécies arbóreas para a produção de madeira, havendo um considerável interesse em promover a sustentabilidade da produção como estratégia para a manutenção da qualidade ambiental, a melhora das condições sociais e a produção de madeira serrada. Entretanto, no contexto de manejo e de tratamentos silviculturais, nesse tipo florestal estes quesitos são pouco conhecidos/aplicados.

Atualmente, um dos procedimentos técnicos para a execução de Planos de Manejo Florestal na Amazônia - estabelecidos pelo governo - considera como referência um diâmetro mínimo de corte (DMC) de 50 cm, um ciclo de corte mínimo de 25 e máximo de 35 anos (pouco conservador) e um incremento de referência médio de  $0,86 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$  atribuído para toda a floresta (Instrução Normativa 5/2006). Porém, a taxa de incremento referenciada, obtida de parcelas permanentes, desconsidera a variação específica do crescimento observado entre sítios, posição social, tamanho da árvore e nível de competição sendo, portanto, não sustentável para a atual perspectiva de manejo florestal.

Certamente, aplicações práticas de manejo florestal como: seleção de espécies para produção de madeira; estimativa de ciclos de corte orientados (cf. SCHÖNGART, 2008) e a prescrição de tratamentos silviculturais específicos, constituem ferramentas que podem contribuir para uma floresta sustentável. Contudo, para colocar isto em prática, assume-se como informação mínima conhecer e descrever o padrão, de crescimento das espécies que compõem a floresta ou ao menos daquelas consideradas mais importantes (VANCLAY, 1994) bem como conhecer o processo de regeneração e o recrutamento da floresta.

O estudo envolvendo o crescimento de árvores individuais na Amazônia se encontra em seus primórdios, com um número limitado de modelos de crescimento em publicações esparsas. Essa deficiência está associada à indisponibilidade de dados confiáveis do crescimento do componente arbóreo. Por outro lado, o uso de dados medidos por dendrocronologia esbarraram na controvérsia da existência de anéis anuais de crescimento em árvores tropicais (LIEBERMAN; LIEBERMAN, 1985). Contudo, algumas pesquisas provaram o contrário da presença de anéis de crescimento em árvores tropicais. Em publicações recentes, a análise de anéis foi

utilizada após a confirmação por Worbes (1995) e por outros autores que relacionaram a ocorrência de anéis anuais com a estação seca bem definida na região Amazônica (WORBES, 1999; NATH et al., 2012). Deste resultado foi possível viabilizar a aplicação de métodos dendrocronológicos para pesquisa em crescimento florestal por Dünisch et al. (2003) e Brienen e Zuidema (2005).

A gestão silvicultural requer informações sobre a relação entre o crescimento da árvore e seus potenciais descritores (variáveis explicativas), como atributos da copa, como um substituto da superfície de assimilação fotossintética da árvore (HASENAUER; MONSERUD, 1996), ou variáveis de competição que determinam a situação competitiva para uma determinada árvore que interage com suas vizinhas (MONSERUD; STERBA, 1996), bem como as condições de sítio (p.e. CHOI et al., 2001).

Enquanto, para florestas temperadas tais estudos estão disponíveis (p.e. COLE; LORIMER, 1994; ADAME et al., 2008), na floresta Amazônica é uma questão em aberto e pode ser muito mais complexa devido à multiplicidade de condições de crescimento, aliada a dificuldades de obtenção de dados adequados, para modelagem do crescimento.

### **1.1 Justificativa e enquadramento do estudo**

O entendimento da influência do ambiente no crescimento, refletido por variações no tamanho e na forma das árvores, bem como o comportamento passado da taxa de crescimento são essenciais para a execução de planos de manejo florestal. Tal entendimento auxilia na prescrição de práticas de manejo facilitando a avaliação dos seus efeitos sobre a sustentabilidade das florestas nativas.

A técnica de dendrocronologia viabiliza a consecução dos objetivos de estudo do crescimento propostos neste trabalho: fornecer informação para o manejo florestal e definir a taxa de corte com base no ritmo de crescimento das árvores, cuja magnitude é influenciada por fatores que compõem o sítio florestal.

Dentre os resultados a serem alcançados destacam-se, por sua importância, a construção de modelos de crescimento que permitirão descrever o comportamento de cada espécie em função de distintos graus de competição pela luz e prever o comportamento futuro da formação florestal sob diferentes condições de manejo. O

caráter estocástico do modelo desenvolvido permite sua calibração sob diferentes cenários dos dados utilizados na construção do mesmo, o que garante sua grande utilidade para estimar a ocorrência e simular o crescimento das espécies aqui tratadas.

## 1.2 Objetivo geral

O objetivo dessa pesquisa foi verificar o crescimento periódico em área basal de quatro espécies importantes para a indústria madeireira do estado do Acre: (i) *Cedrela odorata* (ii) *Amburana cearensis* (iii) *Copaifera paupera* (iv) *Swietenia macrophylla*.

## 1.3 Objetivos específicos

Especificamente, o alvo da pesquisa foi verificar:

- i) De que forma as características próprias da árvore como *status* competitivo, posição social, tamanho e a carga de lianas na copa explicam a variação da taxa de incremento periódico anual em área basal entre as espécies. Os resultados foram utilizados para construir um modelo matemático para estimar o incremento periódico anual em área basal como ferramenta de apoio para avaliar as opções de manejo florestal dessas espécies;
- ii) Em qual densidade de árvores competidoras o incremento periódico anual em área basal decresce de forma significativa. Esse resultado apoiaria o manejador interessado em maximizar o incremento em área basal das árvores objeto;
- iii) A eficiência do crescimento entre as espécies dado o espaço disponível para o crescimento.

Estas análises permitirão determinar como uma árvore deve ser conduzida (características próprias da árvore) para alcançar boas taxas de crescimento, contribuindo para a tomada de decisão silvicultural.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Manejo florestal

Recentemente, houve considerável aumento no número de áreas de produção de madeira exploradas legalmente e com certificação florestal na área da Amazônia Legal. Aparentemente, o alto valor da madeira serrada de espécies tropicais tem levado ao aumento pela demanda por Planos de Manejo Florestal Sustentável na Amazônia. No estado do Acre, por exemplo, 70 projetos para execução de manejo florestal foram licenciados até o ano de 2010 (FIGURA 1). Isto resultou num volume autorizado para extração de 755.924,77 m<sup>3</sup> de madeira em tora, 44% a mais do que o autorizado em 2009 (IMAC, 2010).

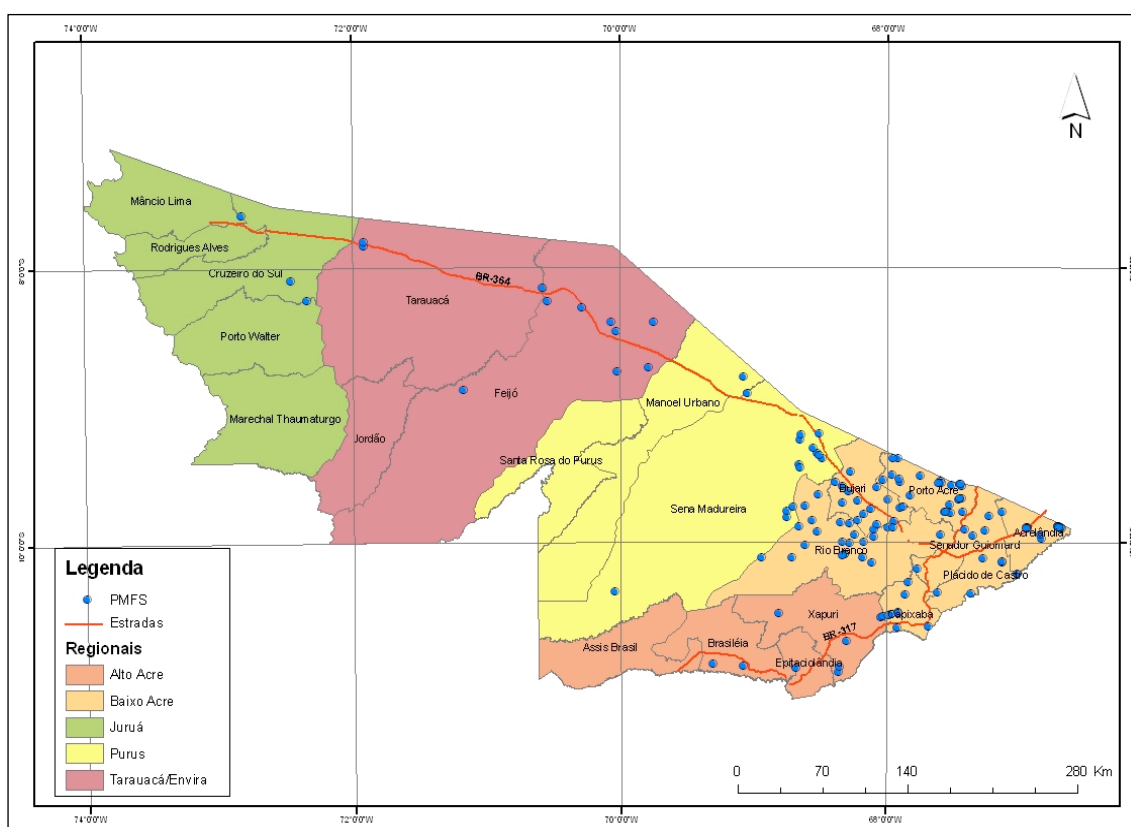


FIGURA 1 - Planos de manejo florestal sustentável (PMFS) licenciados no Estado do Acre no período de 2007 a 2010. Extraído na íntegra de IMAC (2010).



Essa tendência associada à exploração em locais estratégicos representa uma mudança de paradigma para o setor florestal na região Amazônica (SABOGAL et al., 2006). Um exemplo é o da Bolívia que comemorou um feito importante no manejo de suas florestas: cerca de 2,2 milhões de hectares de floresta tropical foram certificados elevando o país a líder mundial em manejo e certificação de bosques naturais tropicais (SUPERINTENDENCIA FORESTAL, 1999).

Entretanto, existem expectativas sobre a capacidade de gerenciamento das concessões florestais e, sobretudo, grande incerteza em questões técnicas de compatibilidade entre o crescimento das florestas exploradas e a duração do ciclo de corte que atualmente é de, no mínimo 25, e máximo 35 anos para PMFS pleno (VERISSIMO et al., 2003; Instrução Normativa 5/2006).

Na verdade, as regiões tropicais ainda não vivenciaram a implementação e o sucesso da prática florestal sustentável em grande escala, em decorrência das escassas informações sobre o rendimento da floresta pós-corte e da insegurança na viabilidade econômica.

O quesito insegurança requer a prognose da produção florestal baseada em modelos de crescimento, recrutamento e mortalidade e orientado em sistemas ecológicos, garante informações sobre a produção de madeira tanto em florestas equiâneas como em florestas tropicais (VANCLAY, 1994). Entretanto, o mesmo quesito preconiza no setor madeireiro da floresta Amazônica, devido à escassa informação do crescimento e a incerteza sobre a sustentabilidade dos empreendimentos estabelecidos.

Sob o contexto de sustentabilidade da produção de madeira, Sterba (2001) enfatizou três pontos fundamentais para garantir a sustentabilidade: avaliação do estoque disponível, conhecimento das taxas de crescimento e da capacidade de regeneração natural da espécie explorada. Adicionalmente, Silva et al. (1995) mencionaram que explorar mais do que a floresta produz num determinado período conduz à exaustão, ao passo que retirar menos causa a subutilização dos recursos e pode conduzir a uma superpopulação e, conseqüentemente, à estagnação da floresta.

## 2.2 Crescimento das árvores

A variação do crescimento de uma árvore é uma expressão da idade e de seu tamanho; de fatores ambientais relacionados com o clima e com o microclima; de distúrbios exógenos ao longo da vida do povoamento e da variação anual não explicada (NOWACKI; ABRAMS, 1997). Em floresta densa, como a tropical, parte da variação do crescimento em diâmetro pode ser atribuída a distúrbios no dossel (p.e. aberturas de clareiras) o que se reflete na competição no espaço de crescimento e no tamanho da árvore (POORTER; BONGERS, 1993).

Os distúrbios exógenos: temperatura, precipitação, vento, insolação e nutrientes, características edáficas (físicas, químicas e biológicas), topográficas (inclinação, altitude e exposição) são variáveis que afetam o crescimento em conjunto e que, por esta razão, não são consideradas na modelagem do crescimento individual. Variáveis de competição, por exemplo, a influência de árvores vizinhas e a densidade do povoamento, constituem fatores importantes no crescimento em nível de indivíduo.

Todos esses fatores são responsáveis pelo aumento de dimensões de um ou mais indivíduos em uma floresta em determinado período de tempo, o qual está influenciado pelas características da espécie (VANCLAY, 1994; PRODAN et al., 1997).

### 2.2.1 Modelagem do crescimento florestal

A modelagem é um tema envolvente e busca prognosticar o crescimento, para as variáveis dendrométricas em função de uma série de variáveis quantificadas no povoamento florestal, por meio da análise de regressão (ZEIDE, 1993).

Um método clássico de descrição dos dados de crescimento é a classificação de sítio que, embora seja difícil em floresta natural devido à idade ser desconhecida e à grande mistura de espécies e variação de dimensões, alternativamente, alguns métodos foram utilizados com sucesso, dentre os quais a distribuição exponencial (PRODAN et al., 1997) gerada por um modelo matemático proposto por Meyer (1933).

O ajuste de uma função para descrever o crescimento pode ser realizado por uma grande variedade de modelos matemáticos lineares e/ou não lineares com base em determinadas distribuições de probabilidades. Os modelos não lineares, por exemplo, o de crescimento proposto por Richards (1959), apresentavam dificuldades para o ajuste devido à complexidade e à quantidade de cálculo iterativo, mas se popularizaram atualmente com a implementação dos algoritmos em *softwares* computacionais específicos e avançados.

Analisar e descrever a influência que uma ou mais variáveis preditoras medidas em uma árvore ou em uma massa delas, requer a utilização de modelos matemáticos de regressão. Estes modelos são, sobretudo, sistemas de equações matemáticas que permitem a predição do crescimento e a produção de um povoamento, mediante duas características importantes: precisão e flexibilidade (TOMÉ, 1991).

Um modelo pode ser expresso de forma verbal, como, por exemplo, uma descrição, ou de forma material (como em uma tabela de produção; LOPES, 2001). O modelo matemático é semelhante a um modelo verbal, mas utiliza uma linguagem matemática para representar um determinado aspecto da realidade, mais exata e menos ambígua que a linguagem verbal.

De acordo com a construção, os modelos de crescimento de árvores podem ser biológicos ou empíricos. O modelo biológico, embora propicie uma boa análise do crescimento com interpretação biológica das variáveis independentes, por ser complexo, é de difícil ajuste e manuseio. Por este motivo, os modelos empíricos são mais empregados por serem menos complexos e propiciarem estimativas confiáveis do crescimento e da produção (SCOLFORO, 1998).

Muitos modelos têm sido propostos para descrever o crescimento das árvores; normalmente um para cada objetivo de estudo. Assim, há modelos que permitem simular a dinâmica de um povoamento, de modo a prever a produção ao longo do tempo, sob hipóteses de exploração alternativas ou sujeitas a agentes físicos e bióticos distintos (TOMÉ, 1991). Neste conceito, Kiviste (1988) descreveu 75 modelos de crescimento embora somente alguns tenham sido usualmente testados e nenhum modelo biológico descreveu todo o processo de crescimento.

Um modelo biológico de grande difusão na área florestal é o de Richards (1959), também conhecido como Chapman e Richards. Este modelo não linear

apresenta como vantagem a possibilidade da interpretação lógica de seus parâmetros, além de ser bastante flexível, adaptando-se bem ao desenvolvimento de diferentes variáveis dendrométricas (FINGER, 1992).

Quando se deseja descrever o crescimento em nível de povoamento ou árvore individual, é possível utilizar os modelos de crescimento já elaborados, mediante estudos que comprovem sua eficiência na predição florestal, ou construir um modelo com base em variáveis correlacionadas, como os índices de competição e variáveis que expressam a dinâmica do dossel. Essas variáveis podem variar de negativa (competição) a positiva (facilitação) em que um balanço negativo (competição) é usualmente observado em um povoamento florestal denso. Neste sentido, o *status* competitivo tem mostrado ser uma importante variável na modelagem do crescimento florestal (JOBIDON, 1994; UMEKI, 1995).

Em consequência, uma variedade de índices de competição, espaciais ou não, foram desenvolvidos para estimar o efeito da competição no crescimento de árvores individuais ou de um povoamento (BOIVIN et al., 2010). A maioria deles busca descrever o grau com que o recurso precursor do crescimento de uma árvore pode ser limitado pelo número, tamanho e a proximidade de árvores vizinhas. Daniels et al. (1986), alertaram para esses recursos e sua disponibilidade como luz, água, nutrientes e espaço vital para o crescimento; bem como os processos biológicos envolvidos na competição, pois podem tornar-se muito mais complexos do que pode descrever um simples índice matemático.

Por esta razão, Boivin et al. (2010) recomendaram utilizar índices de competição dependentes da distância como melhores preditores do crescimento, apesar de que o poder preditor similar para os dois tipos é frequentemente observado em povoamentos de densidade uniforme.

### **2.3 Anéis de crescimento em árvores tropicais**

Um desafio fundamental para quantificar o crescimento anual a partir de anéis de crescimento em árvores tropicais é que, para a maioria das espécies, não existe comprovação da formação de anéis anuais de crescimento o que tornaria inviáveis estudos que associaram o crescimento à idade das árvores.

Acreditava-se que os anéis de crescimento anual não eram produzidos por espécies tropicais (BORMANN; BERLYN, 1981), exceto em circunstâncias especiais em floresta periodicamente inundada (WORBES et al., 1992). Devido a isso, dados fiéis de crescimento somente podem ser adquiridos por meio de medições repetidas em parcelas permanentes (CLARK; CLARK, 1999), enquanto a dendrocronologia ficaria restrita a espécies de regiões temperadas. Nesta linha, Fritts (1976) descreveu a maioria das cronologias com anéis de crescimento criadas especialmente para espécies de árvores que crescem em regiões com uma forte sazonalidade do clima.

Nesse sentido, muitas investigações microscópicas foram realizadas para determinar a existência e a periodicidade dos anéis de crescimento das árvores tropicais. Por isso, Barnett (1992) e Catesson (1994) descreveram a inter/intravariação anual na madeira de muitas espécies e encontraram correlação com fatores climáticos, principalmente com a temperatura (DENNE, 1971; BRIFFA et al., 1990) e com a precipitação (HUGHES et al., 1994). Em consequência, a análise dos anéis de crescimento pode ser bem sucedida para sítios com forte variação dos parâmetros meteorológicos (KIENAST et al., 1987).

Em decorrência da falta de sazonalidade do clima no trópico úmido, o emprego da análise de anéis de crescimento em árvores tropicais tem sido questionado há muitos anos, embora o pioneiro das investigações tenha indicado um padrão regular de formação de madeira em algumas espécies arbóreas tropicais (COSTER, 1927).

Por outro lado, durante a última década ficou claro que anéis anuais de crescimento são formados em muitas árvores de floresta tropicais (WORBES, 1999; FICHTLER et al., 2004; BRIENEN; ZUIDEMA, 2005), provendo uma oportunidade para estudar o padrão do crescimento de um modo direto e mais seguro.

Ainda assim, alguns autores defendem a tese de que os anéis de crescimento geralmente são interpretados como valores duvidosos nas estimativas das taxas de crescimento e idades em árvores tropicais em ambientes de clima não sazonais, pois, teoricamente, nesses ambientes, as árvores não formariam os anéis de crescimento (LANG; KNIGHT, 1983; REICH; BORCHET, 1984; LIEBERMAN; LIEBERMAN, 1985).

Em estudos dendrocronológicos de Teca (*Tectona grandis*), crescendo sob a monção asiática, ficou demonstrado que a formação de madeira está relacionada

com precipitação sazonal permitindo a elaboração de cronologias com anéis de crescimento da árvore, com aplicações históricas de clima e estudos ecológicos (PUMIJUMNONG et al., 1995).

O padrão anual de anéis para árvores tropicais também foi relatado em inundações da bacia amazônica por Worbes e Junk (1989), em floresta de pântano na Mata Atlântica e também em alguns sítios de "terra firme" por Mariaux (1967); Détienne (1989); Breitspecher e Bethel (1990) e Worbes (1999).

Dünisch et al. (2002a) estudaram a atividade cambial de duas espécies tropicais, o mogno (*Swietenia macrophylla* King) e o cedro (*Cedrela odorata* L.), em florestas plantadas e naturais na cidade de Manaus e no norte do Mato Grosso, Brasil, comprovando a formação de anéis de crescimento para o cedro tanto em madeira juvenil como em adulta, enquanto para o mogno, a anualidade foi restrita à madeira adulta. Esses mesmos autores em estudo com Andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.) também verificaram, como para o mogno, que não ocorria a formação de anéis de crescimento anuais em madeira juvenil, sendo essa atividade restrita à madeira adulta.

Em outra investigação, Dünisch et al. (2003) monitoraram a atividade cambial em árvores dominantes de cedro (*Cedrela odorata*) no norte do Mato Grosso, Brasil, utilizando cintas dendrométricas e perceberam que a formação de camadas de crescimento ocorria em um período de, aproximadamente, 12 meses concluindo que a espécie apresenta potencial para estudos de anéis de crescimento.

Brienen e Zuidema (2003) realizaram uma revisão bibliográfica sobre o padrão de crescimento para 32 espécies madeiráveis bolivianas em que consta que o cedro (*Cedrela odorata*) tem bom potencial e não apresenta nenhuma dificuldade para o estudo de anéis de crescimento, com anéis bem distinguíveis uns dos outros, separados por bandas de parênquima terminal e diferentes distribuições dos vasos intra-anuais.

De fato, a controvérsia sobre a anualidade ou não da formação dos anéis de crescimento em árvores tropicais e subtropicais pode ser um fator secundário no manejo florestal dessas áreas. Finger (2010), em notas da disciplina de crescimento e produção florestal, baseia-se no fato que, nestas florestas, não há uma única idade, mas árvores desde a fase juvenil à senil, de diferentes espécies, crescendo lado a lado, podendo-se modelar o crescimento, com precisão suficiente, ao se

adotar como variável independente uma escala dimensional em vez da escala temporal da idade; não havendo, neste caso, mais importância se um anel de crescimento tenha se formado em 10 ou 12 meses. Nestes modelos, o efeito da competição sobre a forma e dimensão da copa e as dimensões da árvore objeto adquirem especial importância na descrição da variabilidade das taxas de crescimento. O autor justifica o uso do incremento periódico, obtido por dendrocronologia, pois dilui possíveis erros de estimativa, corrige a flutuação do crescimento intra-anual decorrente das condições ambientais e pode, com segurança, ser associado às variáveis dendrométricas e morfométricas da copa, bem como aos índices de competição em procedimentos de modelagem.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção, descreveram-se as áreas utilizadas para a coleta de dados apresentando as variáveis coletadas e os recursos matemáticos utilizados para avaliar relações com o crescimento periódico das essências florestais propostas na pesquisa.

#### 3.1 Área de estudo e espécies avaliadas

O estudo foi conduzido no noroeste da Amazônia Brasileira, no Estado do Acre, Brasil. Para o levantamento dos dados, foram selecionadas quatro Unidades de Produção Anual (UPA) de Planos de Manejo Florestal Sustentável Empresarial (Figura 2), considerando a facilidade de acesso à floresta, perfazendo uma área total das UPAs de 4657 ha.

A floresta da região é semidecídua dominada por espécies com relevante valor econômico para indústria madeireira e não madeireira como a castanheira (*Bertholletia excelsa*) pela extração da castanha; seringueira (*Hevea brasiliensis*) pela extração do látex, ambas bioindicadoras de bosque amazônico de terra firme.

A floresta amostrada apresentou área basal média de 29,8 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup> e um dossel de 30-35 metros com árvores emergentes alcançando 45 metros e diâmetro a altura do peito de 2 metros.

O clima é característico amazônico, com precipitação média anual entre 1800 e 2000 mm.ano<sup>-1</sup> e temperatura média anual de 26°C (SOMBROEK, 2001). Nos meses de outubro a abril comumente ocorrem chuvas torrenciais, contrastando com a estação seca que ocorre durante os meses de junho, julho e agosto, quando, usualmente, chove menos que 50 mm por mês (SOMBROEK, 2001).

De acordo com as coordenadas de cada UPA e com o mapa pedológico do Estado do Acre (ACRE, 2006) foi possível reconhecer o tipo de solo predominante em cada área amostrada (Quadro 1).



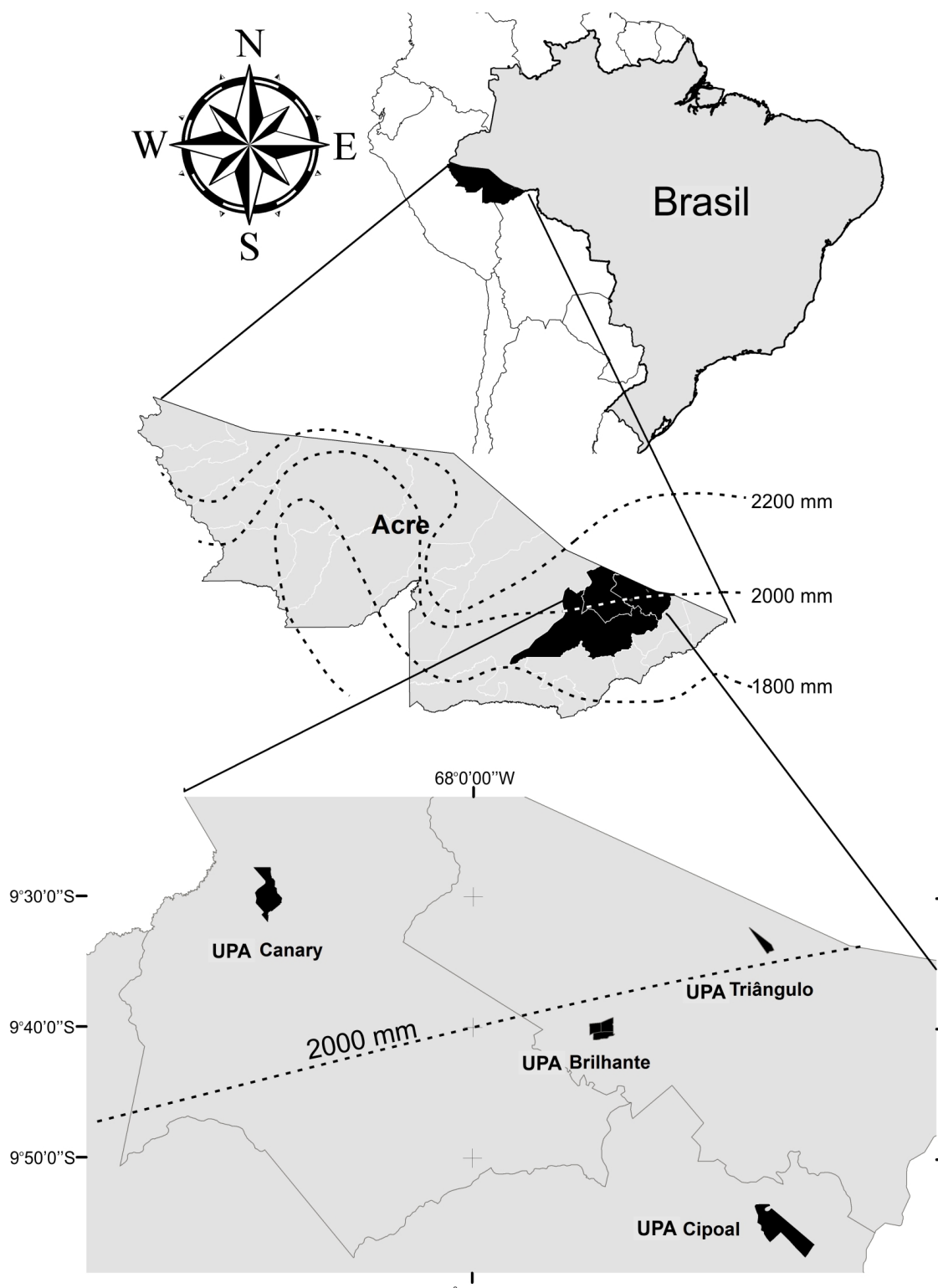


FIGURA 2 - Mapa de localização das Unidades de Produção Anual (UPA). As Isoietas foram obtidas de Sombroek (2001).

QUADRO 1 - Solos predominantes das áreas de amostragem (UPAs) do estudo. Fonte: Acre (2006).

Fazenda (UPA)	Tipo de solo
Brilhante	Plintossolo Háptico Distrófico típico
Cipoal	Plintossolo Háptico Distrófico típico
Canary	Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico plíntico
Triângulo	Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico alumínico

As quatro essências florestais escolhidas para este estudo foram: *Amburana cearensis* A. C. Smith (Cerejeira); *Cedrela odorata* L. (Cedro); *Copaifera paupera* (Herzog) Dwyer (Copaíba) e *Swietenia macrophylla* King (Mogno) (ver Tabela 1). Cedro, cerejeira e mogno constituem o grupo de madeiras valiosas atualmente comercializadas para diversos países. Entretanto, instruções normativas específicas para a extração de mogno são aplicadas (IBAMA/Instrução Normativa 7/2003).

Comumente conhecida como “copaíba”, *C. paupera* é frequentemente encontrada no dossel da floresta primária (NEWTON et al., 2012) apresentando madeira de boa qualidade e durabilidade natural. As espécies do gênero ocorrentes na Amazônia Brasileira produzem um óleo-resina com propriedades terapêuticas e é amplamente comercializado na região.

As árvores de cedro e mogno ficam totalmente despidas de folhas durante a estação seca e produzem novas folhas a partir de Outubro-Novembro (observações pessoais). Anéis de crescimento anuais são encontrados na madeira de cedro, cerejeira e mogno (Figura 3), cuja ocorrência foi comprovada por pesquisas anteriores como as de Worbes (1995), Dünisch et al. (2003) e Brien e Zuidema (2005).

TABELA 1 - Sumário de informações das espécies estudadas nas quatro UPA.

Atributo	Espécies estudadas			
	<i>Cedrela odorata</i>	<i>Amburana cearensis</i>	<i>Copaifera palpera</i> <sup>a</sup>	<i>Swietenia macrophylla</i>
Tolerância ao sombreamento	Intermediária <sup>c</sup>	Intermediária <sup>c</sup>	Não tolera	Não tolera <sup>b</sup>
Status sucessional	Pioneira de vida longa <sup>d</sup>	Pioneira de vida longa	Clímax	Pioneira de vida longa <sup>b</sup>
Estatura quando adulta	Dossel <sup>ef</sup>	Dossel <sup>f</sup>	Emergente	Dossel <sup>f</sup>
Densidade básica da madeira (gr/cm <sup>3</sup> ) <sup>g</sup>	0.39	0.47	0.62	0.52
Densidade (arv.ha <sup>-1</sup> ) <sup>h</sup>	0.55	0.25	0.16	0.03
% do total de árvores <sup>i</sup>	3,0	1,2	0,8	0,2
% do total da área basal <sup>i</sup>	3,5	1,4	1,7	0,6

<sup>a</sup>= reconhecida e descrita em Martins-da-Silva et al. (2008) como de ocorrência no Estado do Acre; <sup>b</sup>= Mostacedo e Fredericksen (1999) necessário para o estabelecimento e sucesso da regeneração; <sup>c</sup>=Poorter (1999); <sup>d</sup>=Griscom e Ashton (2011); <sup>e</sup>=van Rheenen et al. (2004). <sup>f</sup>=Brienen e Zuidema (2005); <sup>g</sup>=Base de dados do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais – IBAMA; <sup>h</sup>=densidade considerando d acima de 30 cm; <sup>i</sup>=valores médios calculado em base ao inventário florestal de reconhecimento das quatro áreas investigadas.

### 3.2 Levantamento dos dados

Com base nos dados do inventário florestal realizado previamente nas UPA, foram amostradas árvores de cada espécie a partir de 10 cm de diâmetro a altura do peito. Para fins de controle na amostragem, considerou-se a medição de, no mínimo três árvores objeto, em cada classe de diâmetro. Estas classes consideravam intervalos de 20 cm, a partir do diâmetro mínimo de 10 cm, sendo na última classe consideradas árvores maiores que 110 cm. A variação na intensidade de amostragem dentro de cada espécie reflete a frequência da mesma na população.

Esta metodologia orientou a amostragem das árvores objeto (doravante referidas pelo nome genérico) e possibilitou a inclusão de uma gama de fases de desenvolvimentos das mesmas, assegurando que se pudesse verificar se a variação do crescimento estaria relacionada ao tamanho da árvore e a diferentes situações de competição.

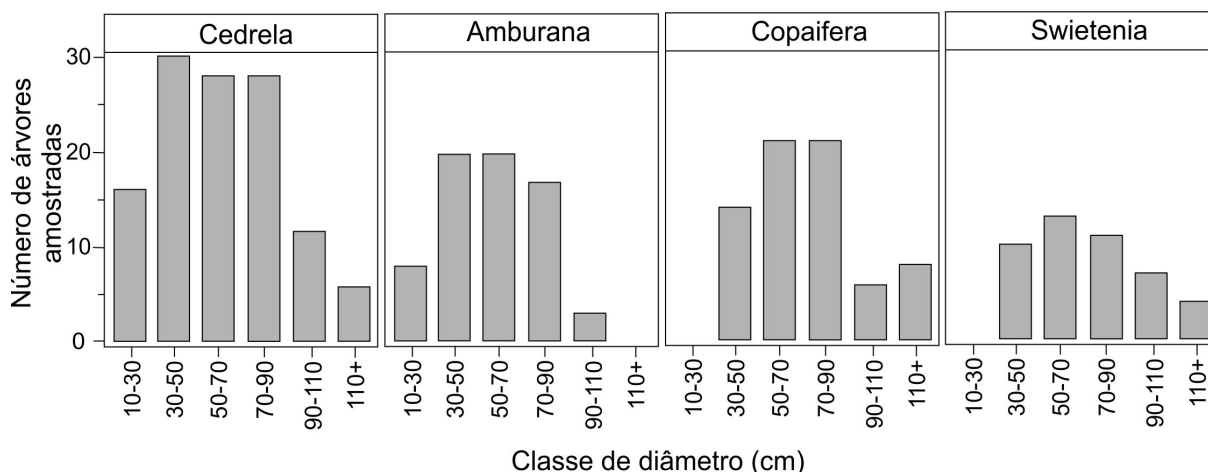


FIGURA 3 - Número de indivíduos amostrados, segregados por classe de diâmetro.

Entretanto, devido ao fato de que a distribuição diamétrica varia entre as espécies, ocorreu a escassez de indivíduos de pequeno porte em *Copaifera* e *Swietenia* (FIGURA 3). A ausência de árvores amostradas nestas classes de dimensão resulta da dinâmica da regeneração natural e de recrutamento das espécies e não foi analisada nesta pesquisa.

Cada árvore foi localizada dentro da floresta por apropriação de coordenadas UTM (obtidas do mapa base do plano de exploração florestal da empresa) utilizando GPS de alta sensibilidade com tecnologia Sirf Star III.

### 3.2.1 Covariáveis relacionadas ao crescimento

Em cada árvore objeto foi medida uma série de variáveis que expressam o tamanho da árvore (ver FIGURA 4), a exposição da copa à luz e a carga de lianas na copa:

- ✓ Diâmetro a altura do peito ( $d$ , cm): Medido com fita diamétrica, em centímetros, a uma altura de 1,3 metros do nível do solo. Quando da presença de raízes tabulares (comumente observado em árvores de *Cedrela* e *Swietenia*) o diâmetro da árvore foi medido 1 metro acima da sapopema (DAS, cm);
- ✓ Altura total ( $h$ , m) e a altura até a base da copa ( $hbc$ , m) utilizando hipsômetro Vertex III (Haglöf Sweden AB). O comprimento de copa ( $cc$ , m) foi calculado pela diferença entre  $h$  e  $hbc$ ;

- ✓ Raio de copa: Oito raios foram medidos ao longo de eixos com ângulos constantes de 45° utilizando bússola Suunto e Vertex III (opção DM). A média aritmética do raio de copa foi obtida para calcular o diâmetro de copa (dc, m) e a área de projeção da copa (APC, m<sup>2</sup>);
- ✓ As condições de luz na copa para cada árvore objeto foram avaliadas utilizando uma classificação de 3 níveis (modificado de Dawkins, 1963) que indicou a exposição da copa à luz solar (IEC): 1=copa recebendo luz vertical e lateral; 2=luz total de cima e lateral sombreada; 3=copa sem recebimento de luz direta (ver FIGURA 7);
- ✓ Carga de lianas na copa quantificada em três níveis designando Liana1 para árvores livres ou com <50% de lianas na copa; Liana2 para árvores com 50 a 75% da copa coberta por lianas e Liana3 para árvores com 75% ou mais da copa coberta por lianas.

O IEC apresenta boa correlação com a abertura do dossel (DAVIES et al., 1998), entretanto, a mesma não pode ser relacionada com a classificação do estrato arbóreo, pois uma árvore pequena, comumente encontrada abaixo do nível do dossel, pode receber luz vertical e lateral (IEC 1), condição classificada como árvore emergente. O IEC com três categorias propiciou avaliações mais consistentes a campo do que com 4 ou 7 categorias propostas originalmente por Dawkins (1963) e Clark e Clark (1992), respectivamente. Além disso, resultados anteriores demonstraram não haver diferença na taxa de crescimento entre categorias de posição social próximas (p.e. da CUNHA, 2009; WADSWORTH et al., 2010).

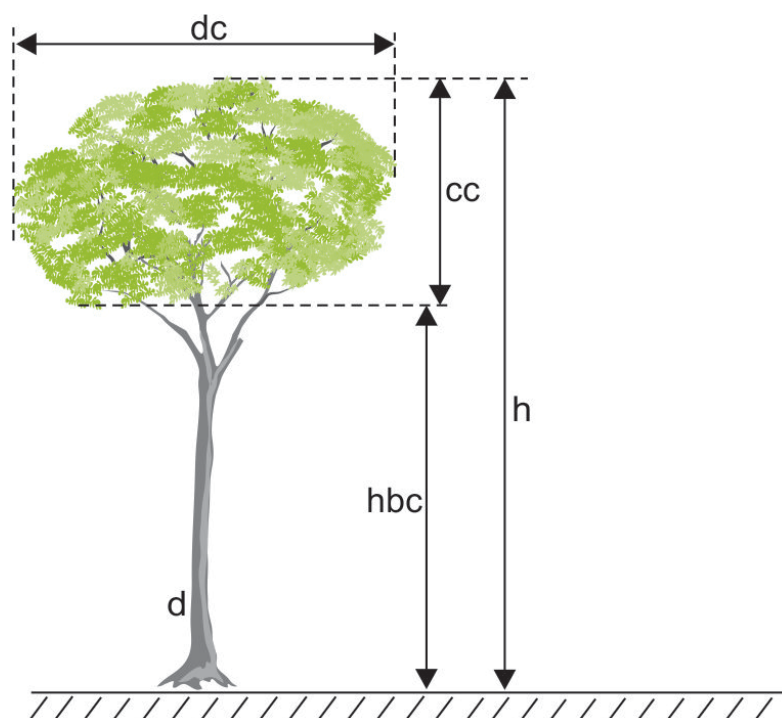
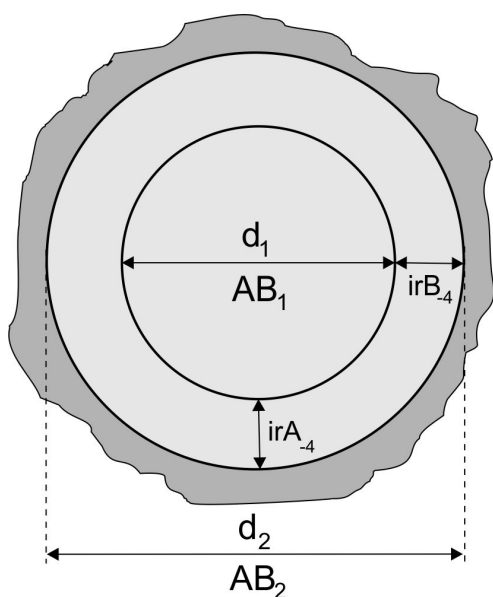


FIGURA 4 - Modelo esquemático utilizado para a medição de variáveis de tamanho das árvores objeto:  $d$ =diâmetro a altura do peito;  $h$ -altura total;  $hbc$ =altura na base da copa;  $cc$ =comprimento da copa;  $dc$ =diâmetro da copa.

### 3.2.2 Incremento periódico anual em área basal (IPAg)

O incremento periódico anual em área basal (IPAg) foi utilizado para descrever o crescimento das espécies avaliadas em função de covariáveis anteriormente definidas na seção 3.2.1. A decisão em modelar o crescimento em área basal, em vez do diâmetro, pode ser justificada pelo fato de que ambas as unidades de engrossamento estão matematicamente relacionadas entre si, pois uma dimensão, área basal, deriva de outra e nenhuma causa diferença na acurácia em ajuste (WEST, 1995). Além disso, qualquer diferença observada entre as duas está atribuída à estrutura do erro (VANCLAY, 1994).

Os dados de IPAg para cada árvore objeto foram obtidos a partir de dois rolos de incremento (10 cm de comprimento e 5,15 mm de diâmetro) extraídos radialmente de cada árvore no diâmetro a altura do peito com trado Pressler. Assumiu-se que o comprimento de 10 cm do rolo de incremento seria o bastante para conter, no mínimo, os últimos cinco anéis de crescimento. Em árvores com raízes tabulares, os rolos foram extraídos a 30 cm acima delas (ver foto no Apêndice 1) para prevenir super/subestimação na taxa de crescimento (p.e. METCALF et al., 2009).



$$IPAg = \frac{\left[ \frac{\pi}{4} \cdot (2d_1 \cdot i_d + i_d^2) \right]}{4} \quad (1)$$

∴

$$d_1 = d_2 - i_d$$

$$i_d = irA_{-4} + irB_{-4}$$

$$IPAg\% = \left( \frac{IPAg}{AB_1} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

FIGURA 5 - Ilustração e fórmulas para o cálculo do incremento periódico anual em área basal. IPAg=incremento periódico anual em área basal (cm<sup>2</sup>.ano<sup>-1</sup>); d<sub>1</sub>=diâmetro reconstruído utilizando os quatro últimos anéis de crescimento completos; d<sub>2</sub>=diâmetro sem casca; i<sub>d</sub>=incremento periódico em diâmetro; AB=área basal.

Os anéis de crescimento foram delimitados e visualmente cruzados seguindo a metodologia proposta por Stokes e Smiley (1996). A Figura 5 mostra os anéis de crescimento com descrição anatômica para cada espécie.

Em cada árvore objeto, o incremento radial dos últimos quatro anos foi medido nas duas baguetas (irA<sub>-4</sub> e irB<sub>-4</sub>), utilizando mesa micrométrica LINTAB II (Frank Rinn S.A. Heidelberg, Alemanha) e *software* TSAP-Win (RINN, 2003) para registro dos dados.

A partir do incremento radial, reconstruiu-se o diâmetro inicial de quatro anos anteriores (d<sub>1</sub>) para calcular o incremento periódico anual em área basal (IPAg; cm<sup>2</sup>.ano<sup>-1</sup>), utilizando a Expressão 1.

Da Expressão 1 deduz-se que o incremento em área basal depende não somente da área incrementada, mas também do diâmetro inicial (d<sub>1</sub>) da árvore na qual o incremento ocorreu, o que explica o ponto máximo do incremento em diâmetro ser alcançado em menor tempo quando comparado ao ponto máximo área basal (cf. ASSMANN, 1970).



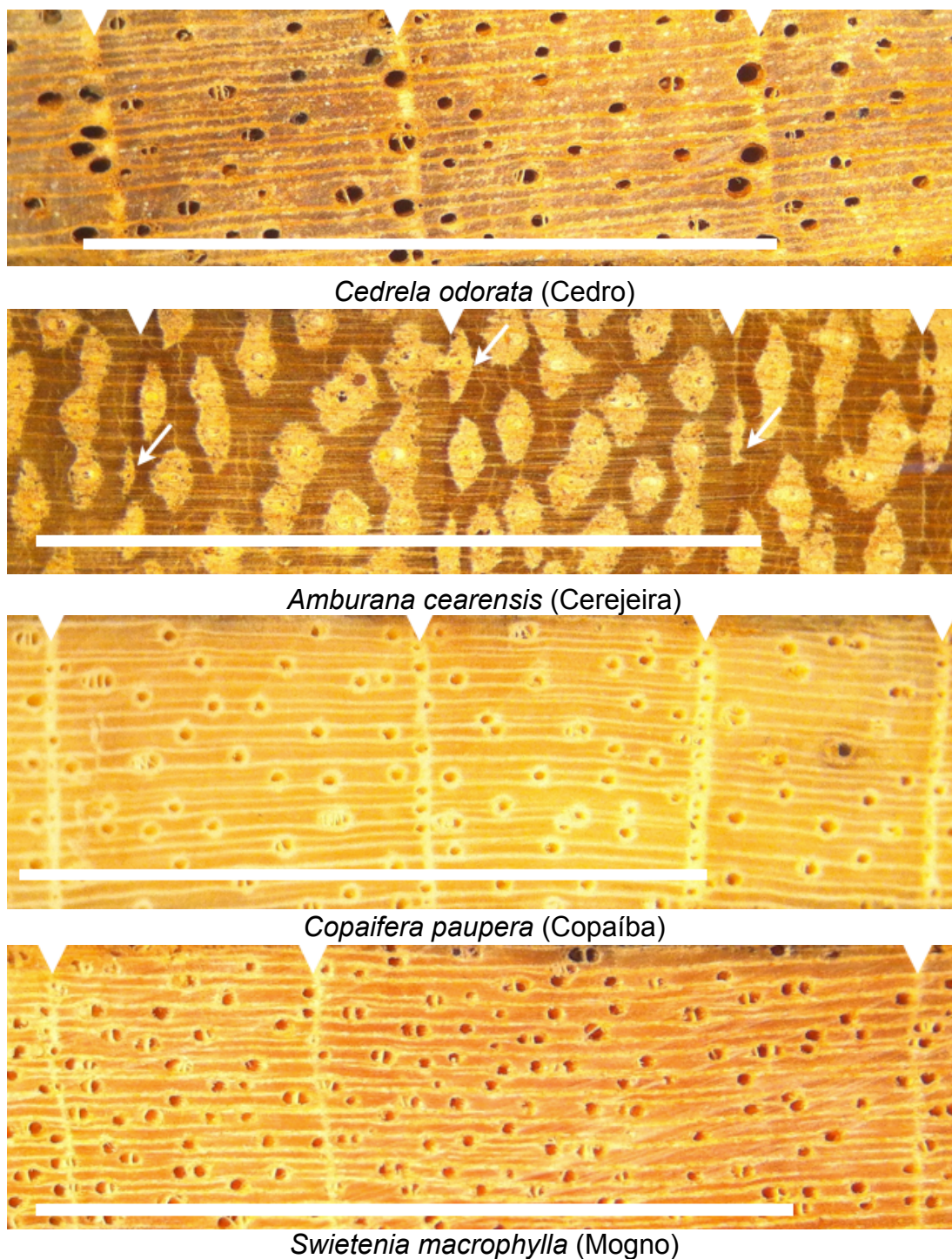


FIGURA 6 - Macrofotografia da anatomia da madeira com delimitação dos anéis de crescimento (cavas) das espécies estudadas. Comprimento da barra horizontal=10 mm.

Para a medição da largura dos anéis, fez-se inicialmente o reconhecimento anatômico intra-anual da madeira em cada espécie. A Figura 6 evidencia que em *Cedrela* ocorrem poros de maior diâmetro tangencial no lenho inicial com gradativa diminuição do diâmetro no lenho tardio (porosidade marginal). Em *Amburana*,



bandas de fibras (parênquima paratraqueal aliforme e confluyente) ocorrem, sem vasos, no início da estação de crescimento tornando-se achatada com a dormência cambial (seta). A *Copaifera* apresenta parênquima axial em faixas marginais que contêm canais axiais secretores do óleo-resina no lenho tardio que delimita os anéis de crescimento (ver foto, Apêndice 2) e os anéis em *Swietenia* difere de *Cedrela* pela ausência de porosidade marginal.

### 3.2.3 Produtividade em área basal (IPAg%)

A produtividade (incremento percentual) para cada árvore objeto foi calculada pelo quociente entre o incremento periódico anual em área basal (IPAg) e a área basal inicial ( $AB_1$ , Expressão 2). Essa medida expressou quanta madeira produz uma árvore em relação à área basal inicial ( $AB_1$ ) em termo relativo e, portanto, possibilitou projetar a área basal futuro em um tempo de passagem ( $t$ ) para uma árvore com diâmetro de 30 cm alcançar o diâmetro mínimo de corte (DMC) de 50 cm baseado na teoria relativa de que o crescimento de uma árvore acumula-se seguindo a lei dos juros compostos (SCHNEIDER; SCHNEIDER, 2008).

Para tal, a variável IPAg% (em unidade centesimal) foi considerada como a taxa de acréscimo na expressão 3. Nessa expressão, o tempo de passagem ( $t$ ) foi isolado utilizando propriedades logarítmicas que originou a expressão 4. Assim, com a área basal para um diâmetro inicial de 30 cm ( $g_{inicial}$ ) e a área basal para o diâmetro DMC ( $g_{final}$ ) de 50 cm calculou-se o tempo de passagem (p.e. WADSWORTH et al., 2010).

$$g_{final} = (1 + IPAg\%)^t \cdot g_{inicial} \quad (3)$$

$$t = \frac{\ln(g_{final}) - \ln(g_{inicial})}{\ln(1 + IPAg\%)} \quad (4)$$

### 3.2.4 Incremento por área de copa (Eficiência da copa)

Para gerar informações sobre a *performance* do crescimento para diferentes posições sociais da copa (IEC) calculou-se a eficiência da copa (EC) definida como

o incremento periódico anual em área basal por área de projeção da copa (IPAg/ APC). Esse índice informou o quanto as árvores produzem de incremento em área basal dado o espaço de crescimento ocupado pela sua área de copa (p.e. ASSMANN, 1970; DURLO, 1997; STERBA; AMATEIS, 1998).

Devido a que a EC descreve-se sob uma tendência exponencial negativa (p.e. da CUNHA, 2009), ajustou-se o modelo não linear da Expressão 5 para descrever o comportamento da EC em função da APC por mínimos quadrados ordinários. Este modelo possui um coeficiente exponencial negativo ( $-\beta_1$ ) que representa a força da dependência da EC com o aumento da APC, portanto, quanto menor seu valor maior será a taxa de decréscimo da EC com o aumento da área de projeção da copa das árvores. A Expressão 5 foi ajustada para cada espécie.

$$EC = \frac{IPA_g}{APC} = \beta_0 \cdot e^{-\beta_1 \cdot APC} \quad (5)$$

Onde:  $\beta_0$ =intercepto;  $\beta_1$ =coeficiente que controla a inflexão da curva.

Justifica-se o uso do Modelo 5 pelo comportamento exponencial decrescente da EC em função da área de copa.

Sterba e Amateis (1998) mencionam que o período considerado para obter o incremento em área basal deve ser curto o suficiente para razoavelmente relacionar o incremento às variáveis de tamanho da árvore as quais provavelmente produziram esse incremento. Os valores médios e amplitudes de variação das covariáveis e do crescimento estão apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 - Valores médios, mínimo e máximo das variáveis dendrométricas coletadas por espécie.

Variáveis	Espécies estudadas			
	<i>Cedrela odorata</i>	<i>Amburana cearensis</i>	<i>Copaifera palpera</i> <sup>a</sup>	<i>Swietenia macrophylla</i>
Amostragem	108	66	67	43
Diâmetro a altura do peito (d; cm)	60,4 (13,3-132,1)	56,3 (13,2-106,1)	72,6 (36,7-138,7)	72,9 (31,0-123,6)
Altura total (h; m)	28,7 (12,1-49,1)	28,4 (9,1-40,1)	31,5 (20,9-43,8)	27,6 (15,5-39,9)
Comprimento da copa (cc; m)	10,2 (2,9-23,1)	5,9 (1,5-13,2)	7,5 (3,2-14,7)	7,7 (3,9-14,1)
Diâmetro da copa (dc; m)	14,5 (2,9-33,2)	13,3 (4,5-25,2)	20,5 (8,7-36,5)	17,1 (5,4-38,5)
Exposição da copa (EC)	(1-3)	(1-3)	(1-2)	(1-2)
Carga de lianas (Liana)	(1-3)	(1-1)	(1-2)	(1-2)
IPAg	62,9 (8,1-200,8)	45,5 (8,8-127,5)	53,1 (15,1-133,6)	64,9 (17,8-143,1)

<sup>a</sup>= reconhecida e descrita em Martins-da-Silva et al. (2008) como de ocorrência no Estado do Acre.

### 3.3 Quantificação da competição

O *status* de competição para cada árvore objeto foi quantificado utilizando o conceito de competição assimétrica, no qual árvores maiores restringem o crescimento das árvores vizinhas menores (p.e. TOMÉ; BURKHART, 1989; SCHWINNING; WEINER, 1998). Portanto, considerou-se competidor ativo toda árvore vizinha à árvore objeto cuja altura era maior que uma linha de referência inclinada traçada a partir da base da copa da árvore objeto com ângulo de 45° da horizontal (FIGURA 7).

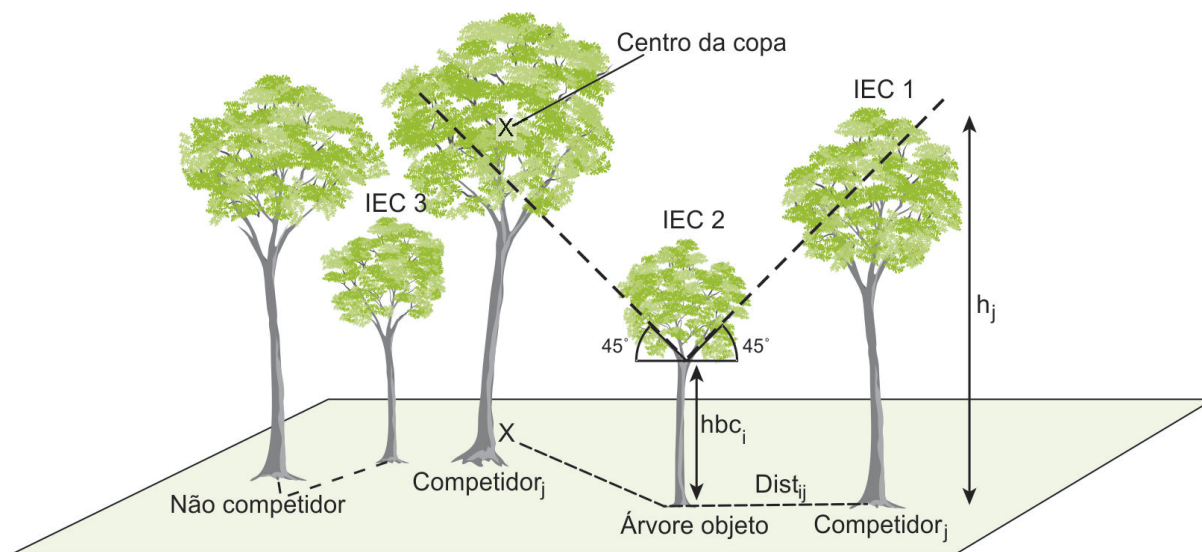


FIGURA 7 - Esquema do critério para a seleção de árvores competidoras. A altura  $h_j$  foi corrigida em situações de inclinação do terreno. IEC1= posição social de forma que a copa receba luz direta vertical e lateral; IEC2=luz total de cima e lateral sombreada; IEC3=copa sem recebimento de luz direta. Árvores competidoras inclinadas, a distância  $Dist_{ij}$  foi considerada a partir do centro da copa da mesma (ponto x) e não a partir da base do tronco.

A aplicação dessa metodologia evita a inclusão de árvores não competidoras, que poderiam “inflacionar” o *status* competitivo (cf. FIGURA 7). Portanto, o método de parcela com raio fixo para medição de árvores competidoras (p.e. CANHAM et al. 2004) foi desconsiderado. Foram feitas anotações do diâmetro a altura do peito ( $d_j$ ), da altura total ( $h_j$ ) e da distância até a árvore competidora ( $Dist_{ij}$ ).

Da Figura 7 se deduz que a relação entre a distância e a altura que determina se uma árvore vizinha é selecionada como competidora é descrita matematicamente pela expressão 6.

$$\operatorname{tg}45^\circ = \frac{h_j - hbc_i}{Dist_{ij}} = 1; \quad \text{Competidor se: } (Dist_{ij} < h_j - hbc_i) \quad (6)$$

Onde:  $hbc_i$  = altura entre a base da árvore e a base da copa, em metros;  $i$  e  $j=i$ -ésima e  $j$ -ésima árvore objeto e competidor, respectivamente.

Assim, a probabilidade de uma árvore vizinha ser uma competidora aumenta com o aumento de seu tamanho, representado pela altura total ( $h_j$ ), e sua proximidade à árvore objeto ( $Dist_{ij}$ ).

### 3.3.1 Quantificação do *status* competitivo

Para quantificar a competição experimentada por cada árvore (*status* competitivo) foram utilizados oito índices de competição baseados no tamanho da árvore (Tabela 3). Os índices assumem a hipótese de que o efeito competitivo de uma árvore vizinha aumenta com o aumento do seu tamanho ( $d$  e  $h$ ) e da proximidade ( $dist_{ij}$ ). De acordo o método de seleção de competidores, árvores sem efeito da competição apresentaram valores zero e não negativos para os índices.

A relação IC1 calcula a influência que uma ou mais árvores competidoras tem sobre a árvore objetivo e a representa por um ângulo vertical o que implica maior competição quanto maior seu valor e menor a distância entre ambas as árvores. Outro índice amplamente utilizado é o IC5 que pondera o cociente de tamanho, obtido entre o diâmetro da árvore objeto com suas competidoras, com a distância entre ambas implicando em um maior grau de competição quanto mais próximos e grande sejam os competidores.

Neste índice, o dobro do diâmetro da competidora acarretará no dobro de competição calculada, e o dobro da distância, desde a árvore objeto, reduzirá o valor do índice em 50%. Disto deduz-se que a influência de cada  $j$ -ésima árvore competidora aumenta com o tamanho ( $d_j$ ) e com a proximidade da árvore objeto.

Neste caso, para o mesmo número e tamanho de vizinhos competidores, grandes árvores objeto estariam associadas com valores pequenos de IC1 e, do contrário, um aumento do valor de IC1 indica aumento do grau pressão sobre a árvore objetivo. Assim, Thorpe et al. (2010) justificam este cenário preditor como consistente, já que o estudo anterior (p.e. CANHAM et al., 2004) estimou o crescimento de uma árvore como uma função da abundância de árvores vizinhas, tamanho e distância até a árvore objetivo.

O índice de Hegyi (1974) IC5 foi modificado pela adição de uma potência de 0,5 no termo da distância o que originou o índice de competição IC6. O expoente acarretou maior redução exponencial do crescimento com o aumento do índice.

TABELA 3 - Índices de competição utilizados.

Índices	Fórmula	Fonte
IC1	$= \sum_{j=1}^n \left[ \arctang \left( \frac{h_j - hbc_i}{Dist_{ij}} \right) \right]$	Modificado de Mitsuda et al. (2002).
IC2	$= \sum_{j=1}^n \left[ \left( \frac{d_j}{d_i} \right) \cdot \arctang \left( \frac{d_j}{Dist_{ij}} \right) \right]$	Rouvinen e Kuuluvainen (1997)
IC3	$= \sum_{j=1}^n \left[ \left( \frac{h_j}{h_i} \right) \cdot \arctang \left( \frac{h_j}{Dist_{ij}} \right) \right]$	
IC4	$= \sum_{j=1}^n \left[ \frac{h_j}{(h_i \cdot Dist_{ij})} \right]$	Onheimb et al. (2011).
IC5	$= \sum_{j=1}^n \left[ \frac{d_j}{(d_i \cdot Dist_{ij})} \right]$	Hegyí (1974).
IC6	$= \sum_{j=1}^n \left[ \frac{d_j}{(d_i \cdot Dist_{ij}^{0.5})} \right]$	Hegyí (1974); p.e. Sabatia e Burkhart (2012).
IC7	$= \sum_{j=1}^n \arctang \left( \frac{h_j}{Dist_{ij}} \right)$	
IC8	$= \sum_{j=1}^n \arctang \left( \frac{d_j}{Dist_{ij}} \right)$	Rouvinen e Kuuluvainen (1997)

Em que: d, h, hbc e Dist é o diâmetro a altura do peito, altura total, altura do tronco até a base da copa e distância horizontal; n=todas as árvores vizinhas interceptadas consideradas competidoras; i e j=i-ésima árvore objetivo e a j-ésima árvore competidora.

### 3.3.2 Densidade ótima para o crescimento em área basal

Objetivando determinar qual a densidade que o incremento em área basal foi negativamente afetado, a área basal das árvores competidoras, ao redor de cada árvore objeto, foi calculada sendo expressa por unidade de hectare ( $\overline{AB}$ , m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>). A determinação do valor da densidade onde o crescimento decresce apoiará o manejador que está interessado em maximizar o incremento em área basal das árvores.

Para calcular  $\overline{AB}$  empregou-se o conceito de densidade pontual de Spurr (SPURR, 1962) que emprega o método de soma de ângulos (*ASM=Angle-Summation Method*) formado entre o ponto central da parcela (nesse caso a árvore objeto) com o diâmetro ( $d_j$ ) e distância ( $Dist_j$ ) entre a *j-ésima* árvore competidora e a árvore objeto. Assim, a área basal média por hectare excluindo a árvore objeto foi,

aproximadamente, calculada pela fórmula 7 (SPURR, 1962):

$$\overline{AB} = \frac{\sum_{j=1}^n \left\{ (j-1/2) \cdot \left[ \frac{(d_j / \text{Dist}_j)^2}{4} \right] \right\}}{n} \quad (7)$$

Onde: n=representa o total de árvores competidoras ao redor duma determinada árvore objeto. A porção  $(d_j / \text{Dist}_j)^2 / 4$  representa o ângulo de contagem contabilizado para cada árvore competidora.

Na prática, Spurr (1962) mencionou a média aritmética obtida pela fórmula 7 ser muito próxima da área basal estimada pela método de contagem angular (ACM=*Angle-Count Method*) de Bitterlich.

### 3.3.3 Morfometria da árvore como efeito da competição passada

A competição passada, expressa aqui pelos índices morfométricos, considerou a hipótese que as dimensões apresentadas pela copa atual foi moldada pela competição à qual a árvore foi submetida no passado ocasionando a mudança no tamanho da árvore (CLARK, 2001) e, conseqüentemente, a redução na taxa de crescimento em decorrência da redução no tamanho da copa (comprimento e diâmetro), efeito da competição em anos anteriores.

Desta forma, quando uma árvore apresenta pequeno porte (diâmetro, altura, copa) em relação às árvores vizinhas assumiu-se que a mesma apresentou considerável grau de competição e, possivelmente, falta de vigor competitivo (DAVIS; JOHNSON, 1987). Logo, a associação destas variáveis com o crescimento periódico poderia aumentar o poder de explicação da variância ocorrida no incremento periódico em área basal.

Assim, para cada árvore objeto, calcularam-se os índices morfométricos derivados de variáveis de tamanho da árvore (Tabela 4), e avaliou-se seu eventual efeito no modelo de crescimento.

TABELA 4 - Índices morfométricos utilizados para medir o efeito da competição passada.

Índice morfométrico	Fórmula	Fonte
Índice de Saliência	$= \frac{dc}{d}$	Assmann (1970)
Índice de Abrangência	$= \frac{dc}{h}$	Assmann (1970)
Formal de copa	$= \frac{dc}{cc}$	Assmann, 1970; Durlo e Denardil (1998); Sterba et al. (2002)
Proporção de copa	$= \frac{cc}{h}$	Vettenranta (1999)
Relação hd	$= \frac{h}{d}$	Assmann (1970)

Em que: dc=diâmetro de copa derivado de oito raios medidos em direções cardiais e intercardiais; h=altura total; cc=comprimento de copa.

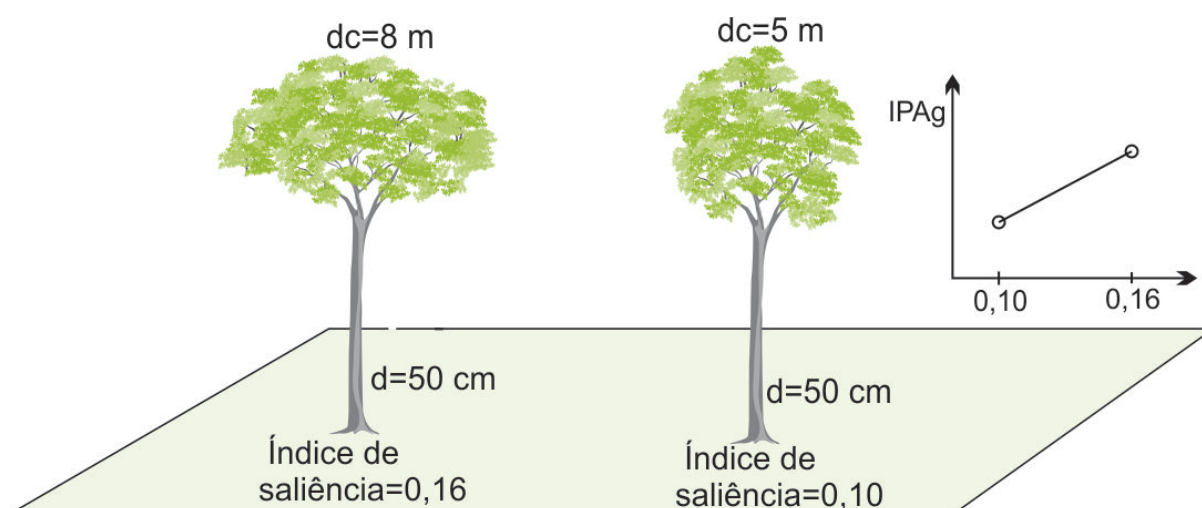


FIGURA 8 - Expectativa da relação entre o incremento em área basal (IPAg) e o índice de saliência da árvore. Para um mesmo diâmetro ( $d$ ) apresenta maior capacidade fotossintética a árvore com maior diâmetro de copa ( $dc$ ), o que pode refletir em maiores taxas de crescimento.

O índice de saliência da árvore foi calculado para descrever o vigor entre árvores com o mesmo diâmetro e indica o espaço necessário para o crescimento da árvore à medida que cresce em diâmetro ( $d$ ). Essa variável está relacionada, de forma positiva, com o crescimento em área basal (FIGURA 8). Assim, para duas árvores de mesmo diâmetro, a diminuição do quociente  $dc/d$  pode indicar efeito da competição experimentada pela árvore.

Já o índice de abrangência ( $dc/h$ ) também indica a necessidade de espaço da árvore com o aumento da altura. Desta forma, para uma mesma altura total, atingirá maior espaço o indivíduo que tiver maior diâmetro de copa.



O índice Formal de copa ( $dc/cc$ ) quando relacionado com a eficiência do crescimento ( $cm^2 \cdot ano^{-1} \cdot m^2$ ) indica a capacidade produtiva em base as dimensões da copa. Em geral, quanto menor seu valor, mais árvores cabem em um hectare, por exemplo.

A proporção de copa ( $cc/h$ ) mede o potencial fotossintético da árvore, seu valor é muito sensível aos efeitos da competição que diminui o comprimento da copa sendo, por esta razão, altamente correlacionado com o crescimento (DANIELS et al., 1986).

A relação altura-diâmetro ( $h/d$ ) indica quantas vezes maior é a altura em relação ao diâmetro e também está intimamente relacionada com a competição a qual sofreu a árvore objeto, dando uma ideia da estabilidade. Esta relação também informa sobre a forma do tronco (*stem taper*) e, portanto, volume (ZEIDE; VANDERSCHAAF, 2002).

### **3.4 Formulação do modelo de incremento em área basal (IPAg)**

Frente à grande variação dos dados observados de IPAg (superdispersão; gráficos de dispersão no Apêndice 2), utilizaram-se duas aproximações de modelos empíricos para modelar IPAg em função das covariáveis (os dados de IPAg não abrangem o ponto de inflexão, tampouco a assíntota para considerar modelos biológicos).

O uso desta metodologia teve o objetivo de discutir a acurácia de ambas as aproximações de modelagem perante superdispersão dos dados de IPAg, pois espera-se, de antemão, uma falta de ajuste do modelo com a distribuição Normal. O Fluxograma da Figura 9 detalhou os passos para a modelagem.

No primeiro modelo (denominado Modelo 1) utilizou-se transformação logarítmica de IPAg ( $\ln IPAg$ ) no contexto de regressão ordinária clássica e, portanto, considerou-se distribuição Lognormal para os dados de IPAg. Este tipo de aproximação é uma das mais comuns, utilizada entre pesquisadores para a modelagem do crescimento periódico em área basal (p.e. MONSERUD; STERBA, 1996; NYSTRÖM; KEXI, 1997; STERBA et al., 2002) e em diâmetro (p.e. VANCLAY, 1991; ADAME et al., 2008) devido à grande variação do incremento com o aumento do porte das árvores - a variância é proporcional à média - (superdispersão).

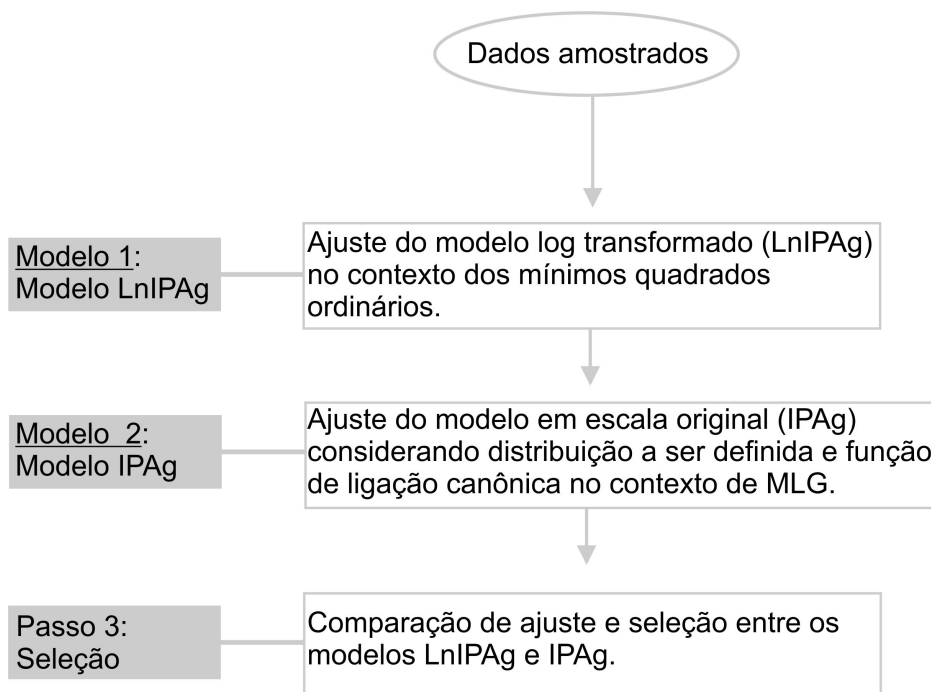


FIGURA 9 - Representação esquemática do processo para o ajuste dos modelos de incremento em área basal. IPAg=incremento periódico anual em área basal; LnIPAg=logaritmo natural de IPAG; MLG=modelo linear generalizado. Modificado de Gea-Izquierdo e Cañellas (2009).

Convém destacar que, a necessidade de transformação da variável dependente leva à formação de viés em que o intercepto é afetado devendo, portanto, utilizar-se um fator de correção do tipo:

$$\hat{\mu} = \exp(\hat{\eta} + \sigma^2/2)$$

Onde:  $\hat{\mu}$  = média estimada;  $\hat{\eta}$  = preditor linear estimado;  $\sigma^2$  = variância;

Condés e Sterba (2005) mencionaram considerar a correção do viés acima, quando a variável dependente seguir distribuição Lognormal.

O gráfico para a escolha de uma transformação na família Box-Cox para a variável LnIPAg (logaritmo de IPAg) mostrou um intervalo de confiança  $100(1-\alpha)$  para o parâmetro Lambda que incluiu o valor 1 (FIGURA 10a), indicando que a escala logarítmica para IPAg (Modelo 1) poderia ser adequada para a regressão ordinária. Na segunda metodologia, modelou-se IPAg em escala original sem transformação (denominado Modelo 2) e considerando a distribuição Gama no contexto de Modelos Lineares Generalizados (MCCULLAGH; NELDER, 1989).

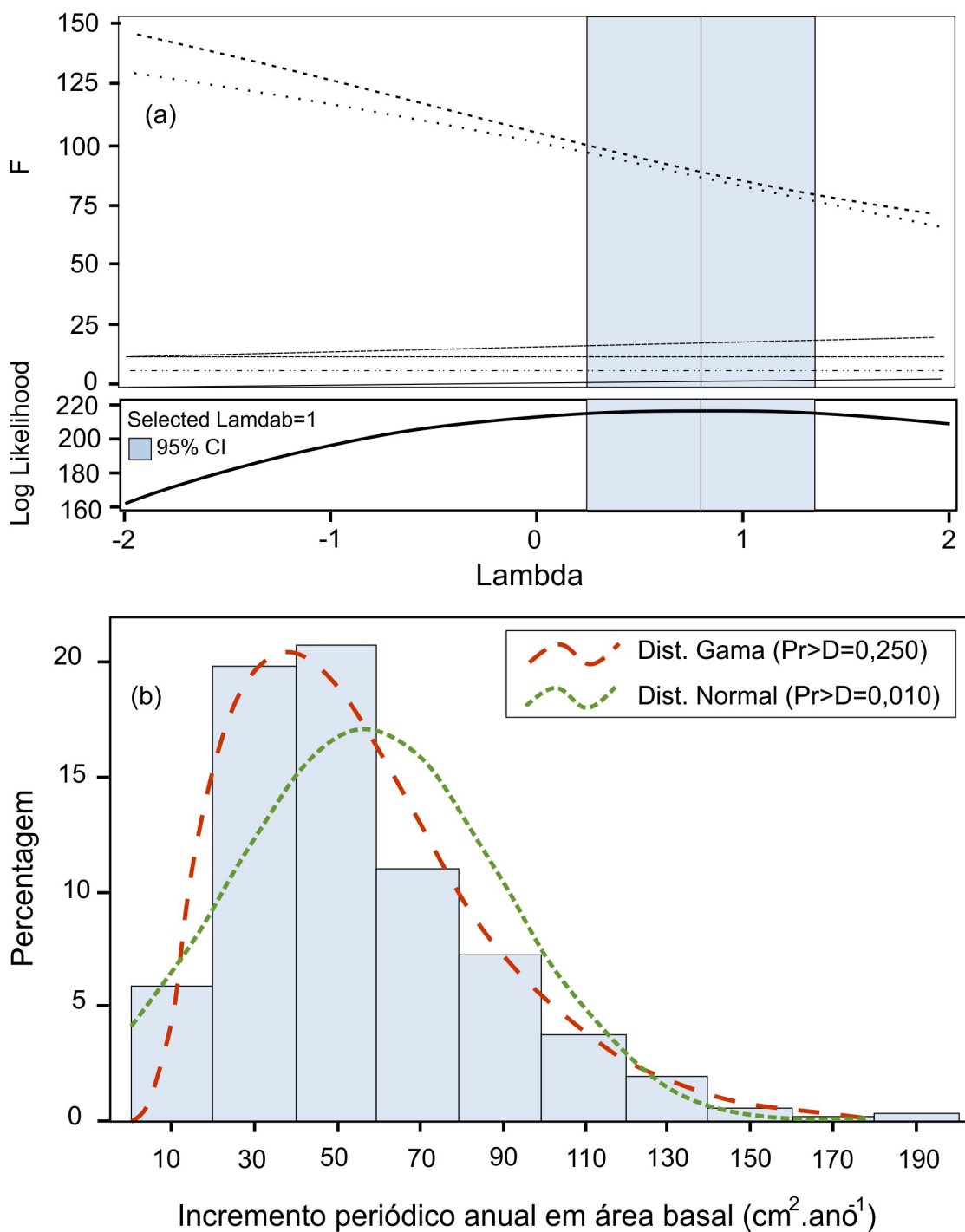


FIGURA 10 - (a) Perfil de verossimilhança e valor F para o parâmetro Lambda da transformação Box-Cox de LnIPAg. A faixa cinza mostra o intervalo de confiança. (b) Frequência observada do incremento periódico anual em área basal (IPAg; histograma) e frequência esperada (linhas) do modelo Gama e Normal.  $D$ =estatística de Kolmogorov-Smirnov. O valor do parâmetro de forma da distribuição Gama foi de 2,9.

O teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov para a distribuição dos dados observados de IPAg deu suporte ao considerar a distribuição Gama como adequada para modelar IPAg (Figura 10b), indicando também, inadequação do modelo Normal. A distribuição Gama oferece grande potencial para a modelagem de dados contínuos que apresentam superdispersão e, portanto, heterogeneidade de variância. Foi amplamente utilizada em pesquisas anteriores para modelar dados de crescimento de árvores (p.e. GEA-IZQUIERDO; CAÑELLAS, 2009; CONTRERAS et al., 2011).

Para ajustar o modelo 2 utilizou-se a função de ligação canônica da distribuição Gama  $g(\eta^{-1})$ . De antemão, o Modelo 2 oferece vantagem frente ao Modelo 1, pois descarta tendências oriundas da transformação advinda da discrepância logarítmica.

O efeito de cada covariável sobre o incremento em área basal foi verificado em base ao modelo utilizado que variou de acordo com a sua estrutura e a unidade da variável dependente utilizada.

Para o Modelo com variável dependente transformada (Modelo 1) utilizou-se a expressão funcional 8. Neste caso, os valores observados de IPAg foram transformados utilizando logaritmo natural ( $\ln(\text{cm}^2)$ ) e, após, seus valores foram modelados:

$$\hat{\mu}_i = E[g(\text{IPAg}_i)] = \beta_0 + \beta_1(\text{tamanho da árvore}) + \beta_2(\text{competição}) + \beta_{3i}(\text{carga liana}) \quad (8)$$

Para o modelo generalizado Gama (Modelo 2) o efeito de cada covariável foi avaliado considerando o incremento em área basal em escala original ( $\text{cm}^2$ ). Desta forma, o preditor linear, contendo as covariáveis, foi ligado ao IPAg utilizando a função de ligação canônica recíproca da Expressão 9. Neste caso, os valores observados de IPAg não foram transformados, mas sim, sua expectância, pela função de ligação:

$$\hat{\mu}_i = g[E(\text{IPAg}_i)] = \beta_0 + \beta_1(\text{tamanho da árvore}) + \beta_2(\text{competição}) + \beta_{3i}(\text{carga liana}) \quad (9)$$

Onde: IPAg=incremento periódico anual em área basal estimado;  $g$ =função de ligação recíproca;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_{3i}$ =coeficientes de regressão.

Para auxiliar a construção dos modelos de incremento, uma análise exploratória com gráficos de dispersão entre IPAg e as covariáveis foi conduzida para verificar o comportamento de linearidade entre as mesmas. Conjuntamente, realizou-se a análise de correlação de Pearson, a fim de permitir a avaliação estatística da associação espécie específica.

Os coeficientes de regressão do Modelo 1 (Expressão 8) foram estimados por mínimos quadrados ordinários e sua significância avaliada pelo teste de t. Para o modelo de regressão Gama (Modelo 2; Expressão 9) os coeficientes foram estimados pela maximização da função de verossimilhança (Máxima Verossimilhança) (ver Apêndice 3; LINDSEY, 1997).

O vetor que incluiu as covariáveis de tamanho da árvore ( $\beta_1$ ) permitiu avaliar como uma árvore deve ser conformada para obter boas taxas de crescimento em área basal. As variáveis consideradas na análise foram: altura (h), diâmetro e comprimento de copa (dc, cc; respectivamente) e os índices morfométricos descritos na Tabela 4. Quando possível, o diâmetro a altura do peito foi desconsiderado do referido vetor devido a sua associação com os índices de competição. O efeito do *status* competitivo sobre incremento em área basal foi avaliado pelo vetor  $\beta_2$  que considerou, na modelagem o índice de competição ( $IC_i$ ) mais associado, indicado pela Correlação de Pearson. Para avaliar o efeito da *i-ésima* carga de lianas na copa, o vetor  $\beta_{3i}$  foi empregado somente para as árvores de Cedrela. Este vetor teve sua declividade variada, pois esteve associado a três níveis de carga de lianas. Ambos os vetores  $\beta_2$  e  $\beta_3$  mediram o decréscimo da taxa de crescimento frente aos referidos efeitos.

Primeiramente, os modelos foram ajustados para cada espécie considerando somente o vetor de tamanho da árvore ( $\beta_1$ ). A seleção das covariáveis do referido vetor, para o modelo de regressão Gama, deu-se pela comparação de modelos encaixados, considerando o modelo funcional da expressão 9 contendo todas as covariáveis de tamanho (modelo completo) e o outro reduzido em uma delas. Procedeu-se ao ajuste do modelo reduzido até avaliar todas as covariáveis.

Assim, a significância de cada covariável para o modelo de regressão Gama se deu pelo teste da razão de verossimilhança. Essa estatística tem assintoticamente uma distribuição Qui-quadrado (para amostras pequenas e grandes) possibilitando o cálculo da significância de cada preditor. Após omitir as

variáveis sem significância (exclusão sequencial de preditores não significativos), estimou-se o vetor  $\beta_2$  de competição e o vetor  $\beta_3$  da carga de lianas na copa, simultaneamente, com a mesma metodologia.

O sistema estatístico SAS (Versão 9.2, SAS Institute) foi utilizado para o ajuste dos modelos de regressão para o incremento em área basal. Utilizou-se o PROC REG para ajustar a Expressão 8; PROC GENMOD e PROC GLIMMIX para ajustar o modelo Gama da Expressão 9. Utilizou-se o PROC REG para calcular o índice de inflação da variância (VIF) para ambos os modelos de regressão. O PROC REG calcula o VIF de forma independente da distribuição de probabilidade e da unidade da variável dependente considerada.

Somente permaneceram no modelo final as variáveis independentes com VIF abaixo do valor 5. Monserud e Sterba (1996) relataram que, considerar um VIF alto (p.e. 10) induz a inclusão de variáveis desnecessárias no modelo, pois estas somente descrevem peculiaridades da amostra e não necessariamente generalizam para a população. Para todas as análises estatísticas, valores de  $P < 0,05$  foram considerados para denotar significância estatística.

Vale notar que a seleção de covariáveis se deu manualmente, com exclusão sequencial de preditores não significativos e mantendo os efeitos significativos no modelo e, portanto, não se utilizou método de seleção das covariáveis.

#### 3.4.1 Medidas de ajuste do modelo de incremento

Critérios de diagnóstico baseados nos dados observados e estimados foram calculados para conhecer como os modelos (Modelos 1 e 2) se ajustam aos dados observados de IPAg com as variáveis preditoras selecionadas e para comparar o ajuste entre os modelos. Estas medidas de ajuste também foram utilizadas para selecionar qual modelo considerar utilizando dados das espécies agrupadas. Em cada teste de ajuste, a tendenciosidade (Bias), o erro padrão da estimativa (RMSE) e o coeficiente de determinação ajustado, incluindo um específico para modelos generalizados, foram calculados utilizando as expressões da Tabela 5. Não se utilizou o critério de informação de Akaike para comparação de ajuste entre o modelo transformado e o modelo Gama, pois os valores de AIC são apenas comparáveis quando na mesma escala da variável resposta (CORDEIRO; DEMÉTRIO, 2010).

TABELA 5 - Critérios para diagnóstico dos Modelos de regressão 1 e 2.

Critério	Símbolo	Fórmula
Média residual	Bias	$= \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\mu}_i)}{n}$
Erro padrão da estimativa	RMSE	$= \sqrt{\left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\mu}_i)^2}{n-k} \right]}$
Coefficiente de determinação ajustado para o modelo de regressão transformado (LnIPAg).	$R_{aj}^2$	$= 1 - \left[ \frac{(n-k-1)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\mu}_i)^2}{(n-1)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{\mu})^2} \right]$
Coefficiente de determinação ajustado para regressão generalizada Gama (MITTLBÖCK; HEINZL, 2002).	$R_{D,gl}^2$	$= 1 - \left[ \frac{(n-k-1)^{-1} \cdot D(y; \hat{\mu})}{(n-1)^{-1} \cdot D(y; \bar{\mu})} \right]$

Em que: n=número de observações; k=número de parâmetros do modelo de regressão; gl=grau de liberdade;  $y_i$ =valor observado da  $i$ -ésima observação de IPAg;  $\hat{\mu}_i$ =valor estimado para a  $i$ -ésima observação de IPAg;  $\bar{\mu}$ =valor médio de IPAg;  $D(y; \hat{\mu}_i)$ ,  $D(y; \bar{\mu})$ =o desvio (*deviance*) para o modelo máximo e para o modelo nulo, respectivamente. O erro padrão da estimativa para o modelo logaritmo foi corrigido utilizando o Índice de Furnival modificado por Silva e Bailey (1991).

As funções de desvio para calcular o coeficiente de determinação do modelo Gama são os desvios obtidos do modelo máximo ( $D(y; \hat{\mu}_i)$ ) quando todas covariáveis são incluídas, e do modelo nulo ( $D(y; \bar{\mu})$ ), quando contém apenas um parâmetro que representa a média  $\bar{\mu}$  comum a todas as observações  $y$ 's, respectivamente. Ambas as funções foram obtidas pelas Expressões 10 e 11 (MITTLBÖCK; HEINZL, 2002):

$$D(y_i; \hat{\mu}_i) = 2 \sum_{i=1}^n \left\{ \left[ -\log \left( \frac{y_i}{\hat{\mu}_i} \right) \right] + \left[ \frac{(y_i - \hat{\mu}_i)}{\hat{\mu}_i} \right] \right\} \quad (10)$$

$$D(y_i; \bar{\mu}) = 2 \sum_{i=1}^n \left\{ \left[ -\log \left( \frac{y_i}{\bar{\mu}} \right) \right] + \left[ \frac{(y_i - \bar{\mu})}{\bar{\mu}} \right] \right\} \quad (11)$$

Os valores das Expressões 10 e 11 são facilmente obtidos do quadro de bondade de ajuste do *output* do PROC GENMOD (SAS/Stat, 2004) denominado

*Deviance*. O coeficiente de determinação ajustado para regressão generalizada Gama ( $R^2_D$ ) também prevê o problema comum de aumento do  $R^2$  da regressão linear ordinária, quando da inclusão de mais covariáveis no modelo (MITTLBÖCK; HEINZL, 2002).

### 3.4.2 Análise residual

Para verificar a adequação do ajustamento dos modelos às covariáveis selecionadas, procedeu-se a análise informal da dispersão residual. Para tal, considerou-se a análise gráfica dos resíduos componente dos desvios (*Deviance residual*), calculado pela Expressão 12 e específica para a distribuição Gama.

Esse tipo de resíduo é uma extensão aplicável para todas as distribuições pertencentes à família exponencial (MCCULLAGH; NELDER, 1989). O resíduo componente dos desvios ( $r_i^D$ ) é definido como a raiz quadrada da diferença entre as Log-verossimilhanças sob o modelo saturado (máximo) e o corrente (modelo sob investigação em que toda a variação em  $y$ 's é alocada para a componente sistemática do modelo) para cada  $i$ -ésima observação. Essa análise visual gráfica permitiu avaliar possíveis tendências do modelo, presença de valores discrepantes, constância da variância, bem como a adequação da função de ligação utilizada.

$$r_i^D = \delta_i \left[ 2 \left( \ln \frac{\hat{\mu}_i}{y_i} - \frac{y_i - \hat{\mu}_i}{\hat{\mu}_i} \right) \right]^{1/2} \quad (12)$$

Em que:  $\delta_i = \text{sign}(y_i - \hat{\mu}_i)$

O resíduo  $r_i^D$  representa uma distância da observação  $y_i$  ao seu valor ajustado  $\hat{\mu}_i$ , medida na escala do logaritmo da função de verossimilhança. Logo, o padrão de dispersão pode representar a qualidade do ajuste de igual forma quando avaliado os resíduos ordinários.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Crescimento e dimensão

A análise de dispersão das variáveis duas a duas para os dados observados do incremento periódico anual em área basal (IPAg) e as covariáveis (APÊNDICE 2) revelou relações funcionais de forma linear entre IPAg e as covariáveis que expressam o tamanho da árvore e sua morfometria. Porém, a dispersão dos dados mostrou elevada variabilidade para todas as espécies a medida que aumentou o porte das árvores.

A análise de correlação linear de Pearson mostrou que o grau de associação do IPAg dependeu da espécie e das covariáveis avaliadas resultando em correlação positiva e negativa (FIGURA 11). No contexto de correlação positiva, os valores indicaram que a taxa de incremento anual foi maior à medida que aumentou o diâmetro (d), diâmetro de copa (dc) - ambas variáveis altamente correlacionadas entre si - a altura (h) e o comprimento de copa (cc), com maior força de associação observada em árvores de *Amburana* e menor para *Copaifera*.

Somente para árvores de *Cedrela* e *Copaifera* a variável proporção de copa (cc/h) teve associação significativa com IPAg.

Associação negativa ocorreu para a variável índice de saliência (dc/d), porém, sem efeito significativo para as espécies. Este comportamento diverge do esperado, visto que hipoteticamente duas árvores com o mesmo diâmetro, apresentaria a maior taxa de crescimento a de maior diâmetro de copa (maior valor do índice de saliência; cf. FIGURA 8). O fato de que algumas árvores mostrarem boa taxa de crescimento mesmo com copas estreitas (compensam aumentando o comprimento da copa) distorce a hipótese referida.

Dawkins (1963) utilizou o índice de saliência para obter informações de tolerância dos indivíduos frente ao aumento da densidade do povoamento em floresta tropical. A hipótese investigada foi a de que indivíduos tolerantes cresceriam bem mesmo com valores pequenos do índice de saliência. O autor encontrou que o diâmetro de copa das árvores foi 14 a 28 vezes maior do que o diâmetro a altura do peito. Mais tarde, Hemery et al. (2005) também utilizaram com o mesmo propósito.

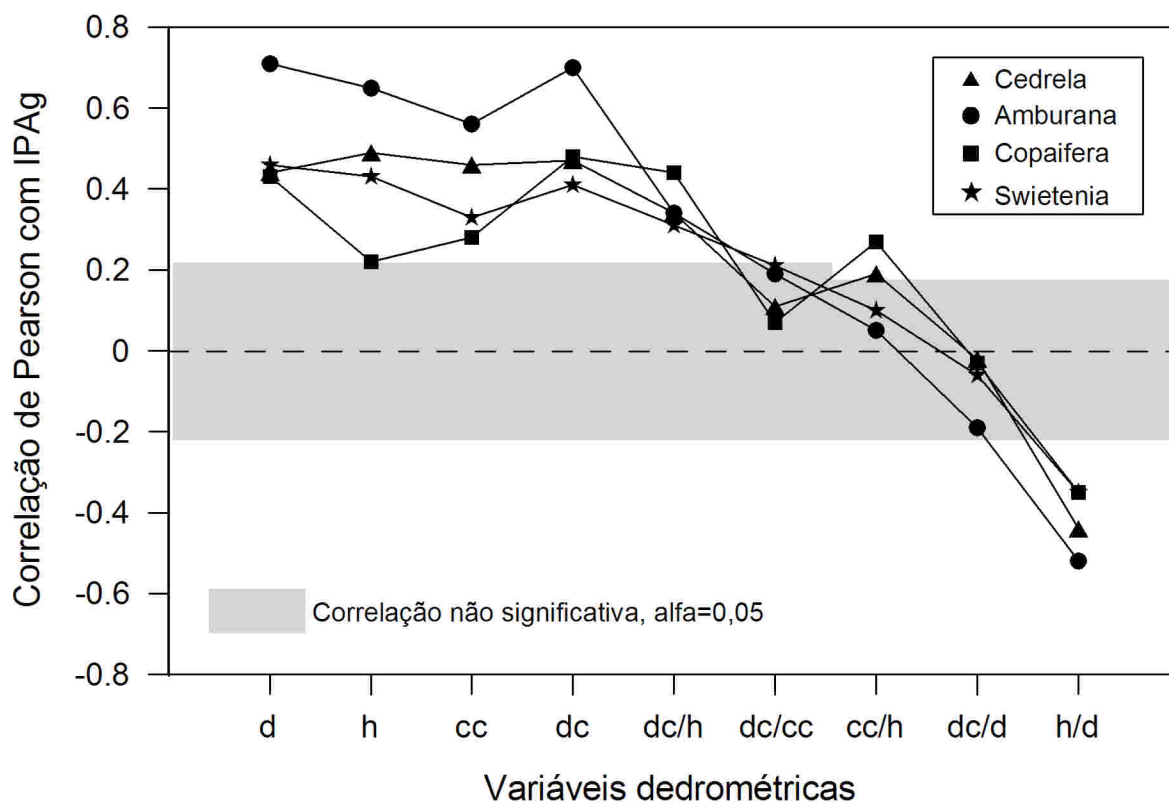


FIGURA 11 - Linhas espécie-específicas da associação entre incremento em área basal (IPAg) e variáveis de tamanho da árvore (d=diâmetro a altura do peito; h=altura total; cc=comprimento de copa; dc=diâmetro de copa).

Os gráficos de dispersão do Apêndice 2 revelaram, aparentemente, um comportamento quadrático entre IPAg e o índice de saliência. A análise de regressão confirmou a significância do termo quadrático (não mostrado) indicando um ponto ótimo. Esse comportamento levou a não significância da correlação linear entre o referido índice e IPAg.

Wadsworth (1997) investigou essa relação, e encontrou que as árvores apresentavam as maiores taxas de crescimento quando com diâmetro de copa 15 a 20 vezes maiores do que o diâmetro a altura do peito, valores maiores do que 25 os indivíduos apresentaram baixo crescimento.

A análise da correlação também revelou associação negativa entre IPAg e a relação hd ( $h/d$ ) para as quatro espécies. Isso indicou que árvores mais grossas e baixas agregaram mais área basal do que árvores finas e altas.

## 4.2 Crescimento e competição

A trajetória da correlação entre o incremento em área basal (IPAg) com os índices de competição dependeu da formulação matemática para representar o *status* competitivo (FIGURA 12). A correlação variou dentro ( $r=-0,207$  e  $-0,429$  para Copaifera e Cedrela, respectivamente) e entre as espécies ao longo dos índices avaliados. Isto sugere que alguns índices de competição não são capazes de representar o efeito da competição sobre o incremento (ns) como, por exemplo, para Swietenia e Copaifera. Valores de correlação próximos entre os índices IC1 ao IC5 ocorreram para Cedrela com destaque para o índice de competição de Hegyi modificado (IC6) que apresentou a maior correlação entre os índices avaliados para as quatro espécies (cf. FIGURA 12).

Hegyi (1974) desenvolveu esse índice para povoamentos homogêneos considerando um expoente unitário tanto para o cociente de tamanho ( $d_j/d_i$ ) como para o ponderador da distância ( $1/\text{dist}_{ij}$ ). Entretanto outros autores calcularam um expoente, para ambos os quocientes, em busca de representar melhor o efeito da competição sobre o crescimento de floresta mista. Lorimer (1983) relatou melhores resultados quando utilizando o IC6 (com expoente 0,5 para o termo da distância, entre a árvore objeto e as competidoras). Essa melhora dos resultados pode estar associada ao fato de que o termo da distância, do índice, interfere diretamente na taxa de decréscimo exponencial do efeito competitivo, de uma árvore vizinha sobre a árvore objeto (SABATIA; BURKHART, 2012).

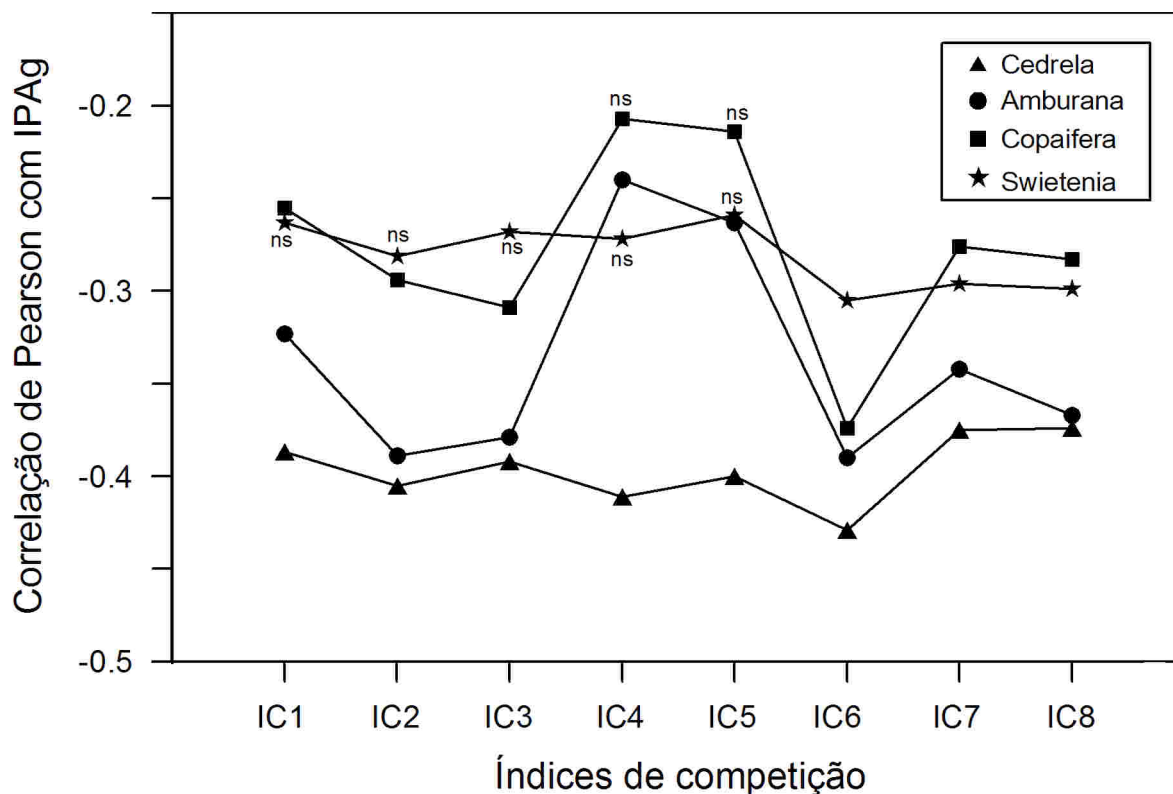


FIGURA 12 - Linhas espécie-específicas da correlação de Pearson entre incremento em área basal (IPAg) e os índices de competição. ns=correlação não significativa entre IPAg e o referido índice de competição.

#### 4.2.1 Análise dos índices de competição

Apesar de que os índices de competição, aqui utilizados, terem sido testados e aplicados, com certa acurácia, em várias pesquisas anteriores (veja fontes na Tabela 3), não necessariamente os mesmos, representaram todo o complexo processo ontogênico da competição, pois são simples expressões matemáticas aplicadas em um cenário de grande diversidade como o da floresta Amazônica. Logo, quando uma árvore apresenta uma redução do tamanho da copa (*crown shyness*), assumiu-se que, possivelmente a mesma apresentou falta de vigor competitivo (DAVIS; JOHNSON, 1987), exercido pela alta competição e refletindo baixas taxas de crescimento. Entretanto, em floresta tropical, mesmo árvores sob forte competição comumente apresentam boas taxas de crescimento produzindo baixa correlação ou até mesmo índices não significativos, quando relacionado com o crescimento.

Neste contexto, vários aspectos devem ser considerados antes de interpretar a significância de um determinado índice de competição. Primeiramente, os índices

variam de acordo com o método de cálculo da competição e das variáveis utilizadas. A maioria dos estudos de competição entre árvores tem focado no desempenho médio (p.e. crescimento diamétrico) em relação à densidade do povoamento representada pela soma das áreas basais por hectare (p.e. uso do índice de BAL). Portanto, utilizar somente a densidade como uma medida da competição pode resultar em modelos seriamente tendenciosos, visto que os efeitos da variação, que pode ser grande em floresta tropical, devido à grande diferença de idade, são mascarados ou facilmente alterados, resultando numa relação matemática inteiramente marginal (LAROCQUE, 2002). Isso se deve, em parte, a ocorrência de indivíduos competidores com menor diâmetro, em relação à árvore objeto. Esse fato reforça a cautela em considerar o uso de modelos não espaciais para representar o *status* competitivo em florestas mistas. Outro exemplo é o índice de Glover e Holl, Dimov et al. (2008) recomendaram seu emprego para determinar a competição em povoamentos homogêneos igualmente espaçados de mesma idade e tamanho.

Outro ponto importante a ser considerado é que, a concorrência espacial calculada para um povoamento equiâneo, puro e manejado, depende necessariamente da idade, uma vez que o desbaste proporciona o aumento da distância absoluta entre as árvores. Para o cenário de floresta Amazônica, onde não ocorrem desbastes, os índices espaciais podem apresentar outro comportamento tornando a representatividade da competição dependente destas variações, causando, assim, baixo poder explicativo. Esta pode ser a causa do porquê modelos de crescimento não têm sido extensamente utilizados durante o planejamento do manejo florestal.

Por esta razão, para descrever a competição, Zhao et al. (2004) relatam que para florestas mistas, é preferível utilizar modelos de competição dependentes da distância, porque o efeito de árvores vizinhas sob o crescimento da árvore objeto decresce com a distância. Entretanto, alguns autores recomendam incluir na modelagem, índices de competição que desconsideram o espaço (p.e. FOX et al., 2008).

O terceiro ponto a ser considerado nos resultados encontrados é o método de seleção de indivíduos competidores utilizados para calcular a competição. Uma das razões porque os índices de competição podem falhar em representar a concorrência pode estar atribuída à área ao redor da árvore objeto utilizada para a

amostragem dos competidores. Para Tonini (2007), definir uma zona exata em que ocorre a influência de árvores vizinhas competidoras é bastante difícil. Entretanto, Vettenranta (1999), sugere que realmente não há uma razão natural, pois a competição cessaria repentinamente a uma determinada distância, sendo mais realista assumir que a competição decresce com o aumento da distância à árvore objeto. Isso levou Daniels (1976) a recomendar a utilização do método de área variável (Goniométrico) para seleção de indivíduos competidores, baseado em maiores valores de correlação com o crescimento periódico em diâmetro do que quando se utilizou raios fixos. Devido a isto, métodos efetivos para medir a competição foram criados, entretanto, em nenhum dos índices submetidos a essa análise, a competição foi expressa em termos de taxa de crescimento efetivo, mas utilizou o efeito na dimensão da árvore. Por exemplo, Boivin et al. (2010) relataram aumento do poder preditivo do modelo de crescimento quando incluído no cálculo da competição o sombreamento da árvore objeto causado pela árvore vizinha competidora. Esta melhora pode estar associada ao fato de que o resultado da interação (competição) determina o tamanho da copa de cada árvore individualmente, o que reflete na interceptação de luz, capacidade fotossintética, crescimento e até mesmo sobrevivência (THORPE et al., 2010).

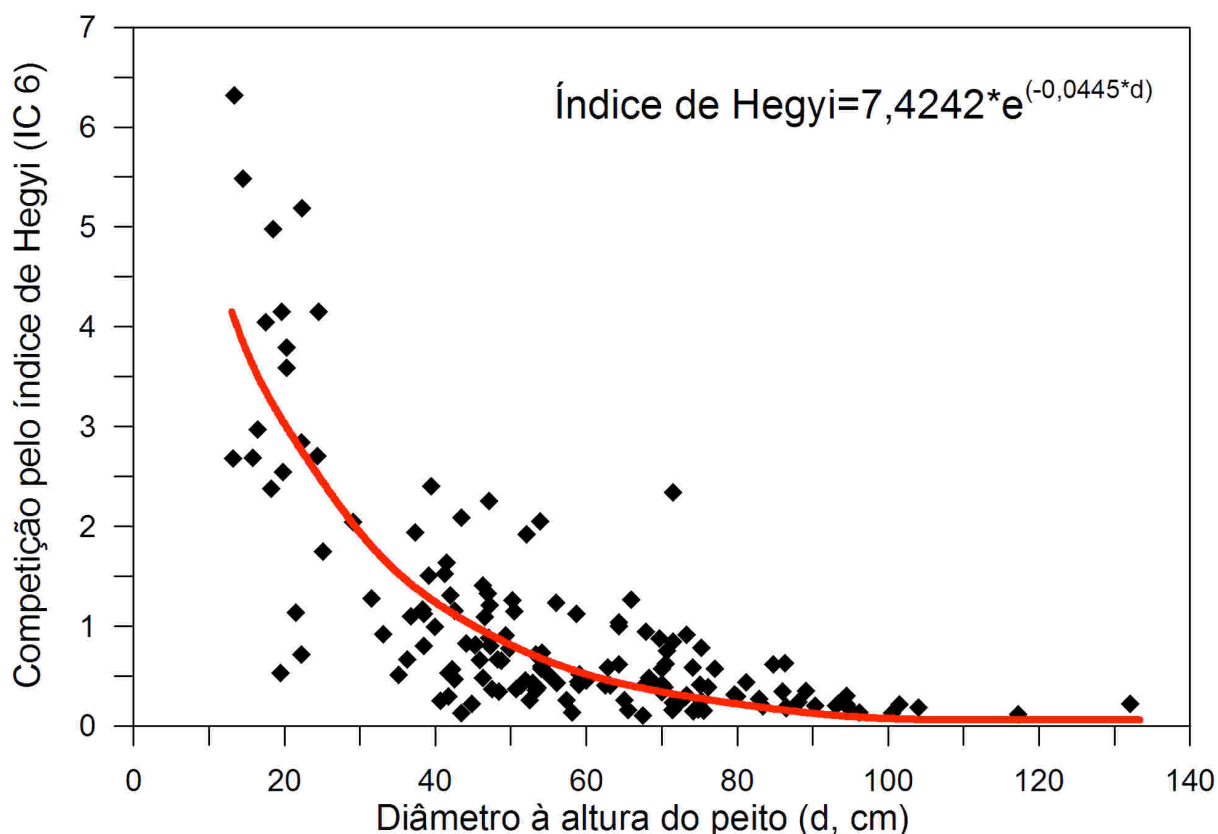


FIGURA 13 - Decréscimo exponencial da competição medido pelo índice de Hegyi com o aumento do porte das árvores objeto.

Apesar da grande variação, o comportamento do *status* competitivo calculado pelo índice de Hegyi (IC6), em diferentes tamanhos (diâmetro) da árvore objeto mostrou níveis de competição elevada quanto menor o porte das árvores e pouca competição (queda drástica) em árvores grandes (FIGURA 13). Esse efeito mostrou que as árvores abaixo do diâmetro mínimo de corte (DMC=50; Instrução Normativa 05/2006) frequentemente foram encontradas sob o efeito da competição por luz, comportamento comum na dinâmica de crescimento da floresta, uma vez que, as árvores maiores têm maior probabilidade de estar no dossel e não ter competidores evidentes.

### 4.3 Crescimento e exposição da copa à luz (IEC)

#### 4.3.1 Análise de IPAg por classe de diâmetro e posição social

O desenvolvimento da taxa de incremento (IPAg) por classe de diâmetro foi representado na Figura 14, que revelou considerável variação dentro e ao longo das classes de exposição da copa (posição social). A amplitude dos dados foi, particularmente, grande para Cedrela devido à maior densidade de indivíduos por hectare, em comparação com as espécies avaliadas (cf. Tabela 2).

Como esperado, a maior exposição da copa à luz solar (IEC) proporcionou maiores taxas de crescimento em área basal de forma independente da classe de diâmetro (p.e. ALDER, 1980) - evidenciado pelo contraste de médias seguido pelas letras abaixo de cada caixa da Figura 14. Este efeito foi mais pronunciado nas árvores com 60 cm de diâmetro, que corresponde ao diâmetro mínimo de corte (DMC) estabelecido pela Instrução Normativa 5/2006 para Cedrela, Amburana e Copaifera.

Para árvores de Cedrela, a significância do contraste de médias de IPAg nas classes de diâmetro variando de 30 até 70 cm revelou que a disponibilidade de luz plena na copa (IEC1) proporcionou maiores taxas de crescimento em comparação com árvores sem luz direta na copa (IEC3). Esse resultado também evidenciou que a espécie possui capacidade de continuar crescendo a altas taxas mesmo quando grande no tamanho (d), o que reflete a habilidade de utilizar os recursos disponíveis considerando ótimas condições de crescimento.

Os indivíduos de Copaifera e Swietenia mostraram uma taxa de incremento mais sensível à mudança da posição social evidenciado pela significância do contraste de médias entre árvores dominantes (IEC1) e codominantes (IEC2). Para essas duas espécies, árvores pequenas (diâmetro entre 10 e 30 cm) não foram encontradas durante a amostragem e, portanto, não se encontraram indivíduos sem luz direta na copa (IEC3). De fato, Grogan et al. (2002) relataram a Swietenia como uma espécie altamente demandante de luz, mas que pode ser encontrada em ambientes de sombra onde perduram por pouco tempo.

No contexto de variação do IPAg entre as classes de diâmetro e exposição da copa, o comportamento foi acentuado para as quatro espécies e não ao acaso já que, possivelmente, refletiu a dinâmica do dossel causando o aumento na taxa de



crescimento com a maior disponibilidade de luz para a árvore (abertura do dossel) ou decréscimo, perante o fechamento do dossel. Esse efeito está relacionado à redução fotossintética da árvore devido à diminuição de luz disponível (p.e. SHINOZAKI et al., 1964a).

Esses padrões de variação do crescimento também foram associados à dinâmica do dossel para algumas espécies madeiráveis da Amazônia Boliviana (*Cedrela odorata* e *Amburana cearensis*) por Brienen e Zuidema (2006). Esses autores reportaram que a taxa de crescimento em diâmetro foi fortemente governada pela variação temporal da disponibilidade de luz para as árvores avaliadas. Pesquisas anteriores também mostraram a importância da posição da copa quanto à disponibilidade de luz para o crescimento em floresta tropical (SILVA et al., 1995; WADSWORTH; ZWEEDE, 2006).

No contexto de manejo florestal, a Figura 14 reforça que a liberação de árvores em condições de sombra (IEC2 e IEC3) poderia estimular o incremento em área basal. Tal liberação poderia ser realizada durante a operação de colheita como parte das atividades do manejo florestal pela empresa madeireira. Silva et al. (1995) relataram estímulo positivo para o incremento em diâmetro decorridos 13 anos da colheita em floresta na Amazônia Brasileira. Contudo, a simples extração de árvores destinadas ao corte não, necessariamente, proporcionariam a liberação de forma efetiva das árvores crescendo em ambiente de sombra. Por isto, tratamentos mais direcionados deveriam ser estudados e aplicados.

As árvores remanescentes com diâmetro a altura do peito menor do que 60 cm, também são um importante grupo de árvores a ser manejado com aplicações de tratamentos silviculturais para estímulo do crescimento (liberadas). Justifica-se a liberação desse grupo, pois árvores pequenas/jovens apresentam grande vitalidade e, portanto, respondem melhor frente à disponibilidade de luz na copa, fato evidenciado na Figura 14, que mostrou menores taxas de crescimento para árvores pequenas em ambientes de sombra contrastando com maiores taxas de crescimento em árvores com luz direta, para uma mesma classe de diâmetro. Esses padrões observados confirmam a hipótese testada.

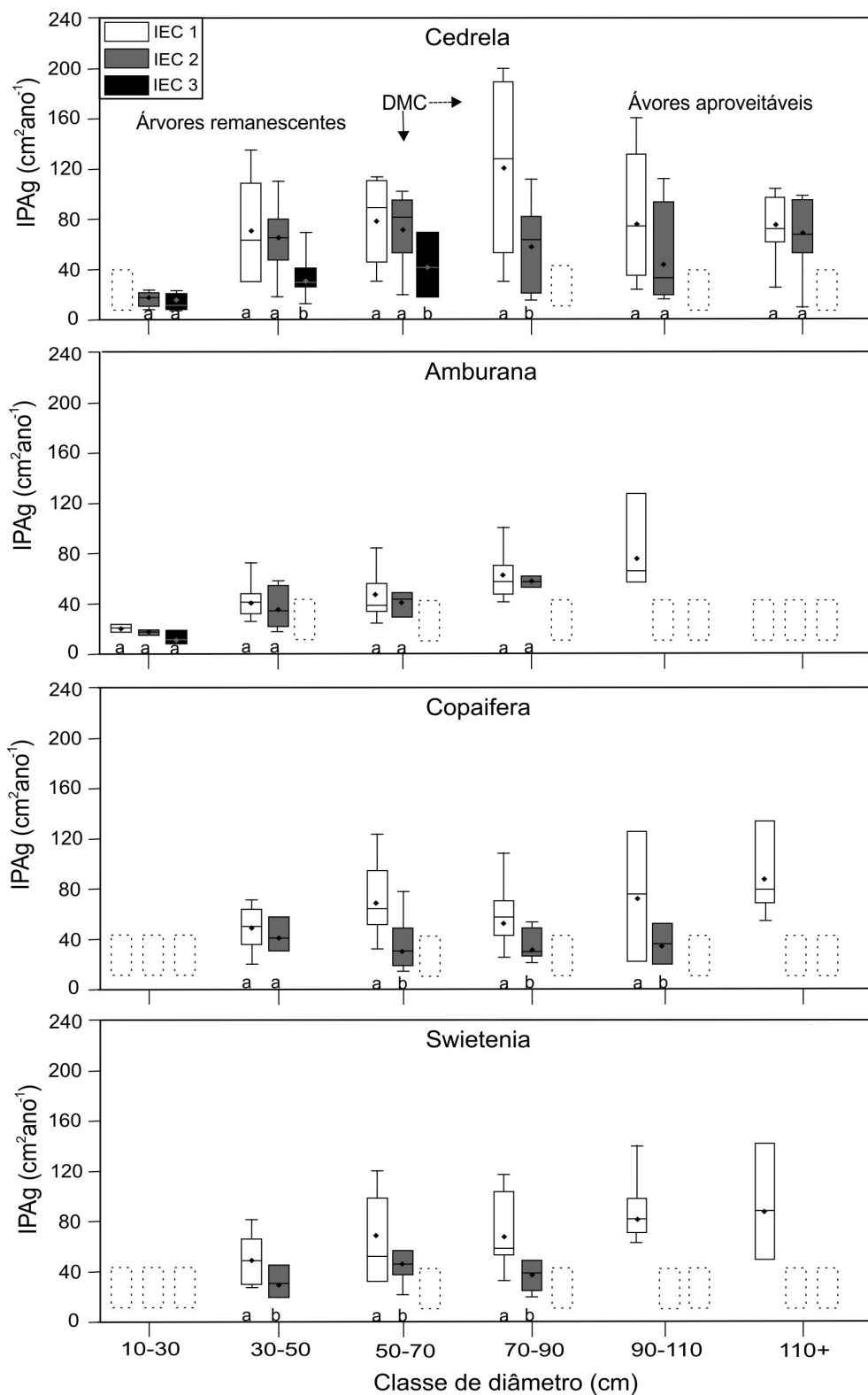


FIGURA 14 - Progressão da média (♦), mínimo, máximo e valores de interquartis do incremento periódico em área basal (IPAg) para diferentes condições de luz (IEC) ao longo das classes de diâmetro. DMC=diâmetro mínimo de corte (para Swietenia equivale a 70 cm; demais espécies 50 cm). Contraste de médias do IPAg entre IEC (ajustado por Tukey-Kramer) é indicado por letras abaixo das caixas. Linhas descontínuas indicam condições não amostradas. Tamanhos da amostra por classe são: Cedrela 6-30; Amburana 3-20; Copaifera 6-21; Swietenia 4-13.

#### 4.3.2 Eficiência do crescimento por posição social

Após o ajuste do modelo de eficiência da copa (equações embutidas na Figura 15) os valores estimados para cada espécie foram plotados em função da área de projeção da copa (APC). A variação da EC foi aparente entre as classes sociais (IEC) e revelou que as árvores com maior eficiência no crescimento em área basal (EC) foram as posicionadas com copas totalmente expostas à luz (IEC 1).

Este resultado comprovou que o conceito de Assmann (1970), sobre a eficiência da copa, também é válido para árvores tropicais. Isto significa que as árvores produziram mais incremento, por cada metro quadrado de área disponível para o crescimento, quando suas copas estiveram bem iluminadas. O efeito da posição social foi mais acentuado em árvores de *Copaifera* e menos em *Amburana*.

Esta última espécie, quando jovem (copas pequenas), não apresentou diferença na eficiência da copa (EC) entre as posições sociais. Tal comportamento também foi observado por Reid et al. (2004) em *Pinus contorta* (Lodgepole pine). Esses autores defenderam a hipótese de uma possível adaptação da árvore, que em posição social ruim, busca melhorar o acesso à luz solar através duma alocação preferencial de reservas para promover o crescimento em altura.

A tendência das linhas de regressão (FIGURA 15) também mostrou que as árvores de grande porte foram menos eficientes em utilizar o espaço ocupado para o crescimento na floresta. Isto sugere que a expansão lateral de suas copas ocorre de forma desproporcional ao incremento em área basal.

Entre as espécies, também houve diferentes níveis de EC. Quando em posição social dominante (IEC1), as árvores de *Cedrela* e *Swietenia* foram mais eficientes ( $\beta_0 = 1,1$  e  $1,3$ , respectivamente, Figura 15), enquanto a *Copaifera* apresentou a menor eficiência. Esta espécie também mostrou ser menos sensível em termos de eficiência frente ao aumento do tamanho da copa (APC), contrastando com *Swietenia*, que mostrou queda notável da capacidade produtiva com o aumento da copa (menor valor de  $\beta_1$  dentre as espécies).

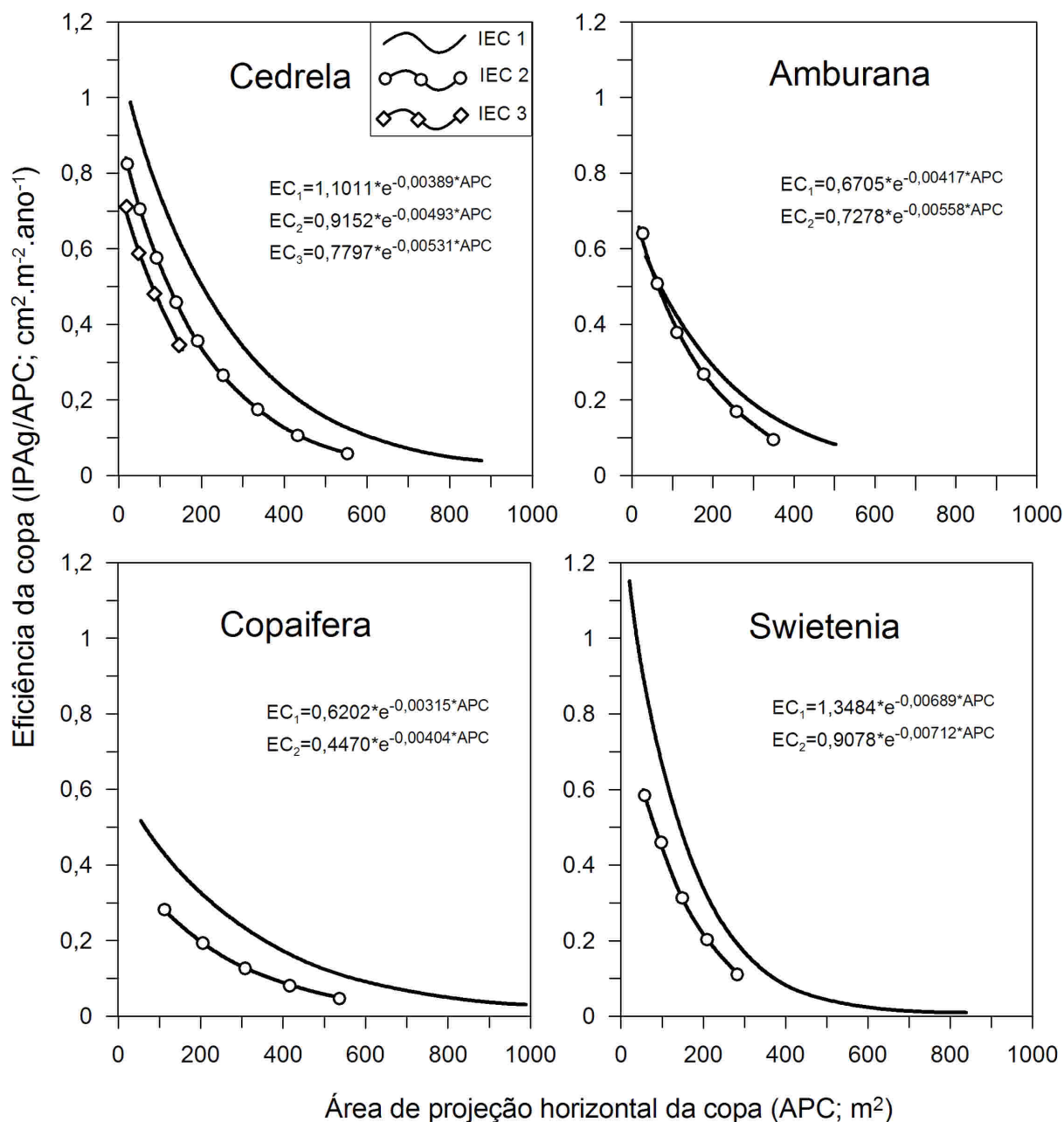


FIGURA 15 - Árvores com maior eficiência no crescimento (EC) tenderam a ter copas que abrangem menor área de projeção no solo (APC) e quando em boa posição social. IEC1=copa recebendo luz vertical e lateral; IEC2=luz total de cima e lateral sombreada; IEC3=copa sem recebimento de luz direta.

Para fins de comparação, calculou-se a diferença na EC por espécie obtida na posição social dominante (IEC 1) considerando árvores com área de projeção da copa (APC) de 100 m<sup>2</sup> e 300 m<sup>2</sup> (300 m<sup>2</sup> = Moda da APC entre as espécies). O valor resultante foi redimensionado em pontos percentuais tomando como referência o valor máximo da EC de Cedrela. Os resultados foram apresentados na Figura 16.





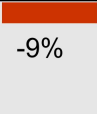

	Cedrela		Amburana		Copaifera		Swietenia	
	100 m <sup>2</sup>	300 m <sup>2</sup>	100 m <sup>2</sup>	300 m <sup>2</sup>	100 m <sup>2</sup>	300 m <sup>2</sup>	100 m <sup>2</sup>	300 m <sup>2</sup>
Redução da EC, em %*	0%	0%	 -41%	 -44%	 -40%	 -29%	 -9%	 -50%
EC de Cedrela	0,75	0,34	0,75	0,34	0,75	0,34	0,75	0,34
Valor observado	0,75	0,34	0,44	0,19	0,45	0,24	0,68	0,17

FIGURA 16 - Diferença da eficiência da copa em árvores dominantes (IEC=1) com 100 e 300 m<sup>2</sup> de área de projeção da copa. EC=eficiência da copa. \*Em comparação com valor máximo da EC obtido de Cedrela.

Quando comparados com Cedrela, os dados mostraram uma maior diferença da EC em Swietenia para indivíduos que frequentemente ocupam maiores espaços na floresta (300 m<sup>2</sup>) seguidos de Amburana. Por outro lado, as árvores de Copaifera apresentaram a menor diferença e, portanto, uma eficiência mais próxima de Cedrela. Este resultado indicou que as árvores de Swietenia que ocupam 300 m<sup>2</sup> são as menos eficientes no crescimento, seguido de Amburana.

#### 4.3.3 Eficiência da copa (EC) e o conceito de Assmann

Do exposto acima surge a pergunta do porquê as árvores de Cedrela foram mais eficientes no crescimento em área basal? Para responder a essa questão realizou-se uma análise baseada no conceito de Assmann (1970), que para uma determinada posição social, as árvores de menor área de projeção da copa (APC) são mais eficientes por possuírem uma maior superfície de luz (maior manto de copa). Este conceito está associado ao pressuposto de que a maior parte das folhas fotossinteticamente ativas, e que realmente influenciam o crescimento, estão localizadas na superfície da copa. Portanto, as árvores pequenas compensariam o menor diâmetro de copa aumentando o comprimento da copa, resultando valores pequenos do formal de copa (dc/cc), conseqüentemente, compensando a área fotossintética.

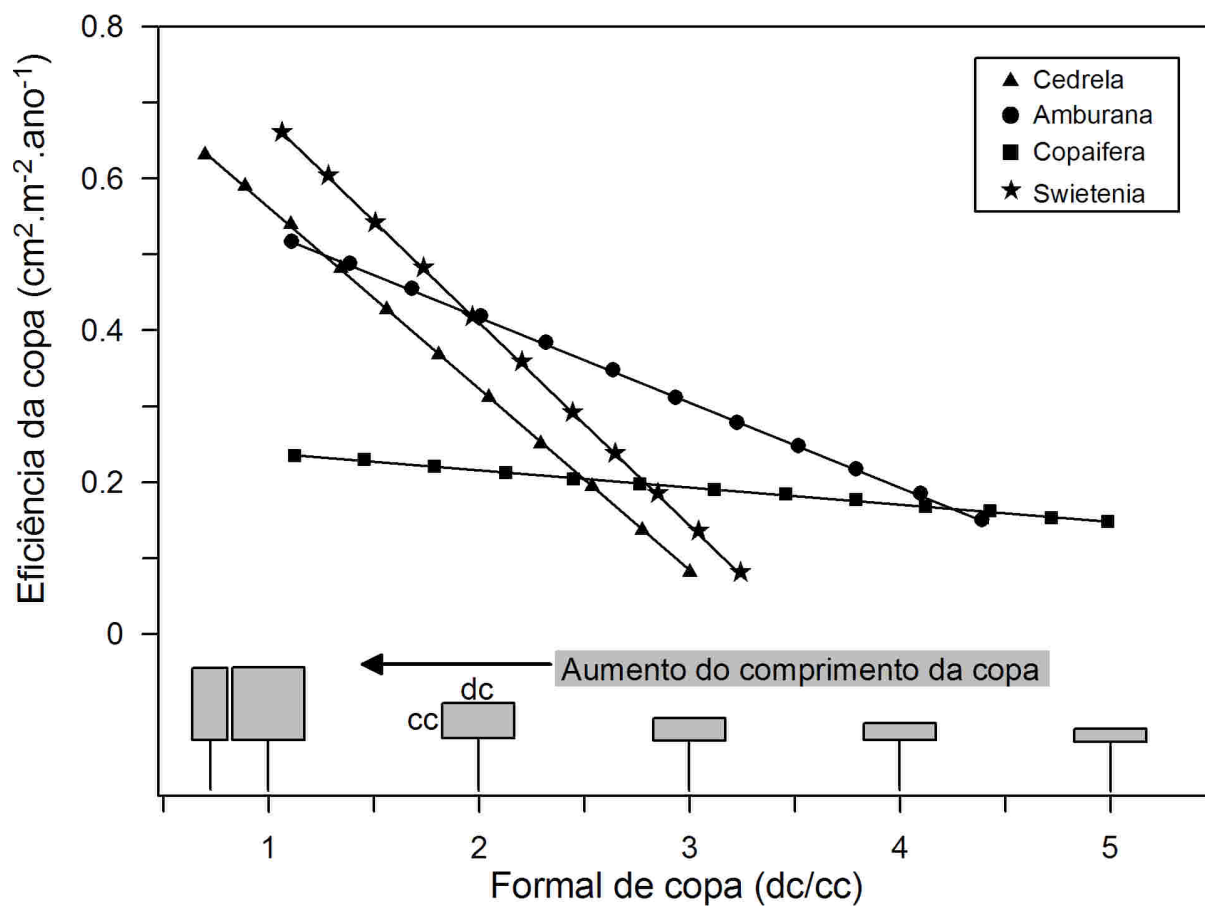


FIGURA 17 - Diminuição da produção média do incremento em área basal com a diminuição do formal da copa por espécie.

Este conceito foi evidenciado na Figura 17 que mostrou um decréscimo significativo da eficiência da copa quando relacionado com o formal de copa, desde que para um mesmo diâmetro de copa as árvores de maior eficiência possuíam maior comprimento de copa e, conseqüentemente, maior manto de copa, comprovando novamente o conceito de Assmann (1970).

Desta forma, o menor valor médio do formal de copa para Cedrela justificou a maior eficiência da copa pela espécie (média de dc/cc=1,5; 2,4; 2,9 e 2,2 para Cedrela, Amburana, Copaifera e Swietenia, respectivamente).

No contexto de formação de diretrizes para o manejo florestal, a análise das linhas-específicas da Figura 17 indicou ser factível manter, o quanto possível, as árvores com um formal de copa pequeno, ou seja, manter suas copas sempre estreitas e longas. Isto seria possível mediante o manejo do espaçamento das árvores vizinhas de tal forma que as mesmas não entrem em forte competição.

#### 4.4 Crescimento e carga de lianas na copa de Cedrela

Ao avaliar a Figura 14, observou-se que uma parte da variação do crescimento em área basal esteve associada a outras fontes de variação, visto que, algumas árvores amostradas em ambiente de sombra (IEC3) cresceram a taxas médias próximas às encontradas em árvores sob condições de luz plena (IEC1). Devido a isto, a avaliação de outros pontos, que pudessem explicar parte dessa variação, foram questionados, tais como: a) as espécies apresentam certa tolerância à sombra; (b) a variação na taxa de crescimento pode ter refletido danos na copa (e.g. PACIOREK et al., 2000) ou (c) pode estar associado à carga de lianas na copa (e.g. MEER; BONGERS, 1996a). O item “c” foi analisado somente em Cedrela, pois nas demais espécies a ocorrência de lianas nas copas não foi suficiente (cf. Tabela 2) para realizar a Análise de Variância (ANOVA).

Os resultados da ANOVA para o efeito da carga de lianas na copa sobre o incremento (IPAg) mostraram que as árvores de Cedrela apresentaram menores taxas de crescimento quanto maior a ocupação de lianas ( $P > F = 0,0004$ ), sugerindo que parte da variação desconhecida, observada no IPAg para uma mesma classe de diâmetro, poderia estar associada à presença/ausência de lianas na copa. O contraste de médias indicou que, árvores de Cedrela com a copa altamente infestada por lianas cresceram, em média, 50% menos do que árvores livres de lianas (FIGURA 18). Este resultado está em concordância com investigações anteriores que provaram diminuição da taxa de crescimento em árvores com alto grau de carga de lianas na copa (PUTZ, 1984a; LADWIG; MEINERS, 2009; INGWELL et al., 2010).

Entretanto, Kainer et al. (2006) demonstraram que a infestação por lianas teve efeito muito fraco ou nenhum no crescimento diamétrico de árvores de castanheira (*Bertholletia excelsa*). Os autores atribuíram esse resultado a diferentes graus de cobertura das folhas da árvore por parte das lianas. Este resultado pode ser consistente, porque simples observações de campo comprovam diferentes camadas de lianas distribuídas dentro da copa da árvore sem necessariamente encobrir as folhas da árvore.

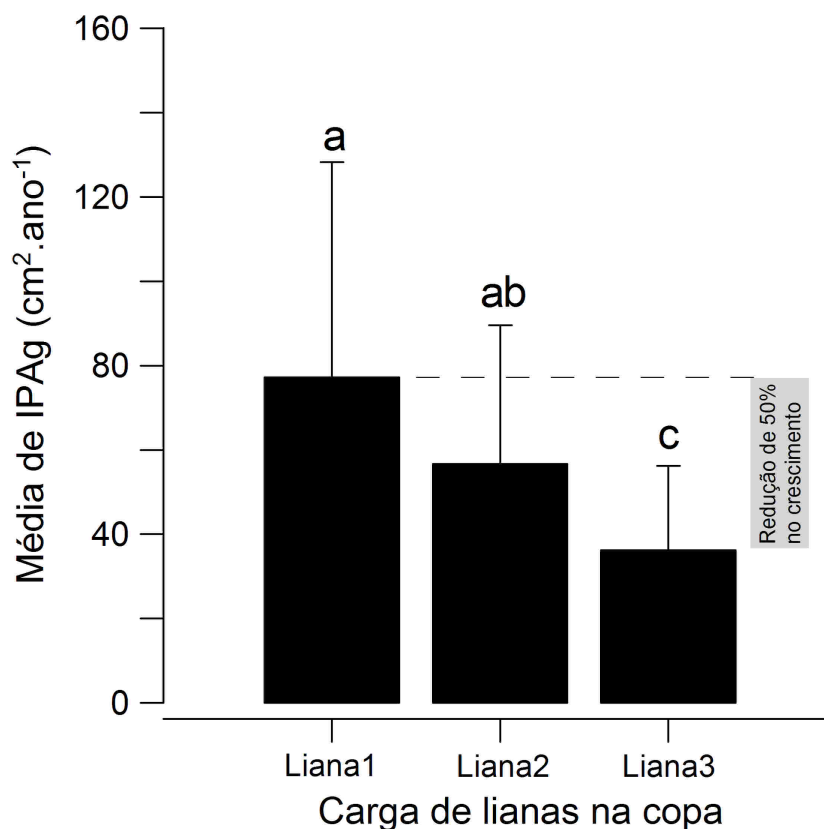


FIGURA 18 - Decréscimo do incremento em área basal (IPAg) de árvores de *Cedrela* com o aumento da carga de lianas na copa: (Liana1) árvores livres de lianas, n=44; (Liana2) árvores com 50% da copa ocupada por lianas, n=55; (Liana3) árvores com  $\geq 75\%$  da copa ocupada por lianas, n=21. Contraste de médias do IPAg entre as cargas de lianas (ajustado por Tukey-Kramer) é indicado por letras acima de cada barra do histograma. Wiskers representam um erro padrão.

Semelhante resultado também foi relatado por Grauel e Putz (2004) quando avaliaram o efeito em árvores de *Priora copaifera*, no Panamá. Além disso, Ladwig e Meiners (2009) encontraram que elevada carga de lianas reduziu o crescimento, porém, o efeito ficou restrito ao grupo de árvores dominantes e codominantes.

Como mencionado, algumas pesquisas provaram o efeito negativo da carga de liana na taxa de crescimento. Porém, somente alguns estudos conduzidos foram desenhados para avaliar a eficiência do corte da liana durante atividades de colheita do manejo florestal. Por enquanto, alguns resultados têm demonstrado que a atividade é onerosa em termos econômicos (SCHNITZER; BONGERS, 2002).

Sob o contexto ecológico, o manejador também deve considerar a importância de flores e frutos das lianas na manutenção da fauna (p.e. KILGORE et al., 2010). Considerando este ponto, recomenda-se prudência durante a operação de corte de



lianas para árvores de Cedrela.

#### **4.5 Modelagem do incremento em área basal (IPAg)**

##### **4.5.1 Comparação entre modelos (LnIPAg vs. IPAg)**

Ao ajustar o modelo Log transformado (expressão 8) e o modelo Gama (expressão 9) aos dados de crescimento considerando todas as espécies em um único grupo, observou-se que as medidas de ajuste diferem entre os modelos devido à função de distribuição de probabilidade e à escala da variável dependente considerada (TABELA 6). Além disso, a quantidade de covariáveis necessárias para explicar a variação de LnIPAg e IPAg também diferiu entre as distribuições, sendo uma a mais o Modelo 1 (abrangência=dc/h).

Apesar de conter menos covariáveis, o modelo de regressão Gama (Modelo 2) explicou a maior parte da variação de IPAg (maior valor do coeficiente de determinação ajustado). O efeito da transformação logarítmica, no ajuste do Modelo 1, foi avaliado quando comparado como modelo normal sem transformação ( $R^2_{aj}=0,310$ ; modelo não mostrado) que inflacionou em 40% o coeficiente de determinação ajustado. Apesar de que, como demonstrado na Figura 8b, a distribuição normal não seria a mais adequada para representar os dados de IPAg.

Neste contexto, McCullagh e Nelder (1989) enfatizaram ocorrer perda de eficiência dum modelo - por exemplo, Normal - quando a verdadeira distribuição não for conhecida e utilizada.

Desta forma, o Modelo 2 de regressão com distribuição Gama foi considerado para modelar os dados de IPAg das espécies.

TABELA 6 - Comparação dos Modelos. Coeficientes de regressão e ajuste estatístico para os Modelos 1 e 2 para o conjunto de dados, considerando todas as espécies agrupadas (Grupo).

Variáveis/Estatísticas	Modelo 1 Modelo Log transformado (LnIPAg)		Modelo 2 Modelo Gama (IPAg)	
	Coeficientes (EP)	$P > t$	Coeficientes	$P > \chi^2$
Intercepto	4,03242 (0,1428)	<0,0001	0,01545 (0,0024)	<0,0001
Comprimento de copa (cc)	0,05027 (0,0081)	<0,0001	-0,00075 (0,0001)	<0,0001
Abrangência (dc/h)	0,32479 (0,0125)	0,0107	-	-
Relação hd (h/d)	-0,93556 (0,2277)	0,0276	0,0150 (0,0043)	0,0004
Competição de Hegyi (IC6)	-0,22363 (0,0320)	<0,0001	0,00734 (0,0011)	<0,0001
Bias	5,66	-	3,56	-
RMSE (cm <sup>2</sup> )	35,38*	-	26,3	-
$R^2_{aj}$	0,437	-	-	-
$R^2_{d,gl}$	-	-	0,517	-

$R^2_{aj}$ =coeficiente de determinação ajustado; \*=valor corrigido pelo Índice de Furnival modificado por Silva e Bailey (1991).

#### 4.5.2 Modelo de regressão Gama (IPAg)

Após diferentes combinações, o Modelo de crescimento específico obtido tem a função média e coeficientes estimados apresentados na Tabela 7. Notou-se que, ao contrário do que sucedeu no modelo 1 em que o sinal da variação do valor esperado foi igual ao sinal do coeficiente de regressão, para o Modelo 2 o sinal é oposto devido à função de ligação canônica inversa (recíproca) utilizada.

O desvio residual (TABELA 7) revelou que o modelo de incremento para cada espécie foi significativo, porque os valores calculados do desvio estão abaixo do valor crítico de  $\chi^2$  com 5% de nível de significância, de acordo aos graus de liberdade para cada espécie.

Em termos de característica biométrica da copa, o modelo selecionou o comprimento de copa (cc) para Cedrela como variável independente. Essa variável foi sensível frente ao efeito da competição e reflete o vigor da árvore (ASSMANN, 1970). Entretanto, cuidados devem ser considerados quanto ao uso da variável

comprimento de copa, pois a mesma é de difícil obtenção devido à dificuldade de delimitar a base da copa em árvores folhosas que comumente são assimétricas.

A atuação da variável diâmetro de copa ( $dc$ ), incluída no Modelo 2, foi decisiva para explicar a variação do crescimento para a maioria das espécies (Amburana, Copaifera e Swietenia; cf. TABELA 7). Ambas as variáveis são simples medidas da dimensão da copa, mas que proporcionam uma “medida” da capacidade fotossintética da árvore e que, por esta razão, tiveram prioridade em permanecer no vetor de covariáveis que expressam o tamanho da árvore. Os coeficientes de regressão associados às variáveis da copa foram positivos, resultando aumento da taxa de crescimento em área basal (IPAg) com o aumento da dimensão da copa. Do ponto de vista biológico, estes resultados são consistentes, uma vez que a dimensão da copa também é um indicador da produção bruta potencial da árvore e tem relação estreita com a superfície foliar (p.e. COLE; LORIMER, 1994).

O Modelo 2 também mostrou que a combinação linear entre as variáveis de tamanho da árvore (que gerou os índices morfométricos) propiciou uma contribuição útil para a explicação do comportamento biológico do incremento em área basal (IPAg), desde que os índices morfométricos selecionados também expressam a capacidade fotossintética da árvore como a proporção da copa ( $cc/h$ ), selecionado para árvores de Cedrela; o índice de abrangência ( $dc/h$ ) para Amburana que também é um indicador do espaço necessário para o crescimento da árvore à medida que aumenta a altura total.

A variável que expressa relação  $hd$  da árvore ( $h/d$ ) foi significativa para Cedrela e Amburana. Essa medida tem relação indireta com o crescimento das árvores, pois, de certa forma, expressa o grau de tolerância de uma determinada espécie (TOUMEY, 1949; KOZLOWSKI, 1971). Assim, para uma mesma altura, uma árvore crescendo livre de competição terá menor valor  $h/d$  do que uma árvore crescendo sob competição (maior valor de  $h/d$ ). Isto justifica a significativa relação negativa entre o IPAg e essa variável.

Nenhuma covariável transformada foi avaliada no modelo 2, devido a que o gráfico de dispersão de IPAg com as mesmas (APÊNDICE 2) mostrou comportamento linear entre ambas as variáveis, descartando a inclusão de variáveis quadráticas no modelo, por exemplo.

TABELA 7 - Coeficientes de regressão em escala recíproca e ajuste estatístico do modelo de incremento Gama (expressão 8).

Covariáveis	Espécies avaliadas							
	Cedrela		Amburana		Copaifera		Swietenia	
	Estimado (erro padrão)	Pr> t	Estimado (erro padrão)	Pr> t	Estimado (erro padrão)	Pr> t	Estimado (erro padrão)	Pr> t
Intercepto	-0,05564 (0,01523)	0,0004	0,01811 (0,00811)	0,0314	0,02822 (0,00443)	<0,0001	0,01992 (0,00262)	<0,0001
Diâmetro (d)	0,000499 (0,00011)	<0,0001	-	-	-	-	-	-
Diâmetro de copa (dc)	-	-	-0,00153 (0,00029)	<0,0001	-0,00048 (0,00021)	0,0519	-0,00031 (0,00012)	0,0119
Comprimento de copa (cc)	-0,00286 (0,00059)	<0,0001	-	-	-	-	-	-
Abrangência (dc/h)	-	-	0,03532 (0,01149)	0,0041	-	-	-	-
Proporção de copa (cc/h)	0,07213 (0,01983)	0,0004	-	-	-	-	-	-
Relação hd (h/d)	0,07702 (0,01679)	<0,0001	0,01727 (0,00952)	0,0769	-	-	-	-
Competição de Hegyi (IC6)	0,008520 (0,00143)	<0,0001	0,00501 (0,00213)	0,0187	0,006822 (0,00316)	0,0403	0,005962 (0,00272)	0,0335
Liana2	0,004059 (0,00126)	0,0018	-	-	-	-	-	-
Liana3	0,01282 (0,00271)	<0,0001	-	-	-	-	-	-
Desvio residual	18,6		5,6		11,0		10,9	
Bias	2,3		1,8		8,3		5,7	
RMSE (cm <sup>2</sup> )	27,4		12,9		21,1		23,3	
$R^2_{D,gl}$	0,623		0,613		0,246		0,371	
$\Delta R^2_{D,gl}^*$	0,449		0,575		0,186		0,244	

$R^2_{D,gl}$ =coeficiente de determinação generalizado para a distribuição Gama e ajustado pelos graus de liberdade (gl); \*=coeficiente de determinação parcial desconsiderando o efeito da competição de Hegyi no modelo.

O vetor que incluiu o *status* competitivo medido pelo índice de Hegyi modificado (IC6) foi significativamente diferente de zero quando avaliado no modelo de regressão Gama para as quatro espécies (TABELA 7). Este efeito atuou como regulador do incremento das árvores, uma vez que apresentou valores negativos para os coeficientes de regressão (para o Modelo Gama o sinal dos coeficientes de regressão é oposto devido à função de ligação inversa utilizada), colaborando para aumentar o poder preditivo do modelo de incremento, visto que sua inclusão aumentou a proporção da variação explicada de 0,449 para 0,623 no IPA<sub>g</sub> de *Cedrela* (cf. TABELA 7).

Para *Swietenia*, a inclusão da competição proporcionou um aumento de 52% no coeficiente de determinação (0,244 para 0,371).

Esses resultados mostram que a competição ajuda a prever o incremento em área basal e realça a necessidade de considerar a competição em modelos de crescimento de árvores individuais.

Vários estudos de crescimento de árvores em nível de povoamento (BIGING; DOBBERTIN, 1995) e em árvore individual (HASENAUER; MONSERUD, 1996; MONSERUD; STERBA, 1996; STERBA et al., 2002) mostraram que o incremento diminui com o aumento da competição. Em pesquisa para a modelagem da área basal de 26 espécies na Áustria, Monserud e Sterba (1996) utilizaram variáveis de tamanho, competição e de sítio (topografia, tipo de solo, etc.) e determinaram que as variáveis de tamanho (raio e diâmetro de copa) incluídas no modelo ajustado, contribuíram em maior grau para explicar a variação do incremento em área basal (35,9%). Outro grupo de variáveis importantes foi oriundo da competição (9,8%), seguido do grupo de variáveis derivadas do sítio (1,3%) para espécies folhosas.

Diante disso, Foli et al. (2003) salientaram que o uso de índices de competição em modelos de crescimento deve ser considerado para a modelagem do crescimento em floresta tropical.

#### 4.5.3 Comportamento do modelo de regressão Gama

Como observado na Figura 19a, com poucas variáveis, o modelo de crescimento abrangeu grande parte da variação nos dados de IPA<sub>g</sub> observado para *Cedrela* (não mostrado para as demais espécies). Isto se deve, em parte, à distribuição Gama e à função de ligação utilizada (recíproca) capaz de abranger

grande parte da variação observada em IPAg. Essa distribuição também foi utilizada em pesquisas anteriores para descrever dados de crescimento que apresentavam variância proporcional à média (GEA-IZQUIERDO; CAÑELLAS, 2009; CONTRERAS et al., 2011). A função de ligação recíproca ajusta-se bem a esse tipo de dados, porque liga a variável dependente ao inverso do preditor linear compensando, de certa forma, o aumento da variação com o aumento do tamanho da árvore.

Os limites dos intervalos de confiança, superior e inferior, mostraram abrangência dos valores estimados de IPAg em Cedrela. Esta foi a espécie que apresentou a maior variação de IPAg observado (linha descontínua da FIGURA 19a). A inspeção gráfica dos resíduos generalizados mostrou distribuição constante e permitiu descartar evidência de heterocedasticidade e a ocorrência de observações discrepantes (APÊNDICE 3) o que reforça a eficiência da função de ligação utilizada.

A Figura 19b mostrou a boa *performance* do Modelo 2 (Expressão 9) em representar o IPAg para as quatro espécies. Para árvores de Cedrela, o modelo explicou 62% da variação do crescimento (IPAg) e 25% para o crescimento de árvores de Copaifera.

O Gráfico 19b também revelou a adequação da função de ligação considerada no Modelo Gama para as espécies desde que os pontos estão dispersos ao longo da linha 45°. Para isto, Cordeiro e Demétrio (2010) mencionam outros testes informais e formais para avaliar a função de ligação utilizada num MLG.

Dentro da perspectiva de predição e medida de ajuste, outros autores encontraram resultados semelhantes com obtidos do Modelo 2 - desta pesquisa. Na Europa, Monserud e Sterba (1996) encontraram um ajuste de  $R^2$  variando entre 19,5 e 63% para o crescimento em área basal de 26 espécies madeiráveis na Áustria e Andreassen e Tomter (2003) encontraram  $R^2$  entre 26 e 55% para floresta na Noruega.

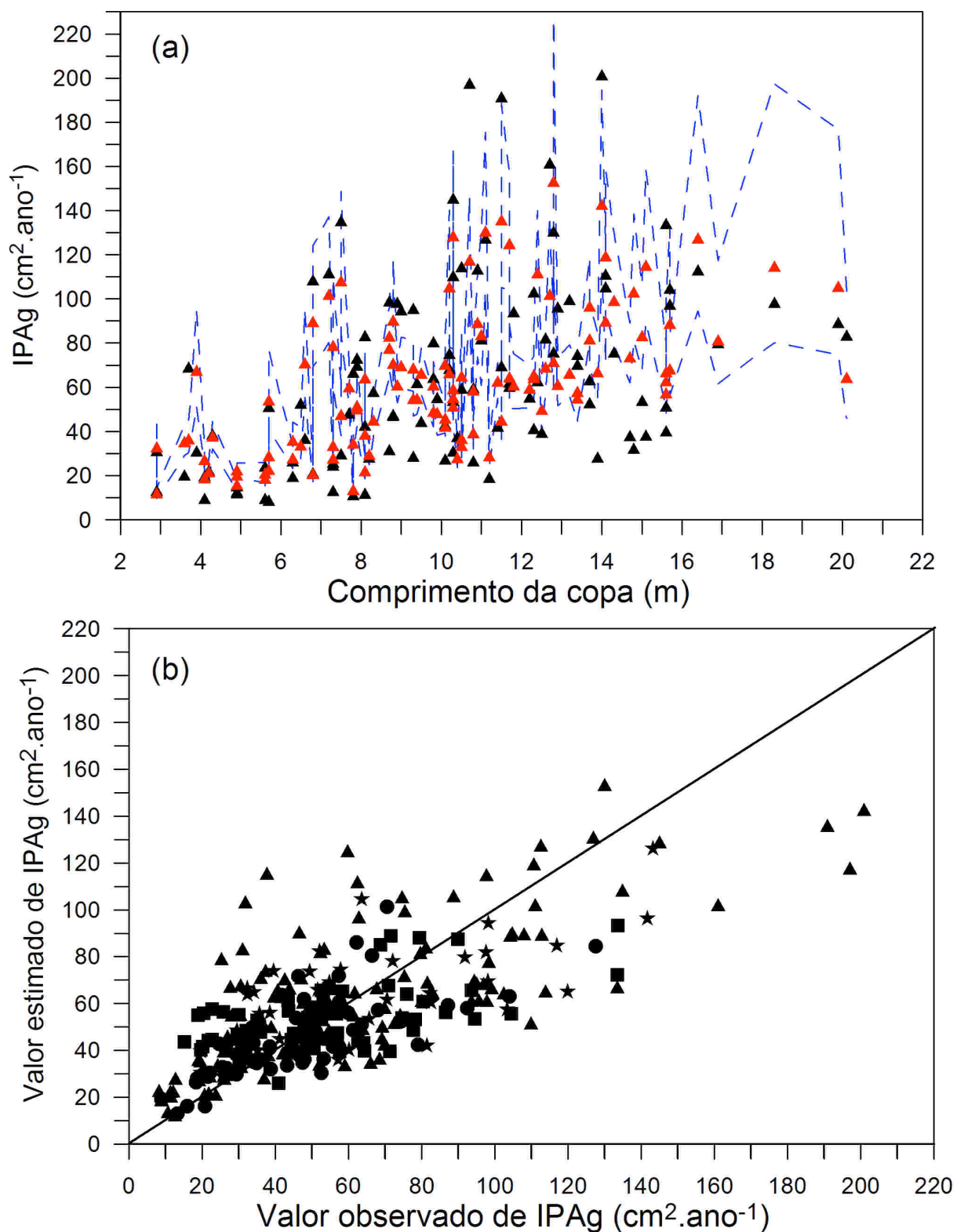


FIGURA 19 - Valores observados (preto) e estimados (vermelho) com limites de confiança superior e inferior (linha descontinua) do modelo Gama de IPAg (Expressão 8) para Cedrela (a). Valores estimados (preto) em função dos observados por espécie (b). (*Cedrela odorata*=triângulo; *Amburana cearensis*=círculos; *Copaifera palpera*=quadrado; *Swietenia macrophylla*=estrela).

Entretanto, o Modelo 2 desta pesquisa utilizou uma distribuição Gama em um contexto de modelagem generalizada, em contraste com os modelos citados acima que utilizaram distribuição normal. Ademais, vale ressaltar que, para parametrizar seus modelos os autores utilizaram mais do que 20 variáveis independentes na Áustria e 14 na Noruega contra apenas 6 para o Modelo 2 desta pesquisa.

Para examinar o comportamento do Modelo 2, o IPAg estimado foi plotado em função do diâmetro da copa para *Amburana*, *Copaifera* e *Swietenia* e em função do comprimento da copa para *Cedrela*, assumindo os valores médios para as demais covariáveis selecionadas. Da mesma forma, foram plotado os valores estimados de IPAg para todas espécies em função da competição pelo índice de Hegyi modificado (FIGURA 20).

Verificou-se que o aumento do diâmetro de copa proporcionou maiores taxas de incremento IPAg para as três espécies, entretanto, em maior proporção para *Amburana*, indicando uma espécie altamente sensível ao aumento do diâmetro de copa se comparada à *Copaifera* e *Swietenia*. Em média, houve uma diferença acentuada de incremento entre *Amburana* e *Swietenia* - cerca de 20 cm<sup>2</sup> - para indivíduos pequenos com diâmetro de copa entre 5 e 10 metros (FIGURA 20). Para *Cedrela*, o comportamento de IPAg estimado perante o aumento do comprimento de copa foi semelhante à *Amburana*.

No contexto competitivo, o aumento da competição pelo índice de Hegyi também proporcionou diferença no comportamento do crescimento de cada espécie. Essa diferença específica foi mais acentuada em nível para árvores com pouca ou nenhuma competição.



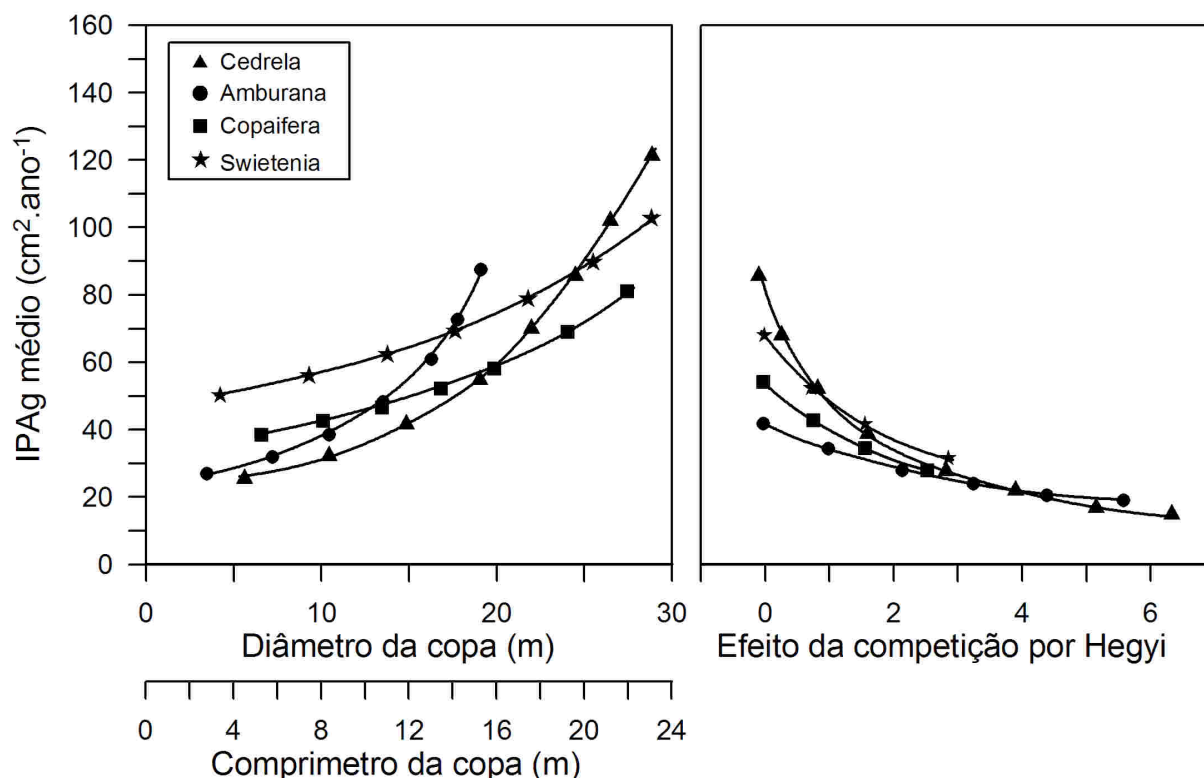


FIGURA 20 - Aumento do incremento periódico anual em área basal (IPAg) estimado por espécie em função do diâmetro e comprimento de copa e decréscimo em função da competição pelo índice de Hegyi.

Frente ao aumento do *status* competitivo as árvores de Amburana demonstraram um decréscimo menos acentuado do incremento. Este comportamento sugeriu que a espécie é a mais tolerante frente a esse efeito comparado com as demais (Cedrela, Swietenia e Copaifera) que mostraram redução mais acentuada do incremento com o aumento da competição exercido por árvores vizinhas (FIGURA 20).

Essa análise colocou em evidência a questão de como justificar a agregação das referidas espécies num único grupo para estimar o crescimento? De fato, a Figura 20 revelou tendências médias semelhantes, porém, com respostas específicas na taxa de incremento estimado, fica claro que o agrupamento de espécies em grupos de crescimento semelhantes deve considerar o comportamento específico, pois do contrário, poderia formar grupos divergentes quanto ao crescimento levando ao aumento do erro de estimativa.

Sem dúvida, a formação de grupos de árvores com crescimento semelhante deve ser considerada, pois levaria a uma maior “praticidade” quando da aplicação de

tratamentos silviculturais, perante a elevada riqueza de espécies arbóreas na Amazônia. Sobre isso, Alder (2000) considerou esse processo como primordial para o desenvolvimento de modelos de crescimento em floresta tropical.

Neste contexto, Vanclay (1991) realizou a formação de grupos específicos considerando atributos do crescimento. Mais tarde, o mesmo autor (VANCLAY, 1994) baseou-se em testes estatísticos (p.e. Teste F) para o agrupamento. Entretanto, embasamentos considerando características ecológicas, como a tolerância à sombra e estratégia de regeneração, também deveriam ser considerados na formação de grupos específicos de crescimento (KARIUKI et al. 2006).

Apesar do número reduzido de espécies (quatro) e de acordo com o comportamento do IPAg estimado, a análise da Figura 20 sugere o não agrupamento das espécies, visto que as mesmas apresentaram comportamento específico da espécie frente às covariáveis avaliadas.

#### **4.6 Por que liberar as árvores?**

Em todas as espécies avaliadas o incremento percentual (IPAg%) também foi influenciado pela posição social da árvore (TABELA 8). Em média os indivíduos das quatro espécies avaliadas mostraram as maiores taxas de incremento percentual quando em posição social dominante (IEC1) que também apresentou grande amplitude do intervalo de confiança.

Consequentemente, a posição social em que as árvores cresceram influenciou no tempo de passagem para a projeção do diâmetro mínimo de corte 50 cm para todas as espécies como mostrado na Tabela 9. Quando os indivíduos de Cedrela estiveram em boa posição social (IEC1), o cálculo do tempo de passagem de 30 para 50 cm mostrou que seriam necessários de 13 a 26,7 anos (intervalo de confiança superior e inferior, respectivamente). Isto mostrou que mesmo em boa condição de iluminação de copa, as árvores apresentaram variação no tempo de passagem calculado.

Baseado nestas estimações de tempo da Tabela 9, durante um ciclo de corte e 25 anos (mínimo estabelecido pela Instrução Normativa 05/2006) em média os indivíduos remanescentes com 30 cm de diâmetro de Cedrela, Amburana e Swietenia teriam alcançado o diâmetro mínimo de corte de 50 cm caso

permanecessem crescendo em posição social dominante (IEC1). Do contrário, os indivíduos de *Amburana*, *Copaifera* e *Swietenia* que permanecessem crescendo com pouca luz na copa (IEC2) não alcançariam o diâmetro mínimo estabelecido durante um ciclo de corte de 25 anos.

Estes resultados mostram claramente que a posição social das árvores tem importantes implicações no contexto de produção de madeira o que justifica os benefícios técnicos da liberação de árvores com copas pouco expostas à luz (p.e. BRIENEN; ZUIDEMA, 2006).

No contexto de densidade da floresta (calculado conforme a Expressão 7) em relação ao incremento percentual em área basal (IPAg%), a Figura 21 evidenciou um comportamento constante até uma densidade de 15-20 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup> com valores médios semelhantes aos obtidos em árvores com baixa densidade de competidores (1-10 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>). Porém, houve decréscimo significativo do IPAg% para árvores objeto amostradas em densidade de competidores maior do que 25 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>, conforme o contraste de médias.

TABELA 8 - Efeito da posição social (IEC) na produtividade em área basal (IPAg%). Os valores de produtividade foram calculados utilizando o incremento em área basal para árvores da classe de diâmetro 30-50 cm.

Espécies	Produtividade (IPAg%)								
	Média			Intervalo confiança superior a 95%			Intervalo confiança inferior a 95%		
	IEC1	IEC2	IEC3	IEC1	IEC2	IEC3	IEC1	IEC2	IEC3
<i>Cedrela odorata</i>	6,1	5,6	2,9	8,2	7,1	4,1	3,9	4,1	1,8
<i>Amburana cearensis</i>	4,1	2,9	-	5,1	3,9	-	3,1	2,0	-
<i>Copaifera palpera</i>	3,7	3,5	-	4,8	4,4	-	2,6	2,5	-
<i>Swietenia macrophylla</i>	4,7	2,8	-	8,5	4,6	-	0,98	1,0	-

TABELA 9 - Efeito da posição social (IEC) na simulação do tempo de crescimento (anos) para a árvore passar de 30 cm para 50 cm. Para o cálculo utilizou-se os valores de produtividade da tabela 8, em escala centesimal, na fórmula da expressão 4.

Espécies	Tempo de passagem (t) em escala anual								
	Média			Intervalo confiança superior a 95%			Intervalo confiança inferior a 95%		
	IEC1	IEC2	IEC3	IEC1	IEC2	IEC3	IEC1	IEC2	IEC3
<i>Cedrela odorata</i>	17,3	18,7	35,7	13,0	14,9	25,4	26,7	25,4	57,3
<i>Amburana cearensis</i>	25,4	35,7	-	20,5	26,7	-	33,5	51,6	-
<i>Copaifera palpera</i>	28,1	29,7	-	21,8	23,7	-	39,8	41,4	-
<i>Swietenia macrophylla</i>	22,2	37,0	-	12,5	22,7	-	104,8	102,7	-

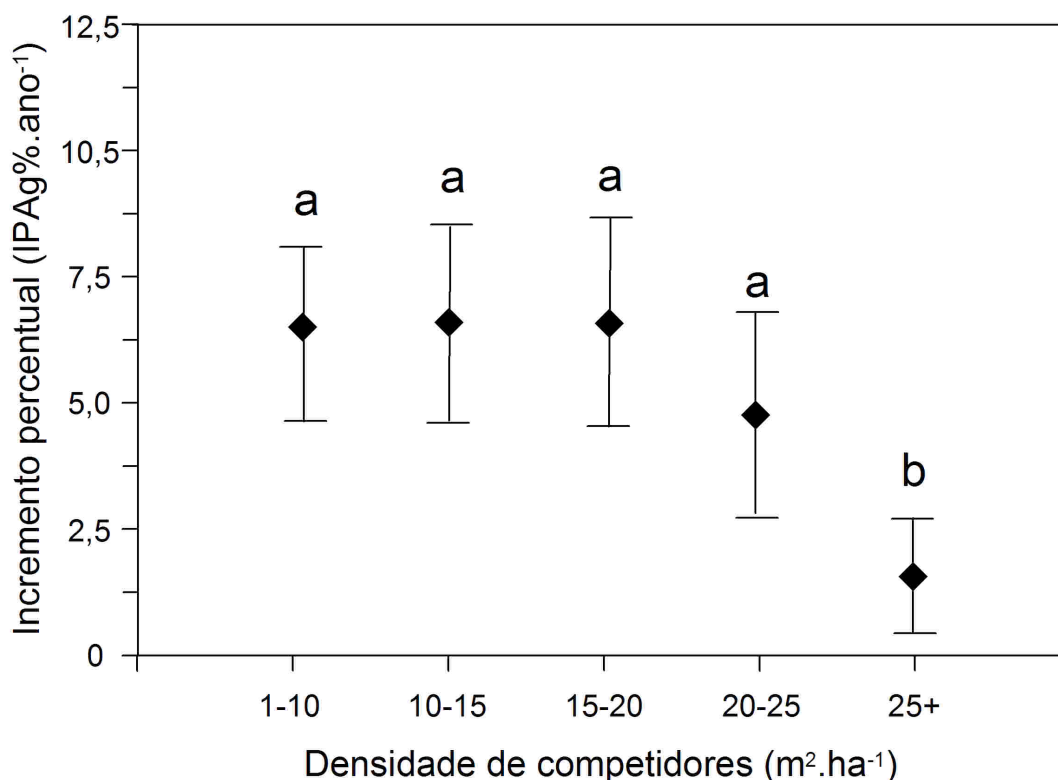


FIGURA 21 - Redução do crescimento de Cedrela, Amburana, Copaifera e Swietenia devido à densidade de árvores competidoras circundante. Média (♦) e intervalo de confiança a 95% são apresentados. O contraste de médias do IPAg% entre as classes de densidade (ajustado por Tukey-Kramer) é indicado por letras. A densidade foi calculada por Spurr empregando a Expressão 7.

Esse efeito da densidade sob o crescimento de árvores tropicais foi resultado de pesquisa, como relatado por Wadsworth (1997), que encontrou aumento substancial do incremento quando a área basal da floresta foi mantida abaixo de 2/3 do seu máximo, resultado de operações de colheita, refinamento ou desbaste.

Um dos efeitos negativos da densidade de competidores refletiu na geometria da copa das árvores objeto. Como observado na Figura 22, o efeito da pressão lateral, decorrente da proximidade de duas árvores vizinhas competidoras (Massaranduba e Jatobá), levou à formação de uma copa assimétrica e à redução significativa da área fotossintética de uma árvore objeto de Cedrela (d=41,2 centímetros e h=24,7 metros).

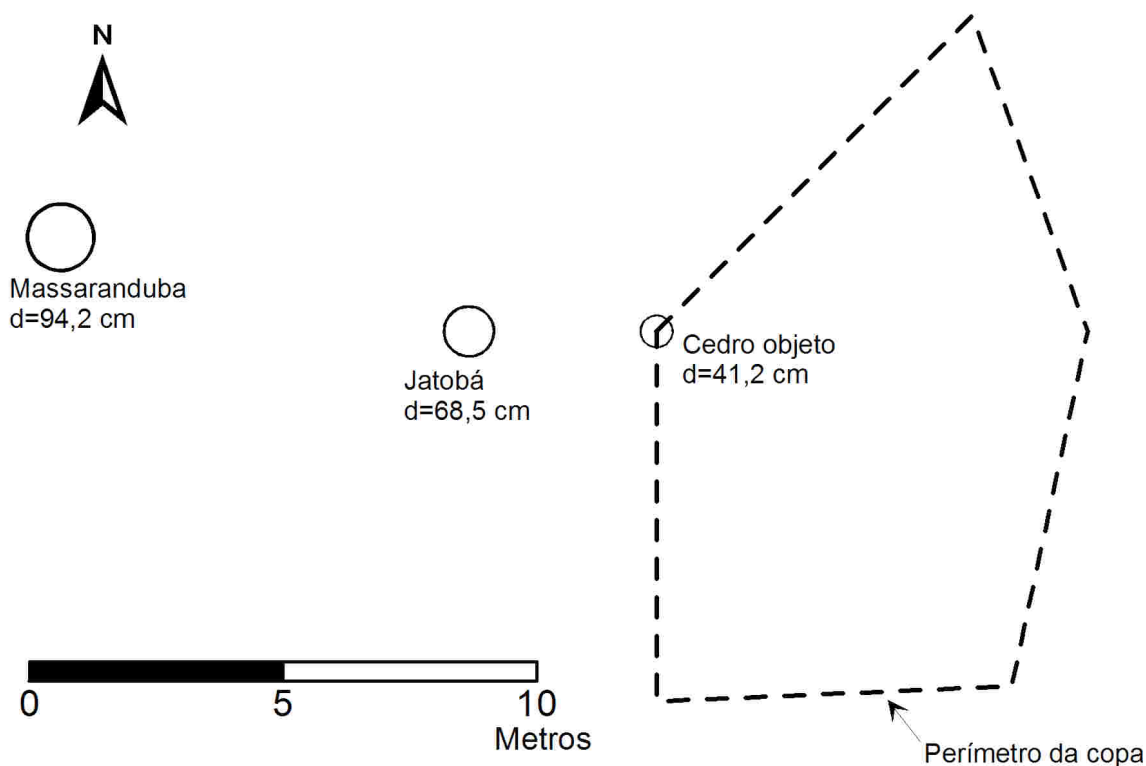


FIGURA 22 - Influência de duas árvores vizinhas competidoras na forma da copa de uma árvore objeto de Cedrela.

Sob estas condições, o *status* competitivo da árvore objeto, calculado pela densidade pontual de Spurr (Expressão 7), equivale a  $33,1 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$  que, de acordo com a Figura 21, esta árvore esteve crescendo, no período avaliado, sob forte influência da densidade. Pelo índice de competição de Hegyi (IC6), o *status* competitivo equivale a 1,52, valor que também levou a uma forte queda do IPAg médio de Cedrela verificado na Figura 20.

#### 4.7 Implicações silviculturais

Apesar de esforços para promover a sustentabilidade da produção de madeira na Amazônia a partir de práticas de manejo florestal, a falta de informação sobre a autoecologia das espécies madeireiras persiste, constituindo-se como um fator limitante para o sucesso do manejo sustentado dos empreendimentos florestais.

Os resultados deste estudo mostraram que o crescimento da árvore depende de variáveis que comumente não são levantadas durante o inventário florestal de

reconhecimento ou mesmo no censo florestal na Amazônia. Certamente, fatores econômicos são responsáveis pela falta de dados necessários para a administração do crescimento da floresta.

Entretanto, com a redução dos custos de levantamento baseados em sensores remotos (p.e. LiDAR) e os sistemas de informações geográficas, poderá se tornar viável a obtenção de informações/variáveis da árvore como atributos da copa (p.e. KATO et al., 2009) e *status* competitivo (p.e. PEDERSEN et al. 2012) em um curto período de tempo e com boa acurácia. Estas informações permitiriam a parametrização de modelos de crescimento que utilizam variáveis de competição dentre outras.

As árvores amostradas em condições de baixa ou nenhuma competição (competição por Hegyi nula) e com copas recebendo luz direta (IEC1), estiveram associadas, de forma significativa, às maiores taxas de crescimento, o que reforça que operações silviculturais são efetivas para aumentar as taxas de crescimento, aplicadas após operações de exploração. Entretanto, é importante considerar diferenças de requerimento ecológico das espécies em relação à luminosidade (p.e. Demandante vs. Tolerante à sombra). Neste estudo, as árvores de *Amburana* apresentaram um comportamento característico de espécie tolerante à sombra, visto que melhores condições de luz não propiciaram as maiores taxas de crescimento (cf. FIGURA 14). Apesar de algumas pesquisas terem demonstrado que algumas espécies tropicais tolerantes à sombra podem alcançar eficiente fotoaclimatação e altas taxas de crescimento em ambientes de sombra, quando na fase de regeneração (KRAUSE et al. 2012).

Por outro lado, árvores de *Cedrela* e *Swietenia* mostraram alta taxa de crescimento, mesmo em indivíduos de grande porte, quando crescendo sob condições de luz direta na copa (IEC1; FIGURA 14). Isto reforça que o delineamento específico e mais direcionado de tratamentos silviculturais deve ser considerado como reportado por Villegas et al. (2009).

No contexto de sustentabilidade da produção de madeira, outros aspectos importantes devem ser considerado como: a) a baixa densidade de algumas espécies, principalmente nas menores classes de diâmetro; b) a distribuição irregular de diâmetros (distribuição etária). Essas situações são comumente verificadas em *Swietenia* devido à dificuldade de encontrar condições necessárias

para promover o estabelecimento e o sucesso da regeneração natural. Grogan et al. (2002), mencionaram condições ideais como: abundância na produção de sementes, altos níveis de luz e nutrientes no solo e baixa competição poderiam promover uma maior densidade de indivíduos de *Swietenia* na Amazônia.

Estas condições, tidas como ideais para o estabelecimento da regeneração, foram motivo de estudo realizado por Soriano et al. (2012), que encontraram alta densidade de indivíduos de *Amburana* e *Swietenia* em clareiras formadas pela queda de árvores da mesma espécie. Os resultados levaram os autores a recomendar que a colheita das árvores deveria coincidir com a época de dispersão de sementes, o que proporcionaria um aumento da regeneração natural da espécie na própria clareira.

Outro ponto deve ser ressaltado, de que as condições de microclima operando na fase de transição da regeneração para árvore juvenil (ALVAREZ-BUYLLA; MARTINEZ-RAMOS, 1992). Portanto, estudos futuros para avaliar o efeito do tamanho da árvore em indivíduos pequenos, menores que 10 cm de diâmetro, proverão maior entendimento, enriquecendo os resultados da Figura 14.

Utilizando os dados do inventário florestal de cada uma das UPAs foi possível avaliar a densidade de indivíduos por hectare (FIGURA 23). Apesar da base de dados não conter indivíduos na classe de diâmetro 10 a 30 cm (durante o inventário florestal 100% essa classe de tamanho não é amostrada), a distribuição de tamanhos (diâmetro) das espécies colocou em evidência o manejo florestal destas devendo-se considerar alguns pontos básicos no quesito sustentabilidade do manejo florestal para estas quatro espécies: a) A tendência das linhas de densidade revelou falta de regeneração ou estabelecimento para as quatro espécies. De fato, a desejada curva em 'J' invertida comumente não ocorre em algumas espécies arbóreas da Amazônia. Isto se deve, principalmente, à alta competição por luz solar que a regeneração sofre (p.e. Apêndice 1C), levando, muitas vezes, ao insucesso do estabelecimento das mesmas. Mas, em conjunto com outras espécies, essa curva pode ser encontrada.

O mesmo resultado foi relatado por Mostacedo e Fredericksen (1999) que consideraram a regeneração inadequada para, praticamente, todas as espécies de madeira valiosa na Amazônia Boliviana.



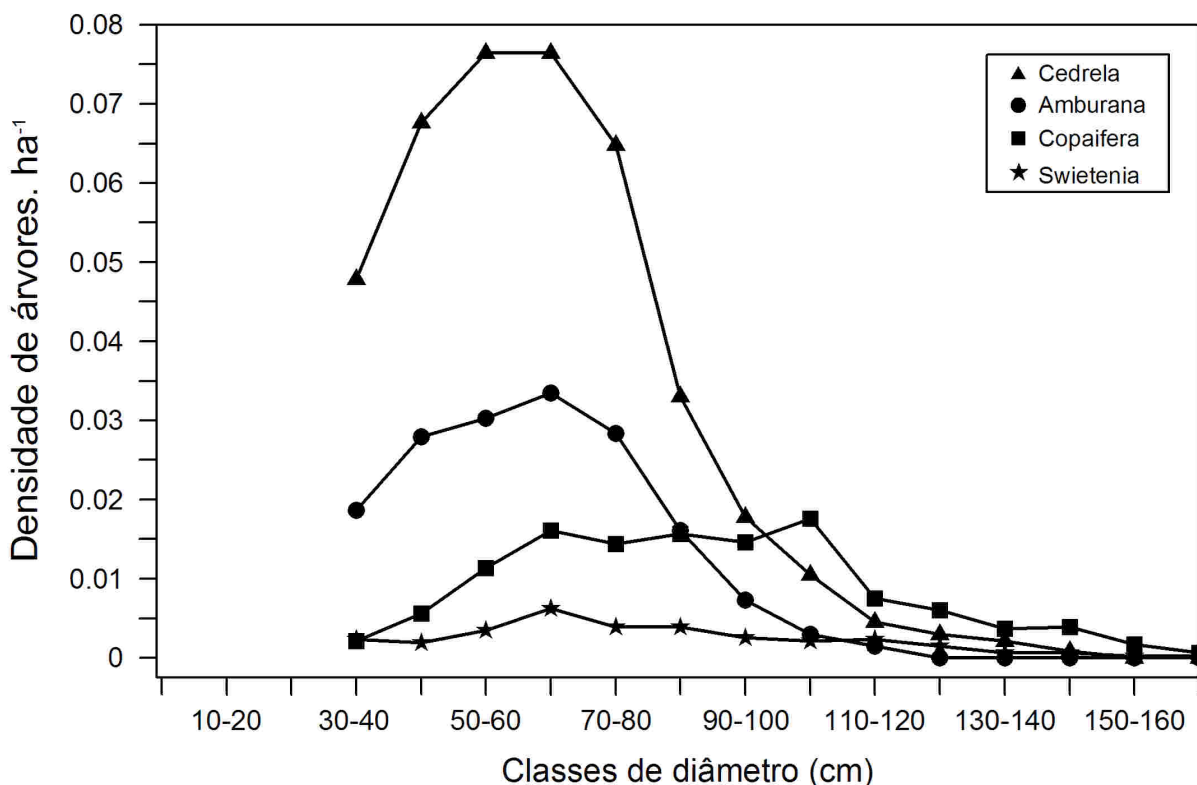


FIGURA 23 - Distribuição de indivíduos por espécie. Área total de 4657 ha.

A baixa densidade de *Swietenia* em toda a distribuição de tamanho (diâmetro) é outro ponto questionável e que justifica a Instrução Normativa 7 específica para a colheita de árvores da espécie. O comportamento da curva de densidade de *Swietenia* coloca em xeque a sustentabilidade econômica de muitos empreendimentos.

Algumas práticas silviculturais, além da Exploração Convencional, foram adotadas em área de manejo florestal na Amazônia oriental com o objetivo de avaliar a sustentabilidade da produção de madeira em diferentes cenários de manejo florestal. Um exemplo é a Exploração de Impacto Reduzido proposto pelo Instituto Floresta Tropical. Vários pesquisadores relataram resultados promissores quando utilizado EIR em comparação à EC nesse cenário, entretanto, a carência de dados efetivos de custos das atividades de EIR é real, mas promissora (MACPHERSON et al. 2012).

## 5 CONCLUSÃO

Esta investigação apresentou análise estatística que apontou para uma série de variáveis capazes de descrever o crescimento em área basal de quatro espécies madeiráveis com ciclo de vida longa e consideradas como de alto valor comercial para empresas do ramo no Estado do Acre: *Cedrela odorata*; *Amburana cearensis*; *Copaifera paupera* e *Swietenia macrophylla*.

O modelo de incremento Gama demonstrou ser adequado para explicar a variação de IPAg e revelou variáveis dendrométricas que englobam grande parte dos efeitos que moldaram a variação observada do incremento em área basal, apresentando boa abrangência dos dados observados em situações onde o crescimento é complexo e variado entre as espécies.

As árvores quando amostradas em boas condições de sítio, expresso por boa exposição da copa à luz solar e, portanto, pouca competição, apresentaram as maiores taxas de incremento periódico anual em área basal (IPAg) do que àquelas encontradas sob forte competição por árvores vizinhas. Além disso, a expectativa de que os melhores indicadores para obter grandes taxas de incremento também foi confirmada pelas variáveis: nível de infestação de lianas na copa de *Cedrela* e as variáveis dendrométricas que expressam o tamanho da árvore. Entretanto, pelos resultados obtidos não é possível afirmar que a redução do crescimento das árvores de *Cedrela* foi causada diretamente pela carga de lianas na copa.

No contexto de produção de incremento em área basal por área ocupada na floresta, representado pela área de projeção da copa, as quatro espécies mostraram ter mais eficiência no crescimento quando em melhor posição social, com copas estreitas e longas, o que definiu um formal de copa pequeno. Entre as espécies, *Cedrela* foi a que mais cresceu no período dado o espaço disponível, por a apresentar maior comprimento de copa em relação ao diâmetro de copa, com menor valor médio do formal de copa. Este comportamento reforça a importância da liberação das árvores, proporcionando-lhes melhor exposição da copa à luz solar e controlando seu formal de copa. Este critério pode ser utilizado na tomada de decisão para o manejo das espécies.

Embora o modelo de crescimento em área basal seja um componente fundamental para planejar o crescimento das florestas e muitos sistemas de

predição da produção teriam aplicabilidade restrita sem a modelagem de outra dimensão estimável como crescimento em altura, ingresso das classes de diâmetro, mortalidade e regeneração. Entretanto, no ambiente Amazônico a obtenção de dados confiáveis do crescimento em altura é tarefa difícil de ser estudado.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACRE. **Programa Estadual de Zoneamento Ecológico-Econômico do Acre**. Zoneamento ecológico-econômico do Acre fase II: documento síntese. escala 1:250.000. Rio Branco, AC: Secretaria de Estado de Planejamento e Desenvolvimento Econômico Sustentável, 2006. 354 p.

ADAME, P. et al. Individual-tree diameter growth model for rebollo oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) coppices. **Forest Ecology and Management**, v. 255, p.1011-1022, 2008.

ALDER, D. **Estimación del volume forestal y predicción del redimiento**: con referencia especial a los trópicos. Roma: FAO: MONTES, 1980. 80 p.

ALDER, D. An empirical cohort model for management of Terra Firme forest in the Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 130, p. 141-157, 2000.

ALVAREZ-BUYLLA, E.R.; MARTINEZ-RAMOS, M. Demography and allometry of *Cedropia obtusifolia*, a neotropical pionner tree-an evaluation of the climax-pionner paradigm for tropical rain forest. **Journal of Ecology**, v. 80, p.275-290, 1992.

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, 2003.

ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. Oxford: Pergamon Press, 1970, 506 p.

BARNETT, J.R. Reactivation of the cambium in *Aesculus hippocastanum* L.: a transmission electron microscope study. **Annals of Botany**, v. 70, p. 169-177, 1992.

BIGING, G.S.; DOBBERTIN, M. Evaluation of competition indices in individual tree growth models. **Forest Science**, v. 41, p. 360-377, 1995.

BOIVIN, F. et al. Do position and species identity of neighbours matter in 8-15-year-old post harvest mesic stands in the boreal mixedwood? **Forest Ecology and Management**, v. 260, p. 1124-1131, 2010.

BORMANN, F.H.; BERLYN, G. **Age and growth rate of tropical trees**: New directions for research. New Haven: Yale University, School of Forestry and Environmental Studies, 1981. (Bulletin no. 94).

BREITSPRECHER, A.; BETHEL, J. Stem-growth periodicity of trees in a tropical wet forest of Costa Rica. **Ecology**, v. 71, p. 1156-1164, 1990.

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.

BRIENEN, R.J.W.; ZUIDEMA, P.A. Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forest: a test for six species using tree ring analysis. **Oecologia**, v. 89, p. 105-119, 2005.

BRIENEN, R.J.W.; ZUIDEMA, P.A. Lifetime growth patterns and ages of Bolivian rain forest trees obtained by tree ring analysis. **Journal of Ecology**, v. 94, p. 481-493, 2006.

BRIFFA, K.R. et al. A 1400 year tree ring record of summer temperatures in Fennoscandia. **Nature**, v. 346, p. 434-439, 1990.

CANHAM, C.D. et al. A neighbourhood analysis of canopy tree competition: effects of shading versus crowding. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 34, p. 778-787, 2004.

CATESSON, A.M. Cambial ultrastructure and biochemistry: changes in relation to vascular tissue differentiation and the seasonal cycle. **Journal of Plant Science**, v. 155, p. 251-261, 1994.

CHOI, J. et al. A crown model for simulating long-term stand and gap dynamics in northern hardwood forests. **Forest Ecology and Management**, v. 152, p.235-258, 2001.

CLARK, D.A., CLARK, D.B. Life history diversity of canopy and emergent trees in a neotropical rainforest. **Ecological Monographs**, v. 62, p. 315-344, 1992.

CLARK, D.A.; CLARK, D.B. Assessing the growth of tropical rain forest trees: issues for forest modeling and management. **Ecological Applications**, v. 9, p. 981-997, 1999.

CLARK, J.S. Ecological forecasts: An emerging imperative. **Science**, v. 293, p. 657-660, 2001.

COLE, W.G.; LORIMER, C.G. Predicting tree growth from crown variables in managed northern hardwoods stands. **Forest Ecology and Management**, v. 67, p. 159-175, 1994.

CONDÉS, S.; STERBA, H. Derivation of compatible crown width equations for some important tree species of Spain. **Forest Ecology and Management**, v. 217, p. 203-218, 2005.

CONTRERAS, M.A. et al. Evaluating tree competition indices as predictors of basal area increment in western Montana forests. **Forest Ecology and Management**, v. 262, p.1939-1949, 2011.

CORDEIRO, M.G.; DEMÉTRIO, C.G.B. **Apostila Modelos lineares generalizados e extensões**. 255 p. 2010.

COSTER, C. Zur Anatomie und Physiologie der Zuwachszonen und Jahresringbildung in den Tropen I. **Annales du Jardin botanique Buitenzorg**, v. 37, p. 49-161, 1927.

da CUNHA, A.T. **Modelagem do incremento de árvores individuais de Cedrela odorata L. na floresta Amazônica**. 2009. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

DANIELS, R.F. Simple competition indices and their correlation with annual loblolly pine tree growth. **Forest Science**, v. 22, p. 454-456, 1976.

- DANIELS, R.F. et al. comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. **Canadian Journal for Forest Research**, v. 16, p. 1230-1237, 1986.
- DAVIS, L. S.; JOHNSON, N. **Forest management**, McGraw Hill, 1987, 790 p.
- DAVIES, S.J. et al. Comparative ecology of 11 sympatric species of *Macaranga* in Borneo tree distribution in relation to horizontal and vertical resource heterogeneity. **Journal of Ecology**, v. 86, p.662-673, 1998.
- DAWKINS, H. C. Crown diameters: their relationship to bole diameter in tropical trees. **Commonwealth Forest Review**, v.42, p. 318-333, 1963.
- DENNE, M. P. Temperature and tracheid development in *Pinus sylvestris* seedlings. **Journal of Experimental Botany**, v. 22, p. 362-370, 1971.
- DÉTIENNE, P. Appearance and periodicity of growth rings in some tropical woods. **IAWA Journal**, v.10, p. 123-132, 1989.
- DIMOV, L.D. et al. Five-year radial growth of red oaks in mixed bottomland hardwood stands. **Forest Ecology and Management**, v. 255, p. 2790-2800, 2008.
- DÜNISCH, O. et al. Cambial growth dynamics and formation of increment zones in the xylem of *Swietenia macrophylla* King., *Carapa guianensis* Aubl., and *Cedrela odorata* L. (Meliaceae). **IAWA Journal**, v. 23, p. 101–119, 2002a.
- DÜNISCH, O. et al. Dendroecological investigations on *Swietenia macrophylla* King and *Cedrela odorata* L. (Meliaceae) in the central Amazon. **Trees-Structure and Function**, v. 17, p. 244-250, 2003.
- DURLO, M.A. **Zuwachsuntersuchungen und Einzelbaum- wachstumsmodelle für *Cabralea Glaberrima*, *Cedrella Fissilis* und *Cordia Trichotoma* in sekundären Laubmischwäldern Süd- brasiliens**. 1997. p. 198 Tese de doutorado - Universität für Bodenkultur Wien, Vienna, Austria.
- DURLO, M.A.; DENARDI, L. Morfometria de *Cabralea canjerana*, em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul, **Ciência florestal**, v. 8, p. 55-66, 1998.
- FICHTLER, E. et al. Climatic signals in tree rings of *Burkea africana* and *Pterocarpus angolensis* from semiarid forests in Namibia. **Trees-Structure and Function**, v. 18, p. 442-451, 2004.
- FINGER, C.A.G. Fundamentos da biometria Florestal, Santa Maria UFSM 1992, 269 p.
- FINGER, C. A. G. **Apostila de crescimento e produção florestal**. 2010, p. 123.
- FOLI, E. G. et al. Modelling growing space requirements for some tropical forest tree species, **Forest Ecology and Management**, v. 173, p 79-88, 2003.
- FOX, J.C. et al. Modelling Spatial Dependence in an Irregular Natural Forest. **Silva Fennica**, v. 42, p. 35-48, 2008.
- FRITTS, H. C. **Tree rings and climate**. London: Academic Press, 1976, 567 p.

- GEA-IZQUIERDO, G.; CAÑELLAS, I. Analysis of Holm Oak intraspecific competition using Gamma regression. *Forest Science*, v. 55, p. 310-322, 2009.
- GRAUEL, W.T.; PUTZ, F.E. Effects of lianas on growth and regeneration of *Prioria copaifera* in Darien, Panama. **Forest Ecology and Management**, v. 190, p.99-108, 2004.
- GRISCOM, H.P.; ASHTON, M.S. Restoration of dry tropical forests in Central America: A review of pattern and process. **Forest Ecology and Management**, v. 261, p.1564-1579, 2011.
- GROGAN, J. et al. **Mogno na Amazônia Brasileira: Ecología e Perspectiva de Manejo**. IMAZON, p. 42, 2002.
- HASENAUER, H.; MONSERUD, R. A. A crown ratio model for Austrain forests. **Forest Ecology and Management**, v. 84, p. 49–60, 1996.
- HEGYI, F. **A simulation model for managing jackpine stands**. In: Fries, J. (Ed.), Proceedings of IUFRO meeting on Growth models for tree and stand simulation, Royal College of Forestry, 1974.
- HEMERY, G. E.; SAVILL, P. S.; PRYOR, S. N. Applications of the crown diameter – stem diameter relationship for different species of broadleaved trees. **Forest Ecology and Management**, v. 215, p.285-294, 2005.
- HUGHES, M.K. et al. A preliminary reconstruction of rainfall in north-central China since A.D. 1600 from tree ring density and width. **Forestry**, v. 42, p. 88–99, 1994.
- IMAC, **Relatorio de atividades desenvolvidas**. Divisão de Manejo Florestal. p. 17, 2010
- INGWELL, L.L. et al. The impact of lianas on 10 years of tree growth and mortality on Barro Colorado Island, Panama. **Journal of Ecology**, v. 98, p. 879-887, 2010.
- JOBIDON, R. Light threshold for optimal black spruce (*Picea mariana*) seedling growth and development under brush competition. **Canadian Journal of forest research**, Ontario, v. 24, p. 1629 – 1635, 1994.
- 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, p.147–154, 2006.
- KARIUKI, M. et al. Diameter growth performance varies with species functional-group and habitat characteristics in subtropical rainforests. **Forest Ecology and Management**, v. 225, p. 1-14, 2006.
- KATO, A. et al. Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne LiDAR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p.1148-1162, 2009.
- KIENAST, F. et al. Tree-ring studies on conifers along ecological gradients and the potential of single-year analyses. **Canadian Journal of forest research**, v. 17, p. 683–696, 1987.

KILGORE, A. et al. Lianas influence fruit and seed use by rodents in a tropical forest. **Tropical Ecology**, v. 51, p.265-271, 2010.

KIVISTE, A. K. **Mathematical Functions of Forest Growth**. Estonian Agricultural Academy, Tartu, 1988. 108 p.

KRAUSE, G.H. et al. Photosynthesis, photoprotection, and growth of shade-tolerant tropical tree seedlings under full sunlight. **Photosynthesis research**. v. 113, p. 273-285, 2012.

KOZLOWSKI, T. T. **Growth and development of trees: Cambial growth, root growth, and reproductive growth**. Academy press, New York, p. 514, 1971.

LADWIG, L.M.; MEINERS, S.J. Impacts of temperate lianas on tree growth in young deciduous forest. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p.195-200, 2009.

LANG, G. E.; KNIGHT, D. H. Tree growth, mortality, recruitment, and canopy gap formation during a 10 year period in a tropical moist forest. **Ecology**, v. 64, p. 1075-1080, 1983.

LAROCQUE, G. R. Examining different concepts for the development of a distance-dependent competition model for red pine diameter growth using long-term stand data differing in initial stand density. **Forest Science**, v. 48, p. 24-34, 2002.

LIEBERMAN, M.; LIEBERMAN, D. Simulation of growth curves from periodic increment data. **Ecology**, v. 66, p. 632-635, 1985.

LINDSEY, J K. **Applying Generalized Linear Models**. New York: Springer – Verlag, 1997, 282p.

LOPES, S.C.F. **Modelação matemática da distribuição de diâmetros em povoamentos de pinheiro bravo**. 2001. 102 p. Dissertação (Mestrado em Biologia Florestal) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

LORIMER, C.G. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. **Forest Ecology and Management**, v. 6, p. 343-360, 1983.

MCCULLAGH, P.; J.A. NELDER. Generalized linear models. Chapman & Hall, London, UK, p. 532, 1989.

MACPHERSON, A.J. et al. The sustainability of timber production from Eastern Amazonian forests. **Land Use Policy**, v.29, p.339–350, 2012.

MARIAUX, A. Les Cernes Dans les Bois Tropicaux Africains, Nature et périodicité. **Bois et Forêts des Tropiques**. v.114, p. 23-37, 1967.

MARTINS-DA-SILVA, R.C.V. et al. O gênero *Copaifera* (Leguminosae-Caesalpinioideae) na Amazônia brasileira. **Rodriguésia**, v. 59, p.455-476, 2008.

MEER, P.J.; BONGERS, F. Patterns of tree-fall and branch-fall in a tropical rain forest in French Guiana. **Journal of Ecology**, v. 84, p.19-29, 1996a.

METCALF, C.J.E. et al. Tree growth inference and prediction when the point of measurement changes: modeling around buttress in tropical forests. **Journal of Tropical Ecology**, v. 25, n. 1, p. 1-12, 2009.



MEYER, W.H. Approach of Abnormally Stocked Stands of Douglas Fir to Normal Conditions. **Journal of Forestry**, v. 31, p. 400-406, 1933.

MITTLBÖCK, M.; HEINZL, H. Regression and time series measures of explained variation. **Communications in Statistics-simulation**, v. 31, p.61-73, 2002.

MITSUDA, Y. et al. Effects of competitive and cooperative interaction among neighboring trees on tree growth in a naturally regenerated even-aged *Larix sibirica* Stand in considering height stratification. **Journal of Forest Research**. v.7 p. 185-191, 2002.

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**, v. 80, p. 57-80, 1996.

MOSTACEDO, B.C.; FREDERICKSEN, T.S. Regeneration status of important tropical forest tree species in Bolivia: assessment and recommendation. **Forest Ecology and management**, v. 124, p. 263-273, 1999.

NATH, C.D. et al. Assessing the utility of direct and indirect methods for estimating tropical tree age in the Western Ghats, India. **Trees**. DOI: 10.1007/s00468-012-0679-6, 2012.

NEWTON, P. et al. Cross-scale variation in the density and spatial distribution of an Amazonian non-timber forest resource. **Forest Ecology and Management**, 276, pp. 41-51, 2012.

NOWACKI, G.J.; ABRAMS, M.D. Radial-growth averaging criteria for reconstructing disturbance histories from presettlement origin oaks. **Ecological Monographs**, v. 67, p. 225–249, 1997.

NYSTRÖM, K.; KEXI, M. Individual tree basal area growth models for young stands of Norway spruce in Sweden. **Forest Ecology and Management**, v. 97, p.173-185, 1997.

ONHEIMB, G. et al. Individual-tree radial growth in a subtropical broad-leaved forest: The role of local neighbourhood competition. **Forest Ecology and management**, v. 261, p. 499-507, 2011.

PACIOREK, C.J. et al. The demographics of resprouting in tree and shrub species of a moist tropical forest. **Journal of Ecology**, v. 88 p. 765-777, 2000.

PEDERSEN, R.Ø. et al. Deriving individual tree competition indices from airborne laser scanning. **Forest Ecology and Management**, v. 280, p.150-165, 2012.

POORTER, L.; BONGERS, F. **Ecology of tropical forests**. Wageningen Agricultural University, 1993. 223 p.

POORTER, L. Growth responses of 15 rain-forest tree species to a light gradient: the relative importance of morphological and physiological traits. **Functional Ecology**, v. 13, p.396-410, 1999.

PRODAN, M., et al. **Mensura Forestal**. San José: GTZ, 1997. 561 p.

- PUMIJUMNONG, N. et al. Tree ring research in *Tectona grandis* in northern Thailand. **IAWA Journal**, v. 16, p. 385-392, 1995.
- PUTZ, F.E. How trees avoid and shed lianas. **Biotropica**, v. 16, p. 19-23, 1984a.
- REICH, P.; BORCHET, R. Water stress and a tree phenology in a tropical dry forest in the lowlands of Costa Rica. **Journal of Ecology**, v. 72, p. 61-74, 1984.
- REID, D.E.B. et al. Growth and crown efficiency of height repressed lodgepole pine; are suppressed trees more efficient? **Trees**, v. 18, p. 390-398, 2004.
- RHEENEN, V. et al. Regeneration of timber trees in a logged tropical forest in North Bolivia. **Forest Ecology and Management**, v. 200, p.39-48, 2004.
- RICHARDS, F.J. A Flexible growth function for empirical use. **Journal experimental of Botany**, v. 10, p. 290-300, 1959.
- RINN, F. **TSAP-Win, Version 4.64, reference manual**: Time Series Analysis and Presentation Dendrochronology and Related Applications. Heidelberg, 2003. 110 p.
- ROUVINEN, S.; KUULUVAINEN, T. Structure and asymmetry of tree crowns in relation to local competition in a natural mature Scots pine forest. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 902, p.890-902, 1997.
- 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, p.122-130, 2012.
- SABOGAL, C. et al. **Manejo florestal empresarial na Amazônia brasileira: Restrições e oportunidades**. CIFOR-IMAZON-EMBRAPA-FFT. 107 p. 2006.
- SCHNEIDER, P.R.; SCHNEIDER, P.S.P. **Introdução ao manejo florestal**.: Ed. Santa Maria: FACUS/UFSM, 2008. 566 p.
- SCHNITZER, S.A.; BONGERS, F. The ecology of lianas and their role in forests. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 17, p. 223-230, 2002.
- SCHÖNGART, J. Growth-Oriented Logging (GOL): A new concept towards sustainable forest management in Central Amazonia várzea floodplains. **Forest Ecology and Management**, v. 256, p.46-58, 2008.
- SCHWINNING, S.; WEINER, J. Mechanisms determining the degree of size asymmetry in competition among plants. **Oecologia**. v. 113, p. 447-455, 1998.
- SCOLFORO, J.R.S. **Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas**. Lavras: UFLA-FAEPE-DCF., 1998. 453 p.
- SILVA, J.A.A.; BAILEY, R.L. Considerações teóricas sobre o uso correto do índice de Furnival na seleção de equações volumétricas. **Revista Árvore**, v. 15, p. 323-327, 1991.
- SILVA, J.N.M. et al. Growth and yield of a tropical rain in the Brazilian Amazon 13 years after logging, **Forest ecology and management**, v. 71, p. 267-274, 1995.
- SHINOZAKI, K. et al. A quantitative analysis of plant form the pipe model theory - 1.

Basic analyses. **Japan Journal of Ecology**, v. 14, p. 97-105, 1964a.

SORIANO, M. et al. Implementing multiple forest management in Brazil nut-rich community forests: Effects of logging on natural regeneration and forest disturbance. **Forest Ecology and Management**, v. 268, p.92-102, 2012.

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, p.388-396, 2001.

SPURR, S. H. A measure of point density. **Forest Science**, v. 8, p. 85-96, 1962.

STERBA, H.; AMATEIS, R.L. Crown efficiency in a loblolly pine (*Pinus taeda*). **Canadian Journal of Forest Research**, v. 28, p.1344-1351, 1998.

STERBA, H. Using permanent sampling of individual trees as source of information for forest management. In: SIMPÓSIO LATINOAMERICANO SOBRE MANEJO FLORESTAL, 2001, Santa Maria. **Anais Santa Maria: UFSM**, 2001, p.19-37.

STERBA, H. et al. Adapting an individual tree growth model for Norway Spruce (*Picea abies* L. Karst.) in pure and mixed species stands. **Forest Ecology and Management**, v. 159, p. 101–110, 2002.

STOKES, M. A.; SMILEY, T. L. **An Introduction to Tree-Ring Dating**. The University of Arizona Press, Tucson, p. 73, 1996.

SUPERINTENDENCIA FORESTAL **Potencial de los bosques naturales de Bolivia para producción forestal permanente**. Superintendencia Forestal, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. 1999.

THORPE, H. C. et al. Competition and tree crowns: A neighbourhood analysis of three boreal tree species. **Forest ecology and management**, v. 259, p. 1586-1596, 2010.

TOMÉ, M.; BURKHART, H.E. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. **Forest Science** v. 35, p. 816-831, 1989.

TOMÉ, M. Os modelos de Produção Florestal na Gestão de povoamentos Florestais. **Revista Agros**, v.8, p. 32–36, 1991.

TONINI, H. **Índices de competição e o seu uso na modelagem do crescimento das árvores**. Boa Vista: Embrapa, 2007. p. 30.

TOUMEY, J.W. **Foundations of Silviculture: Upon an ecological basis.**: Ed. 2. New York. 1949, 468 p.

UMEKI, K. Importance of crown position and morphological plasticity in competitive interaction in population of *Xanthium canadense*. **Annals of Botany**, v. 75, p. 259-265, 1995.

VANCLAY, J. K. Aggregating tree species to development diameter increment equations for tropical rainforest. **Forest ecology and management**, v. 42, p. 143-168, 1991.

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

VERISSIMO, A. et al. **Pólos madeireiros do Estado do Pará**. Belém: IMAZON, 2003. 75 p.

VETTENRANTA, J. Distance-dependent Models for Predicting the Development of Mixed Coniferous Forests in Finland. **Silva Fennica**, v. 33, 51-72, 1999.

VILLEGAS, Z. et al., Silvicultural treatments enhance growth rates of future crops trees in a tropical dry forest. **Forest ecology and management**, v. 258, p. 971-977, 2009.

WADSWORTH, F. H. **Forest Production for Tropical America**. Agricultural Handbook. Washington, DC: USDA Forest Service, p. 710, 1997.

WADSWORTH, F. H.; ZWEEDE, J. C. Liberation: Acceptable production of tropical forest timber. **Forest Ecology and Management**, v. 233, p.45-51, 2006.

WADSWORTH, F. H. et al. Cutover tropical forest productivity potential merits assessment, Puerto Rico. **Bois et forêts des tropiques**, v. 305, p. 33-41, 2010.

WEST, P. W. Application of regression analysis to inventory data with measurements on successive occasions. **Forest Ecology and Management**, v. 71, p. 227-234, 1995.

WORBES, M.; JUNK, W. J. Dating tropical trees by means of <sup>14</sup>C from bomb tests. **Ecology**, New York, v.70, p.503-507, 1989.

WORBES, M. et al . On the dynamics, floristic subdivision and geographical distribution of várzea forests in Central Amazonia. **Journal of Vegetation Science**, v. 3, p. 553-564, 1992.

WORBES, M. How to measure growth and dynamics in tropical trees. **IAWA**, v. 16, p. 337-351, 1995.

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

ZEIDE, B. Analysis of growth equations. **Forest Science**, v. 39, n. 3, p. 549 – 616, 1993.

ZEIDE, B.; VANDERSCHAAF, C. **The effect of density on the height-diameter relationship**. In: Proceedings of the eleventh biennial southern silvicultural research conference: USA Department of Agriculture and Forest Service. p. 463-466. 2002.

ZHAO, D. et al. Individual-tree diameter growth and mortality models for bottomland mixed-species hardwood stands in the lower Mississippi alluvial valley. **Forest Ecology and Management**, v. 199, p. 307-322, 2004.

APÊNDICE 1 - Fotografias durante a coleta de dados na floresta.



A) Apoio para verrumagem acima das raízes tabulares (DAS) numa árvore de *Swietenia* (*Swietenia macrophylla*) na UPA da Fazenda Canary.



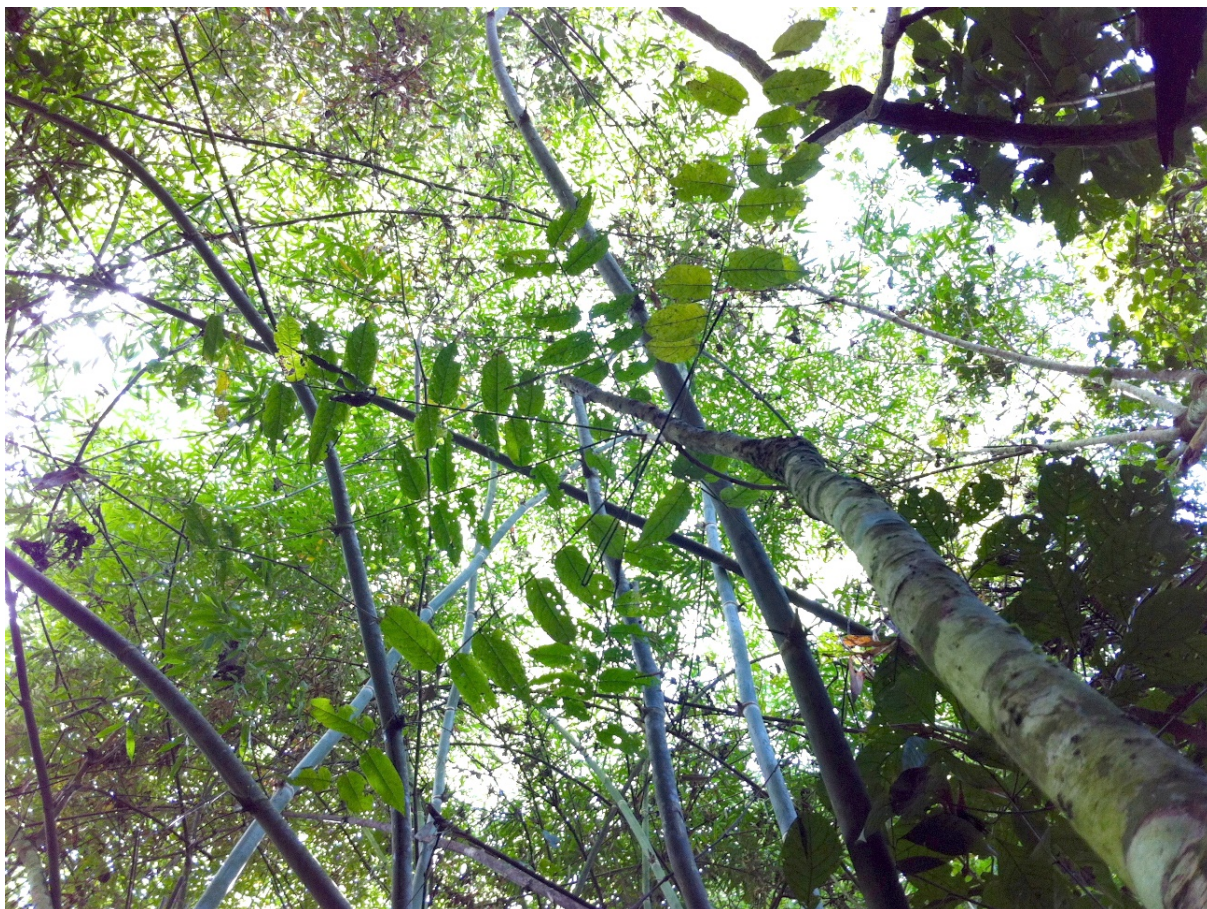


B) Seção transversal de Copaifera (*Copaifera paupera*) evidenciando os anéis de crescimento em que ocorre a secreção de óleo-resina pelos canais axiais presentes no parênquima axial marginal.



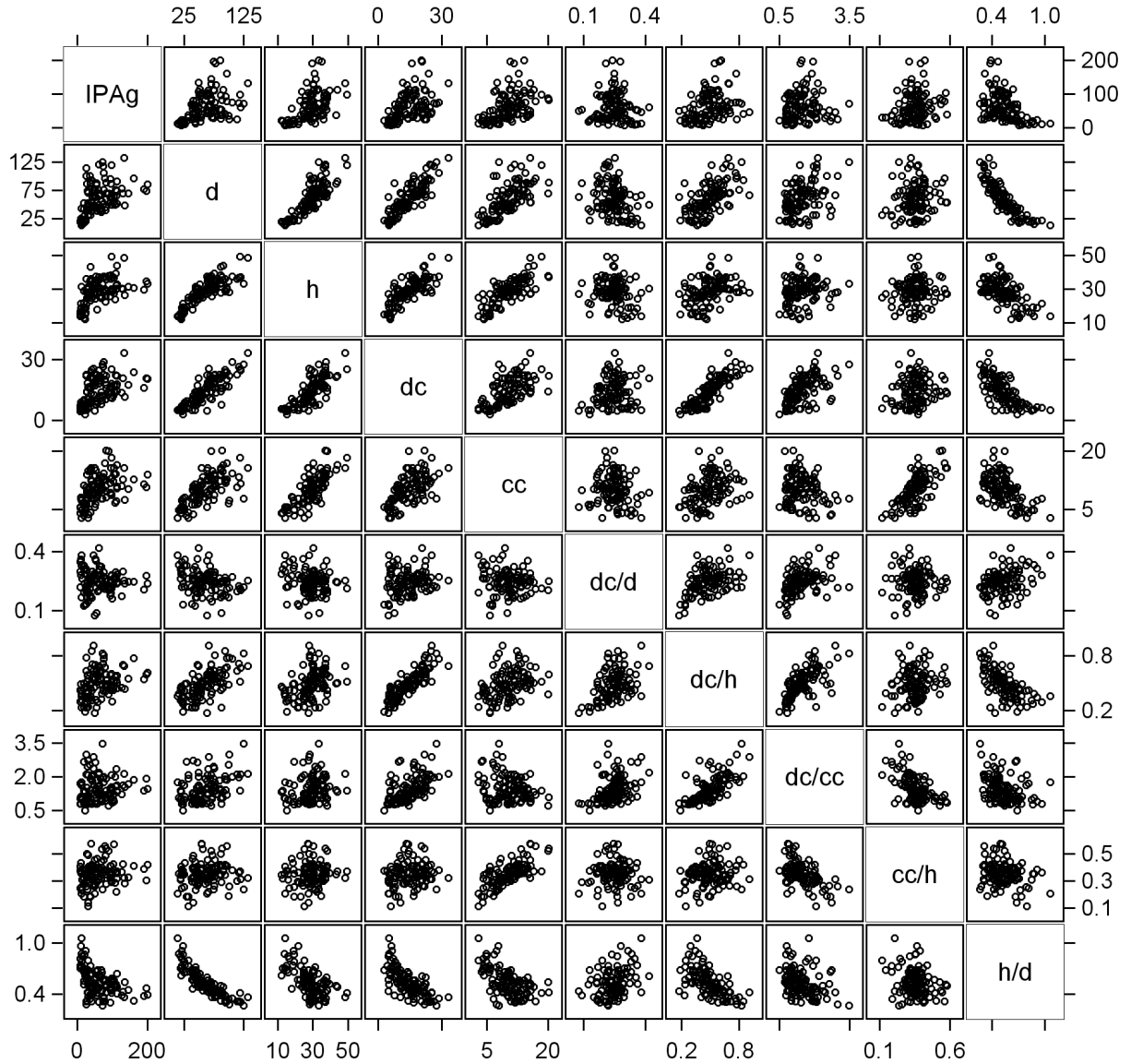


C) Regeneração de Cedrela (*Cedrela odorata*) sem iluminação direta da copa devido ao dossel fechado formado principalmente por Guadua sp. (Taboca). O indivíduo também estava atacado por *Hypsiphylia grandella*.



APÊNDICE 2 - Gráficos de dispersão das variáveis duas a duas para os dados de incremento periódico anual em área basal (IPAg) e as covariáveis (por espécie). d=diâmetro a altura do peito; h=altura total; dc=diâmetro de copa; cc=comprimento de copa. dc/d=índice de saliência; dc/h=índice de abrangência; dc/cc=formal de copa; cc/h=proporção de copa; h/d=esbeltez.

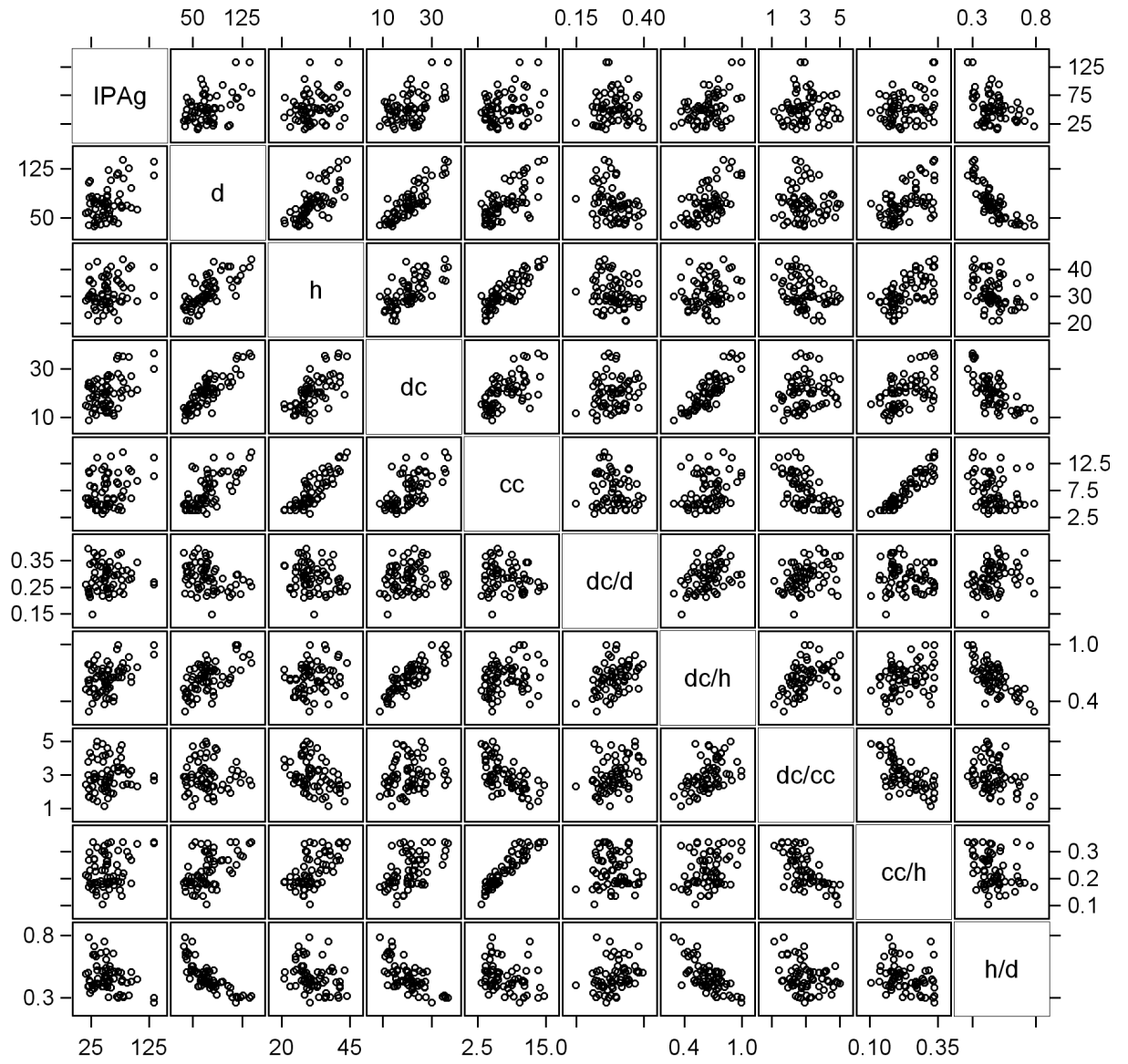
2A) Cedrela



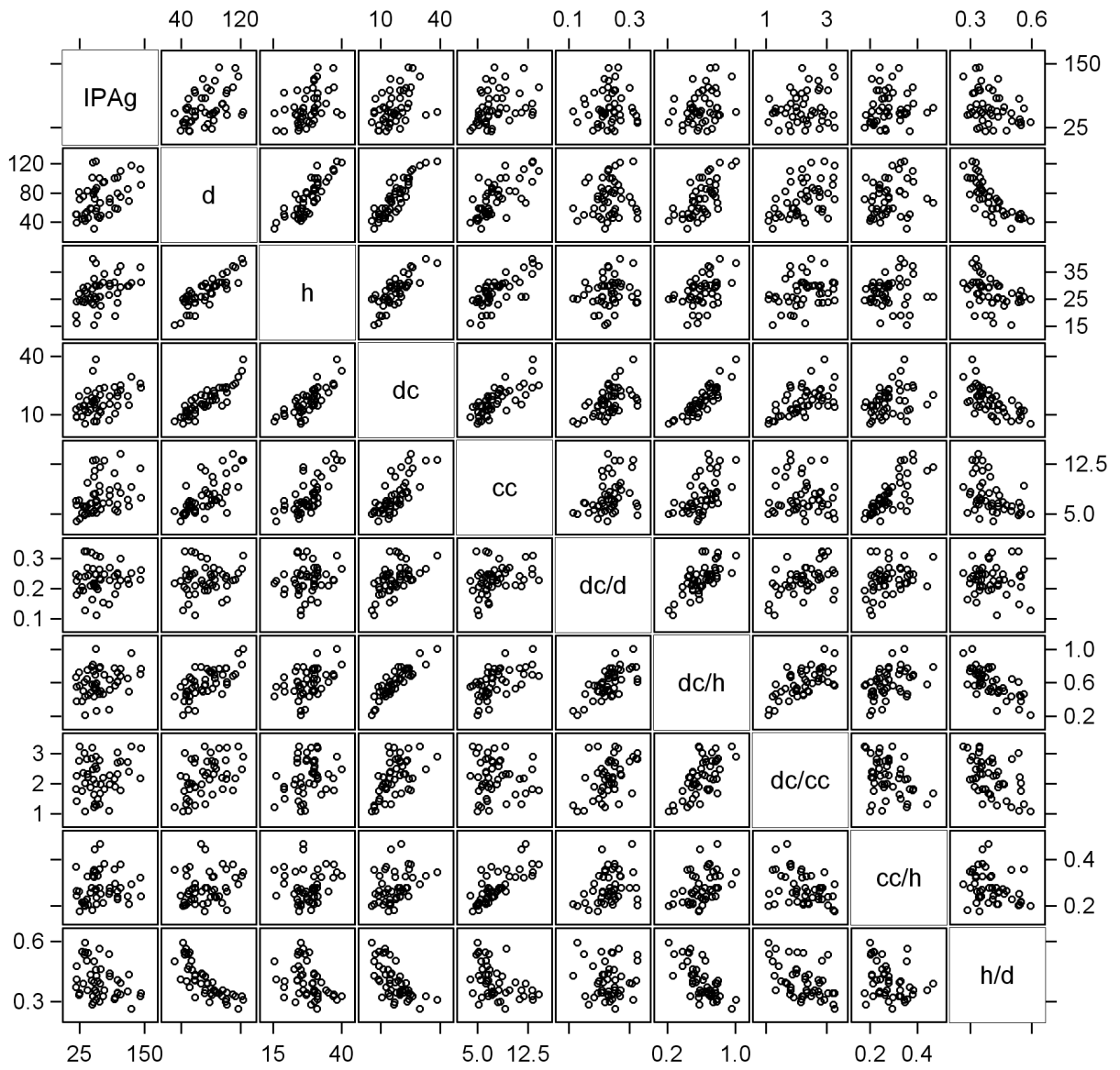




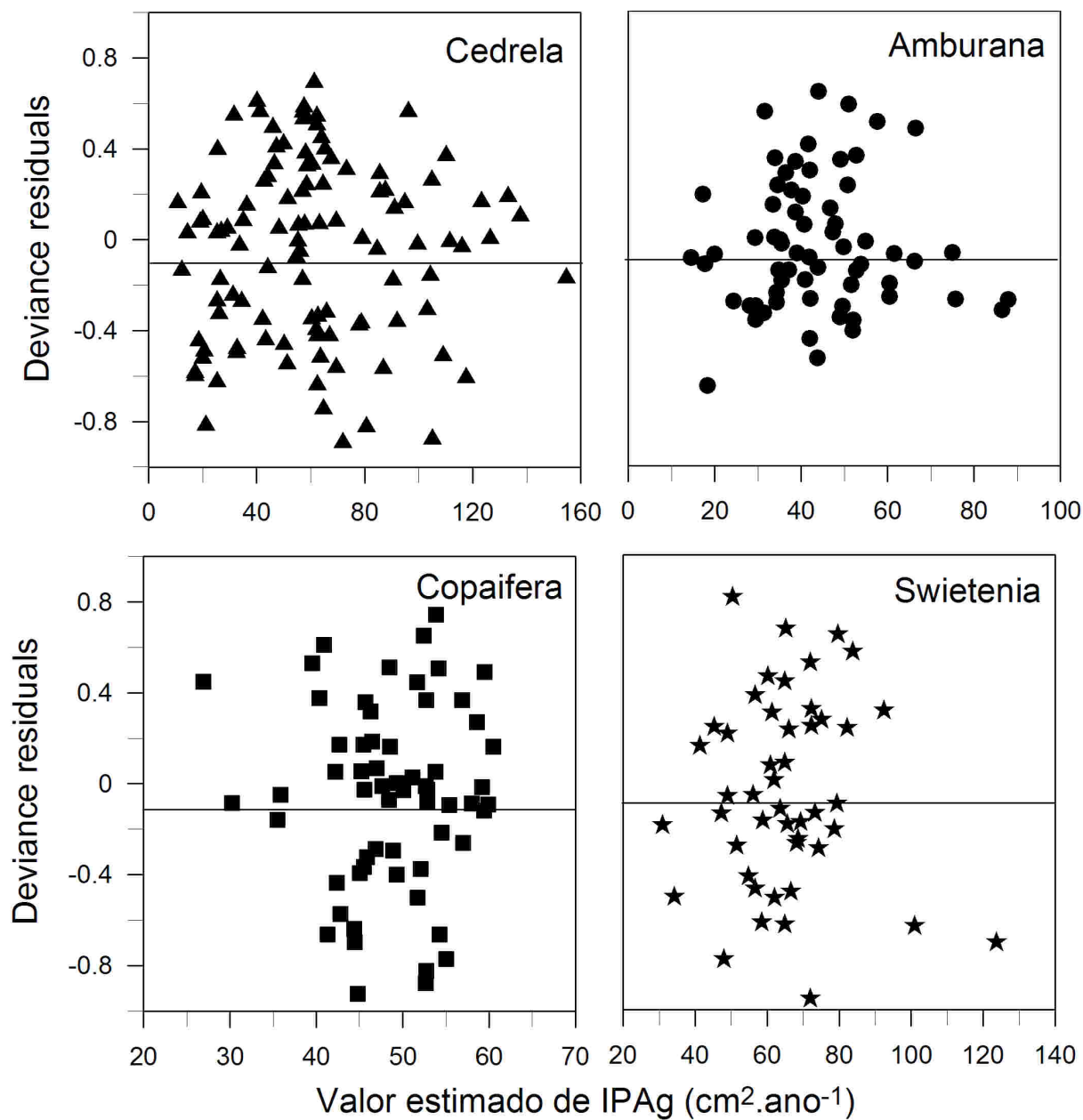
2C) Copaifera



2D) Swietenia



APÊNDICE 3 - Dispersão não heterocedástica do Deviance residuals do modelo de regressão Gama (modelo 2) para estimar o incremento periódico em área basal (IPAg).



APÊNDICE 4 - Função Densidade e Probabilidade Gama de acordo a Lyndsey (1997).

Considerando que os valores da variável dependente IPAg são independentes e seguem uma distribuição que pertence à família exponencial na forma canônica (A1), isto é,

$$f(y_i; \theta_i, \phi) = \exp \left\{ \frac{1}{a_i(\phi)} [y_i \phi_i - b(\phi_i)] + c(y_i; \phi) \right\}, \quad (A1)$$

que tem uma função de verossimilhança dada por:

$$L = L(\theta, \phi; y) = \prod_{i=1}^n f(y_i; \theta_i, \phi) \quad (A2)$$

$$= \exp \left\{ \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{a_i(\phi)} [y_i \phi_i - b(\phi_i)] + c(y_i; \phi) \right] \right\} \quad (A3)$$

Aplicando o logaritmo na função de verossimilhança A3 temos:

$$l = l(\theta, \phi; y) = \log L(\theta, \phi; y) = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{a_i(\phi)} [y_i \theta_i - b(\theta_i)] + c(y_i; \phi) \right\} \quad (A4)$$

Neste caso, a função densidade probabilidade (A5) e a função de verossimilhança (A6) específicas para a distribuição Gama é:

$$f(y_i; \mu_i, v) = \left( \frac{v}{\mu_i} \right)^v \frac{y_i^{v-1} e^{-\frac{vy_i}{\mu_i}}}{\Gamma(v)} \quad (A5)$$

$$\exp \left\{ \left[ \frac{-y_i}{\mu_i} - \ln(\mu_i) \right] v + (v-1) \ln(y_i) + v \ln(v) - \ln[\Gamma(v)] \right\} \quad (A6)$$

Maximizando a função de Verossimilhança A6 pelo algoritmo iterativo Mínimos Quadrados Ponderados Interativos (em inglês IWLS Interactively Weighted Least Square) do PROC GLIMMIX (SAS/Stat, 2004), foi possível estimar os coeficientes de regressão do modelo 2.

## APÊNDICE 5 - Alguns programas SAS utilizados nesta pesquisa.

### A) Teste de Box-Cox:

```
PROC TRANSREG PLOTS=ALL;
  MODEL BOXCOX (LNIPAG / CONVENIENT LAMBDA=-2 TO 2 BY 0.05) =
  CLASS (CLASSE);
RUN;
  QUIT;
```

### B) Distribuição do IPAg:

```
PROC CAPABILITY;
VAR IPAG;

HISTOGRAM/
  MIDPOINTS=10 TO 200 BY 20
  NORMAL (COLOR=BLACK L=1)
  GAMMA (COLOR=RED L=1);
RUN;
  QUIT;
```

### C) Análise de variância considerando um modelo com variâncias heterogêneas para determinar o efeito da carga de lianas na copa no IPAg:

```
PROC GLM DATA=LIANA_LOAD;
TITLE 'TESTE DE LEVENE';
  CLASS LIANA;
  MODEL IPAG=LIANA;
  MEANS LIANA / HOVTEST=LEVENE (TYPE=ABS);

PROC MIXED DATA=LIANA_LOAD BOXPLOT;
TITLE 'VERIFICANDO O COMPORTAMENTO DA VARIANCIA';
  CLASS LIANA;
  MODEL IPAG=LIANA / OUTP=R;
  LSMEANS LIANA / DIFF ADJUST=TUKEY;

PROC MIXED DATA=LIANA_LOAD COVTEST CL IC;
TITLE 'MODELO CONSIDERANDO VARIÂNCIA HETEROGENEA';
  CLASS LIANA;
  MODEL IPAG=LIANA / DDFM=KR OUTP=R;
  REPEATED / GROUP=LIANA;
  LSMEANS LIANA / DIFF ADJUST=TUKEY;
RUN;
  QUIT;
```

### D) Modelo de regressão considerando a distribuição Gama e função de ligamento canônica para Swietenia:

```
PROC GLIMMIX DATA=SWIETENIA;
TITLE 'AJUSTE DO MODELO GAMA';
  MODEL IPAG= CROWNDIAM COMPETITION / DIST=GAMMA LINK=INVERSE S;
  OUTPUT OUT=GLIM_OUTSWIETENIA PRED(ILINK)=P RESID(ILINK)=R
  STDERR(ILINK)=STDERR UCL(ILINK)=A LCL(ILINK)=B;
```

```

PROC GPLOT DATA=GLIM_OUTSWIETENIA;
SYMBOL1 V=DOT CV=BLACK;
SYMBOL2 V=DOT CV=RED;
      PLOT IPAG*CROWNDIAM=1 P*CROWNDIAM=2 / OVERLAY LEGEND;
      PLOT PRES*PRED / VREF=0 NOLEGEND;

PROC GENMOD DATA=SWIETENIA;
TITLE 'PARA CALCULAR OS RESIDUOS DEVIANCE';
      MODEL IPAG= CROWNDIAM COMPETITION / DIST=GAMMA LINK=POWER(-1);
      OUTPUT OUT=RESIDUALS
             PRED=PRED
             RESDEV=D
             RESCHI=PRES
             LOWER=ICI
             UPPER=ICS;

RUN;
      QUIT;

```

E) Gráficos de dispersão em forma de matriz:

```

PROC SGSCATTER DATA=DISPERSION;

MATRIX IPAG D H CROWNDIAM CROWNLENG MORF1 MORF2 MORF3 MORF4 MORF5;

      LABEL      IPAG='IPAg'
                 D='d'
                 H='h'
                 CROWNDIAM='dc'
                 CROWNLENG='cc'
                 MORF1='dc/d'
                 MORF2='dc/h'
                 MORF3='dc/cc'
                 MORF4='cc/h'
                 MORF5='h/d';

      BY SPECIE;
RUN;
      QUIT;

```