



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

**TAMIRES RAIANE DAMASCENO RIBEIRO**

**PROGNOSE DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO DE UM POVOAMENTO DE  
PARICÁ NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

**BELÉM**

**2021**

**TAMIRES RAIANE DAMASCENO RIBEIRO**

**PROGNOSE DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO DE UM POVOAMENTO DE  
PARICÁ NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia como parte das exigências do Curso de Mestrado em Ciências Florestais: Área de concentração manejo de ecossistemas de florestas nativas e plantadas, para obtenção do título de mestre.

Orientador: Dr. Francisco de Assis Oliveira

**BELÉM**

**2021**

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

---

RIBEIRO, TAMIRES RAIANE

PROGNOSE DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO DE UM POVOAMENTO DE PARICÁ NA  
AMAZÔNIA ORIENTAL / TAMIRES RAIANE RIBEIRO. - 2022.

56 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Ciências Biológicas (CB), Campus  
Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Oliveira

1. Modelos biológicos. 2. Capacidade produtiva. 3. Abordagem da diferença algébrica. 4. Modelo de  
Clutter. 5. Sobrevivência. I. Oliveira, Francisco de Assis , *orient.* II. Título

---

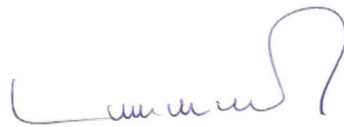
CDD 620

**TAMIRES RAIANE DAMASCENO RIBEIRO**

**PROGNOSE DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO DE UM POVOAMENTO DE  
PARICÁ NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia como parte das exigências do Curso de Mestrado em Ciências Florestais: Área de concentração manejo de ecossistemas de florestas nativas e plantadas.

29 de outubro de 2021.



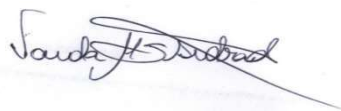
---

**Francisco De Assis Oliveira**



---

**Walmer Bruno Martins**



---

**Vanda Maria Andrade**



---

**Ruy Guilherme Correia**



Dedico este trabalho a Deus, o autor da minha vida, por sua infinita misericórdia. A meus familiares, em especial a minha mãe Miracy Damasceno, pois sempre me apoiou e me incentivou a crescer nesta jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

O autor deseja expressar, em primeiro lugar, a Deus, por ter me dado o dom da vida, e me dá a oportunidade de ser feliz naquilo que propus fazer, por ter me sustentado com sua misericórdia sem fim.

A minha Mãe, Miracy Damasceno, minha heroína, meu exemplo de mulher, por sonhar comigo e me ajudar a realiza-lo com todo amor e dedicação

Ao meu orientador, Francisco de Assis Oliveira, por sua orientação, empenho, dedicação e estímulos ao me orientar.

À empresa Tietê Agrícola Ltda., pela disponibilização dos dados.

Ao Engenheiro Florestal Mario Lima por proporcionar o conhecimento da área de estudo e coleta de dados, além de todo incentivo até a conclusão desse trabalho.

Ao Engenheiro Florestal Hallefy Júnio de Souza, pelas orientações e disponibilização de materiais base para elaboração deste trabalho.

Aos amigos da pós graduação pelo convívio durante 2 anos.

A todos os professores que me capacitaram para esta formação, com dedicação e responsabilidade.

A todos aqueles que, com boa intenção, de maneira direta e indiretamente me apoiaram para a construção deste trabalho, o meu muito obrigado.

“O temor do Senhor é o princípio da sabedoria, e  
o conhecimento do Santo a prudência”

Provérbios 9.10

## RESUMO

O conhecimento das características dendrométricas intrínsecas às espécies utilizadas em plantios comerciais é essencial no planejamento produção quanto na comercialização do produto gerado. A modelagem do crescimento e produção possibilita prever a produção florestal, propiciando bases para planejar o manejo dos povoamentos. Assim, o objetivo da presente dissertação foi prognosticar o volume e rotação técnica baseado na modelagem em nível de povoamento de paricá na Amazônia Oriental. Para isso, foi modelada (o) a altura total, o volume de árvores individuais e o crescimento em altura das árvores dominantes, além de propor um modelo de Clutter com adição da sobrevivência para projetar o crescimento e produção a nível de povoamento total. Os dados foram obtidos em 13 parcelas permanentes durante cinco anos, medindo os diâmetros com casca à altura do peito, altura total e dominante. O método de Smalian foi utilizado para cubicar 104 árvores. Foram ajustados modelos de relação hipsométrica, volumétricos e de crescimento em altura dominante. Na melhor equação de altura, foi aplicada a técnica de decomposição de parâmetros e inclusão das covariantes altura dominante e (Hd), idade (Id) e área basal (G). Para a classificação da capacidade produtiva, foram utilizados modelos ajustados na forma anamórficas e polimórficas, utilizando o método de curva guia e da diferença algébrica. Para projeção do crescimento e produção foi utilizado o modelo de Clutter com e sem a sobrevivência. A escolha da melhor equação foi avaliada por intermédio do coeficiente de correlação, erro padrão de estimativa, critério de informação de Akaike e análise gráfica dos resíduos. Os modelos selecionados e validados foram: Logistic modificado para altura total, Schumacher-Hall para o volume e de Chapman-Richards (ADA-anamórfico) para altura dominante. O modelo Logistic com covariantes desenvolvido neste estudo, proporcionou ganhos de precisão na estimativa da altura total para diferentes densidades de povoamento, diferentes fases do crescimento e variabilidade do sítio. As curvas geradas pelo modelo de Chapman-Richards (ADA – Anamórfico), descreveram o comportamento da altura dominante em função da idade, repercutindo em locais com características produtivas distintas representada pelos índices de sítio de 13, 16 e 19 m. A distribuição das 13 parcelas mostrou que, 38,5% (n=5), 53,8% (n= 7) e 7,7% (n=1), enquadraram-se nas classes de baixa, média e alta capacidade produtiva, respectivamente. Na modelagem de projeção do crescimento e produção, verificou-se que o número de árvores (sobrevivência), não possui efeito sobre a produção em área basal e volume, optando-se pelo modelo segmentado de Clutter sem a adição desta variável, no qual foi preciso e compatível. O modelo tradicional prognosticou idade técnica de rotação aos três anos de idade, não diferindo entre classes de produtividade. Estes resultados evidenciam a necessidade de mais estudos para a espécie, considerando diferentes espaçamentos, sítios, recursos genéticos de diferentes procedências, além de outras abordagens de modelagem. Concluiu-se que as modelagens abordadas foram precisas e compatíveis para prognosticar o povoamento de paricá, na qual, serve de base para condução e planejamento da produção da espécie na Amazônia.

**Palavras-chave:** Modelos biológicos; Relação hipsométrica; Estimativa volumétrica; Capacidade produtiva; Abordagem da diferença algébrica; Modelo de Clutter; Sobrevivência.

## ABSTRACT

The knowledge of the intrinsic dendrometric characteristics of the species used in commercial plantations is essential in production planning and in the commercialization of the generated product. The modeling of growth and production makes it possible to predict forest production, providing a basis for planning the management of stands. Thus, the objective of the present dissertation was to predict the volume and technical rotation based on the modeling at the level of the paricá stand in the Eastern Amazon. For this, (o) the total height, the volume of individual trees and the growth in height of the dominant trees were modeled, in addition to proposing a Clutter model with addition of survival to project the growth and production at the total stand level. Data were obtained from 13 permanent plots for five years, measuring diameters with bark at breast height, total height and dominant. The Smalian method was used to cube 104 trees. Hypsometric, volumetric and dominant height growth models were adjusted. In the best height equation, the technique of parameter decomposition and inclusion of the dominant height and covariates (Hd), age (Id) and basal area (G) was applied. For the classification of productive capacity, models fitted in anamorphic and polymorphic forms were used, using the guide curve and algebraic difference method. To project growth and production, the Clutter model with and without survival was used. The choice of the best equation was evaluated using the correlation coefficient, standard error of estimate, Akaike's information criterion and graphical analysis of the residuals. The selected and validated models were: modified logistic for total height, Schumacher-Hall for volume and Chapman-Richards (ADA-anamorphic) for dominant height. The Logistic model with covariates developed in this study, provided precision gains in estimating total height for different population densities, different stages of growth and site variability. The curves generated by the Chapman-Richards model (ADA – Anamorphic) described the behavior of the dominant height as a function of age, reflecting in places with distinct productive characteristics represented by the site indices of 13, 16 and 19 m. The distribution of the 13 plots showed that 38.5% (n=5), 53.8% (n=7) and 7.7% (n=1) fell into the low, medium and high capacity classes, productive, respectively. In the growth and production projection modeling, it was found that the number of trees (survival) has no effect on the production in basal area and volume, opting for the segmented Clutter model without the addition of this variable, in which it was accurate and compatible. The traditional model predicted the technical rotation age at three years of age, not differing between productivity classes. These results highlight the need for further studies for the species, considering different spacing, sites, genetic resources from different sources, in addition to other modeling approaches. It was concluded that the modeling approaches were accurate and compatible to predict the population of paricá, which serves as a basis for conducting and planning the production of the species in the Amazon.

**Key-words:** Biological models; Hypsometric relationship; Volumetric estimate; Productive capacity; Algebraic difference approach; Clutter model; Survival.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fazenda Veneza (2°19'15.5"S 47°30'31.8"W e 2°18'12.8"S 47°26'38.4"W), no município de Aurora do Pará, PA e das parcelas amostradas no plantio de paricá, propriedade da empresa Tiête Agrícola Ltda. ....	26
Figura 2. Procedimentos de mensuração em campo de variáveis em um povoamento de paricá na Amazônia Oriental, Brasil.....	28
Figura 3. Distribuição dos erros de estimativa (a), correlação entre volumes observados e preditos (b) e histograma da frequência de erro relativo (c), do modelo ajustado de Logistic modificado para o povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil. ....	34
Figura 4. Distribuição dos erros de estimativa (a), correlação entre volumes observados e preditos (b) e histograma da frequência de erro relativo (c), do modelo ajustado de Schumacher-Hall para o povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil. ....	35
Figura 5. Distribuição dos erros de estimativa (a), correlação entre volumes observados e preditos (b) e histograma da frequência de erro relativo (c), do modelo ajustado de Schumacher-Hall (ADA – Anamórfico) para o povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil. ....	37
Figura 6. Curvas de índice de sítio para o povoamento de paricá na Amazônia Oriental, Brasil.....	37
Figura 7. Fazenda Veneza (2°19'15.5"S 47°30'31.8"W e 2°18'12.8"S 47°26'38.4"W), no município de Aurora do Pará, PA e das parcelas amostradas no plantio de paricá, propriedade da empresa Tiête Agrícola Ltda. ....	46
Figura 8. Distribuição dos erros de estimativa (A), correlação entre volumes observados e preditos (B) e histograma da frequência de erro relativo (C), para área basal (1) e volume (2) do modelo de Clutter para o povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil. ....	50
Figura 9. Crescimento (1) e produção (2) nos índices de sítio 13 m (linha de cor azul), 16 m (linha de cor amarela) e 19 m (linha de cor marrom) em um povoamento de paricá na Amazônia Oriental, Brasil. ....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Atividades operacionais silviculturais e suas características implantadas no povoamento seminal de paricá na fazenda Veneza, município de Aurora do Pará-PA. 27	27
Tabela 2. Número de árvores, média, e desvio padrão das variáveis por classe de diâmetro das árvores cubadas no povoamento de paricá no município de Aurora do Pará, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil. ....	28
Tabela 3. Modelos hipsométricos e volumétricos selecionados para ajuste aos dados do povoamento de paricá no município de Aurora do Pará, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil. ....	29
Tabela 4. Modelos de crescimento em altura dominante selecionados para ajuste aos dados do povoamento de paricá no município de Aurora do Pará, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil. ....	30
Tabela 5. Estimadores e estatísticas de precisão das equações hipsométrica para o povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil. ....	32
Tabela 6. Estimadores e estatísticas de precisão do modelo Logistic modificado para estimativa da altura total do povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil.....	33
Tabela 7. Estimadores dos parâmetros e estatísticas de precisão para cada equação volumétrica, ajustadas para árvores de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil. ....	35
Tabela 8. Estimadores e estatísticas de precisão das equações de crescimento em altura dominante para o povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil. ....	36
Tabela 9. Teste de normalidade e de validação para cada equação selecionada para estimativa da altura total, do volume e da altura dominante do povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil. ....	38
Tabela 10. Atividades operacionais silviculturais e suas características implantadas no povoamento seminal de paricá na fazenda Veneza, município de Aurora do Pará, PA. 46	46
Tabela 11. Valores das medidas de precisão dos modelos para projeção de área basal e volume do modelo de Clutter para o povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil. ....	49
Tabela 12. Teste de normalidade e de validação da modelagem de Clutter do povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil.....	51
Tabela 13. Cronograma de execução das atividades no período de 2020 a 2021 por semestre, da dissertação de mestrado, UFRA. ....	56

## SUMÁRIO

RESUMO .....	9
ABSTRACT .....	9
1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	16
2. OBJETIVOS.....	20
3. REFERÊNCIAS .....	21
<b>CAPÍTULO 1: MODELAGEM DA RELAÇÃO ALTURA-DIÂMETRO, DO VOLUME INDIVIDUAL E DO CRESCIMENTO EM ALTURA DE ÁRVORES DOMINANTES DE POVOAMENTO DE PARICÁ NA AMAZÔNIA ORIENTAL</b>	
1. INTRODUÇÃO .....	24
2. ÁREA DE ESTUDO .....	26
3. MÉTODOS.....	27
3.1. Procedimento de campo.....	27
3.2. Modelagem e análise estatística.....	29
3.2.1. Relação hipsométrica e volumétrica.....	29
3.2.2. Modelagem da capacidade produtiva .....	30
3.2.3. Critérios de seleção e validação dos modelos .....	31
4. RESULTADOS.....	32
4.1. Modelagem da altura .....	32
4.2. Modelagem do volume .....	34
4.3. Modelagem da capacidade produtiva .....	36
4.4. Validação das modelagens.....	38
5. DISCUSSÃO.....	39
5.1. Modelagem da altura .....	39
5.2. Modelagem do volume .....	39
5.3. Modelagem da capacidade produtiva .....	40
6. CONCLUSÃO .....	41
7. REFERÊNCIAS .....	41



## **CAPÍTULO 2: DIFERENTES ABORDAGENS DO MODELO DE CLUTTER NA PROJEÇÃO DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE PARICÁ NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

1. INTRODUÇÃO .....	44
2. ÁREA DE ESTUDO .....	45
3. MÉTODOS.....	47
3.1. Modelagem e análise estatística .....	47
3.1.1. Modelagem global da produção volumétrica e do número de árvores.....	47
3.1.2. Critérios de seleção e validação dos modelos .....	48
4. RESULTADOS.....	49
4.1. Modelagem de Clutter .....	49
4.2. Projeção do crescimento e da produção .....	51
5. DISCUSSÃO.....	52
5.1. Modelagem de Clutter .....	52
5.2. Projeção do crescimento e da produção .....	53
6. CONCLUSÃO .....	53
7. REFERÊNCIAS .....	54
CRONOGRAMA DA PESQUISA .....	56

## 1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A área total de árvores plantadas no Brasil atingiu 9 milhões de ha em 2019, um acréscimo de 2,4% em relação ao ano anterior (8,79 milhões de hectares) (IBÁ, 2020). Desse total, 77% é composto por plantios do gênero *Eucalyptus*, com 6,97 milhões de hectares, e 18% de *Pinus*, com 1,64 milhões de ha (IBÁ, 2020). Além desses plantios, existem 0,39 milhões de ha plantados de outras espécies, entre elas o *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby (paricá) (IBÁ, 2020). Assim, o setor de árvores plantadas tem sido um importante indicador de desenvolvimento econômico, social e ambiental, visto que atua na promoção de mudanças econômicas em nível local, mitigando os efeitos da mudança climática e na provisão de serviços ecossistêmicos (ALMEIDA; COUTINHO; SANTANA, 2011).

Entre os locais onde se percebe o crescente interesse em plantios de paricá, está o Pará, estado brasileiro no qual 54% de sua área total apresenta alto potencial silvicultural para implantação de florestas da espécie (HOFFMANN et al., 2011; MIRANDA et al., 2016; SANTOS; SALIM; PEREIRA, 2018). O paricá é uma espécie tropical pioneira muito promissora, pois possui rápido crescimento e alta durabilidade, sendo de grande interesse para a indústria de madeira laminada (SCHWARTZ et al., 2017; BALDONI et al., 2020). A espécie é nativa da Amazônia e possui ampla distribuição geográfica, que vai do sul do Brasil até o norte do México (SCHWARTZ et al., 2017).

A implantação em escala comercial de paricá tiveram início em 1996, com grande ascensão entre 1994 e 2001 (EMBRAPA, 2006). No entanto, atualmente apresenta uma estabilidade em áreas plantadas e projetos com a espécie, justificada pela substituição da madeira por espécies do gênero *Eucaliptos* e ocorrência de pragas e doenças que acometeram grandes áreas (MACCAGNAN et al. 2013).

Apesar de representar uma pequena porcentagem dos plantios florestais do Brasil, a sua ampla distribuição e adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas, crescimento equiparável ao de *Pinus* e *Eucalyptus*, boas características silviculturais e uso diverso de sua madeira (laminados, compensados, revestimentos, móveis, acabamentos), esta espécie vem ganhando espaço no mercado florestal nacional (OHASHI; YARED; FARIAS NETO, 2010; HOFFMANN et al., 2011; ABRAF, 2013; CORDEIRO et al., 2015; MIRANDA et al., 2016; TOURNE et al., 2016). Embora seja uma espécie muito promissora no Brasil, ainda não existem programas de melhoramento

para a espécie. Sendo necessário avaliar seu potencial genético para desenvolver genótipos que atendam ao mercado consumidor (BALDONI et al., 2020).

Nesse sentido, dada a importância da espécie, a realização de estudos para entender e prever o crescimento do paricá, serve para atender exigências da crescente demanda madeireira, para suprir o mercado de matérias-primas, além de determinar as melhores alternativas de manejo (HOFFMANN et al., 2011; MIRANDA et al., 2016). Os modelos matemáticos de crescimento e produção possibilitam prever e projetar a produção florestal, e, além disso, propiciam simular a dinâmica natural de povoamentos, a expectativa da produção futura, bem como planejar atividades de manejo e tratamentos silviculturais (VANCLAY, 1994; BETTINGER et al., 2017; CAMPOS; LEITE, 2017).

Existem vários modelos desta natureza apresentados na literatura e a escolha do modelo adequado depende do nível de detalhamento desejado, podendo ser em nível de povoamento, de distribuição diamétrica ou em nível de árvore individual (VANCLAY, 1994; CASTRO et al., 2016). Os modelos de crescimento em nível de povoamento estimam a produção por meio de valores de crescimento médio do plantio, utilizando atributos como a idade, parâmetros relacionados a densidade e capacidade produtiva do sítio (BURKHART; TOMÉ, 2012; FERRAZ FILHO et al., 2015). Tal abordagem tem sido amplamente aplicada para florestas plantadas, estimando valores próximos entre as projeções e a produção total em inventários pré-corte (BINOTI et al., 2012; CASTRO et al., 2013; AZEVEDO et al., 2016; VALERIANO et al., 2018). Dentre os modelos desta categoria, o modelo de Clutter (1963) é o mais difundido nas empresas brasileiras, por ser um modelo de densidade variável, compatível, explícito e consistente (CLUTTER, 1963).

A modelagem Clutter, é realizada por um sistema de equações, formado inicialmente pelas estimativas da altura que recebe o nome de relações hipsométricas (MIRANDA et al., 2016), do volume por equações volumétricas (HOFFMANN et al., 2011; MIRANDA et al., 2016), e da capacidade de produção do local (SILVA et al., 2013; TEWARI; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ; VON GADOW, 2014; MINOCHE et al., 2017). O uso de modelos hipsométricos e volumétricos, são imprescindíveis para quantificação florestal, nos quais reduzem tempo e custo, estimam de forma precisa os valores de altura e volume de árvores individuais (GUIMARÃES et al., 2009; MENDONÇA; CHAVES E CARVALHO; CALEGARIO, 2015; ÖZÇELİK et al., 2018). Além destas duas variáveis, a modelagem da capacidade produtiva é importante para prognose do crescimento e

produção, estratificando zonas (sítio) de acordo com sua aptidão florestal (BRUCHWALD; ZASADA, 2010; SOCHA et al., 2015).

Visto que os tratamentos silviculturais e manejo para espécie ainda são incipientes (como na definição do número e intensidade de desbastes e outros tratamentos silviculturais), com o aumento da idade do povoamento florestal a competição pode resultar em altas taxas de mortalidade por se tratar de plantios totalmente estocados, ou seja, sem desbastes (SCOLFORO, 2006; BURKHART; TOMÉ, 2012; CAMPOS; LEITE, 2017). Desta forma, tem-se a necessidade de se implementar o efeito da mortalidade ou sobrevivência nos modelos de crescimento e produção, buscando prognoses mais precisas (CAMPOS; LEITE, 2017).

Estudos com paricá têm avaliado zoneamento edafoclimático da espécie (RIBEIRO; OLIVEIRA, 2013), questões de tecnologia da madeira, (ALMEIDA et al., 2013; MELO et al., 2013; ALMEIDA et al., 2014), propagação, reprodução e desenvolvimento de plântulas e mudas (DIAS et al., 2015; GONDIN et al., 2015; GONÇALVES, 2016), caracterização geral dos plantios (SANTOS; SALIM; PEREIRA, 2018) e quantificação dendrométrica (HOFFMANN et al., 2011). Apesar disso, poucos estudos abordam a modelagem do crescimento da produção, para projeção do volume de madeira e definição das idades técnicas de rotação (SILVA et al., 2013; MIRANDA et al., 2016). Por se tratar de uma espécie nativa da região amazônica, inúmeros esforços são demandados para compreender o crescimento e produção frente às diferentes estratégias de manejo e tratamentos silviculturais.

Neste contexto, a dissertação está organizada e fundamentada em uma sequência lógica, buscando responder questões norteadoras, testar e verificar as hipóteses elaboradas dispostas em cada capítulo e alcançar os objetivos propostos. Para tanto, foi estruturada em dois capítulos, abordando as seguintes temáticas:

**Capítulo 1:** Modelagem da relação altura-diâmetro, do volume individual e do crescimento em altura de árvores dominantes de povoamento de paricá na Amazônia Oriental.

No capítulo 1, foram levantadas as seguintes questões: (i) Quais os modelos de acordo com sua fundamentação teórica, melhor descrevem a relação entre altura-diâmetro? (ii) Modelos de simples e dupla entrada possuem precisão similar na estimativa do volume de árvores individuais de paricá? (iii) A altura dominante serve como indicador da capacidade produtiva, indicando gradientes ambientais distintos? Como hipóteses temos: (H1) Se a relação altura-diâmetro apresenta um padrão biológico, logo, os modelos de construção teórica gerarão estimativas mais compatíveis e precisas quando comparados aos modelos não teóricos. (H2) Se a variabilidade das variáveis dendrométricas for elevada, logo, modelos de dupla entrada proporcionarão estimativas mais precisas e significativas estatisticamente. (H3) Se em uma menor escala da paisagem existe variabilidade de gradientes ambientais, logo, espera-se que o paricá responda à variabilidade do sítio, sendo a altura dominante um indicador desta diferença na capacidade produtiva.

**Capítulo 2:** Diferentes abordagens do modelo de Clutter na projeção do crescimento e produção de paricá na Amazônia Oriental.

Para o capítulo 2, foram levantadas as seguintes questões: (i) o modelo de Clutter segmentado desenvolvido inicialmente para coníferas, será compatível e preciso na estimativa da produção de uma folhosa como a espécie paricá? (ii) A sobrevivência impacta no poder preditivo do modelo de Clutter? Para a primeira questão, hipotetizamos (H1) se os sinais dos parâmetros de regressão do modelo de Clutter forem consistentes com padrão de crescimento biológico, logo, espera-se projeções compatíveis e precisas para o manejo do povoamento de paricá. (H2) Se a sobrevivência afeta significativamente a densidade do povoamento, logo a inclusão da variável no modelo de Clutter, proporcionará estimativas mais precisas na prognose da área basal e conseqüentemente da produção volumétrica.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Prognosticar o volume e rotação técnica baseado na modelagem em nível de povoamento de paricá na Amazônia Oriental.

### **2.2 Específicos**

- Ajustar e selecionar modelos hipsométrico e volumétrico;
- Determinar a capacidade produtiva;
- Ajustar o modelo de Clutter com e sem o efeito da sobrevivência;
- Projetar a produção do povoamento de paricá; e
- Determinar a rotação técnica do povoamento de paricá

### 3. REFERÊNCIAS

- ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF 2013: Ano base 2012**. Brasília: 2013.
- ALMEIDA, D. H. et al. Hardness of the Schizolobium amazonicum Wood. **Advanced Materials Research**, v. 912–914, n. April 2014, p. 2018–2021, 2014.
- AZEVEDO, G. B. et al. Modelagem da produção em nível de povoamento e por distribuição diamétrica em plantios de eucalipto. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 44, n. 110, p. 383–392, 2016.
- BALDONI, A. B. et al. Early selection strategies in schizolobium parahyba var. amazonicum (huber ex ducke) barneby. **Industrial Crops and Products**, v. 152, n. March, p. 112538, 2020.
- BETTINGER, P. et al. **Forest Management and Planning: Second Edition**. Academic Press, 2017.
- BINOTI, D. H. B. et al. Gem da Distribuição Diamétrica em Povoamentos de Eucalipto Submetidos a Desbaste Utilizando Autômatos Celulares. **Revista Arvore**, v. 36, n. 5, p. 931–939, 2012.
- BRUCHWALD, A.; ZASADA, M. Growth model for European larch (*Larix decidua* Mill). **Sylwan**, v. 154, p. 615–624, 2010.
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. Springer, 2012a.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: Perguntas e respostas**. 5. ed. Viçosa: UFV, 2017.
- CASTRO, R. V. O. et al. Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 48, n. 3, p. 287–295, 2013.
- CASTRO, R. V. O. et al. Modeling of growth and yield of eucalyptus stands in level of diameter distribution using site index. **Revista Arvore**, v. 40, n. 1, p. 107–116, 2016.
- CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. **Forest Science**, v. 9, n. 3, p. 354–371, 1963.
- CORDEIRO, I. M. C. C. et al. Avaliação de plantios de paricá (*Schizolobium parahyba* var. amazonicum (Huber ex ducke) barneby) de diferentes idades e sistemas de cultivo no município de aurora do pará – PA (Brasil). **Ciencia Florestal**, v. 25, n. 3, p. 679–687, 2015.
- DIAS, P. C. et al. Propagação vegetativa de *Schizolobium amazonicum* por estaquia. **Cerne**, v. 21, n. 3, p. 379–386, 2015.
- FERRAZ FILHO, A. C. et al. Modeling growth and yield of loblolly pine stands under intensive management. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 50, n. 8, p. 707–717, 2015.

GONÇALVES, D. S. et al. CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO DE MUDAS DE *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke EM DIFERENTES SUBSTRATOS E RECIPIENTES. v. 13, n. 2015, p. 378–387, 2016.

GONDIN, J. C. et al. Emergência de plântulas de *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke(Caesalpinaceae) em diferentes substratos e sombreamento. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 46, n. 2, p. 329–338, 2015.

GUIMARÃES, M. A. M. et al. Height-diameter models in forestry with inclusion of covariates. **Cerne**, v. 15, n. 3, p. 313–321, 2009.

HOFFMANN, R. G. et al. Caracterização dendrométrica de plantios de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke) na região de Paragominas, PA. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 4, p. 675–684, 2011.

IBÁ. Brazilian tree industry annual report - base year 2019. **Associação Brasileira de Árvores**, p. 160, 2020.

MACCAGNAN, D. H. B. et al. Primeiro registro de cigarra em reflorestamentos com paricá no Estado de Mato Grosso, Brasil. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 57, n. 4, p. 451–454, 2014.

MARQUES, L. C. T.; YARED, J. A. G.; SIVIERO, M. A. **A Evolução do Conhecimento sobre o Paricá para Reflorestamento no Estado do Pará** Comunicado Técnico, 2006.

MELO, R. R. DE et al. Avaliação das Propriedades Físicas, Químicas, Mecânicas e de Superfície de Lâminas de Paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 2, p. 238–249, 2013.

MENDONÇA, A. R.; DE CHAVESE CARVALHO, S. P.; CALEGARIO, N. Modelos Hipsométricos Generalizados Mistos Na Predição Da Altura De *Eucalyptus* Sp. **Cerne**, v. 21, n. 1, p. 107–115, 2015.

MINOCHE, D. et al. Determining the site index of Teak (*Tectona grandis* L.) plantations in Tabasco, Mexico. **Ciencia e Investigacion Agraria**, v. 44, n. 2, p. 154–167, 2017.

MIRANDA, D. L. C. et al. Growth and Production of Paricá Wood in Two Plantations in the North of Mato Grosso, Brazil. **Nativa**, v. 4, n. 4, p. 199–205, 2016.

OHASHI, S. T.; YARED, J. A. G.; FARIAS NETO, J. T. DE. Variabilidade entre procedências de paricá *Schizolobium parahyba* var *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby plantadas no município de Colares - Pará. **Acta Amazonica**, v. 40, n. 1, p. 81–88, 2010.

ÖZÇELİK, R. et al. Predicting tree height from tree diameter and dominant height using mixed-effects and quantile regression models for two species in Turkey. **Forest Ecology and Management**, v. 419–420, n. February, p. 240–248, 2018.

RIBEIRO, I. O.; OLIVEIRA, F. B. DE. Zoneamento Edafoclimático de *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke utilizando análise multicritério. n. April 2013, p. 3119–3125, 2013.



SANTOS, I. S.; SALIM, S.; PEREIRA, P. C. G. Caracterização Do Reflorestamento De Paricá Na Microrregião De Paragominas-Pa. **Revista Agroecossistemas**, v. 10, n. 1, p. 145, 2018.

SCHWARTZ, G. et al. Enrichment planting in logging gaps with *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby: A financially profitable alternative for degraded tropical forests in the Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 390, p. 166–172, 2017.

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

SILVA, G. F. et al. Modeling Growth and Yield of *Schizolobium amazonicum* under Different Spacings. **International Journal of Forestry Research**, v. 2013, n. December, p. 1–10, 2013.

SOCHA, J. et al. Modele bonitacyjne dla gatunków lasotwórczych Polski opracowane na podstawie tablic zasobności. **Sylwan**, v. 159, n. 08, 2015.

TEWARI, V. P.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G.; VON GADOW, K. Dynamic base-age invariant site index models for *Tectona grandis* in peninsular India. **Southern Forests**, v. 76, n. 1, p. 21–27, 2014.

TOURNE, D. C. M. et al. Potential topoclimatic zones as support for forest plantation in the Amazon: Advances and challenges to growing paricá (*Schizolobium amazonicum*). **Environmental Development**, v. 18, p. 26–35, 2016.

VALERIANO, M. F. DE O. et al. Are models of volumetric production at the diametric distribution and total stand level mutually compatible? **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 5, p. 1691–1698, 2018.

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

ZEIDE, B. Intrinsic units in growth modeling. **Ecological Modelling**, v. 175, n. 3, p. 249–259, 2004.

## **CAPÍTULO 1: MODELAGEM DA RELAÇÃO ALTURA-DIÂMETRO, DO VOLUME INDIVIDUAL E DO CRESCIMENTO EM ALTURA DE ÁRVORES DOMINANTES DE POVOAMENTO DE PARICÁ NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

### **1. INTRODUÇÃO**

O paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby) é uma árvore heliófila, caducifólia de grande porte (15-40 m de altura e 50-100 cm de diâmetro), de fuste reto e cilíndrico, com pouca tortuosidade, e rápido crescimento (TURCHETTO-ZOLET et al., 2012). Nesse sentido, a espécie vem sendo utilizada em reflorestamentos e possui forte potencial econômico (PAULA et al., 2014). A crescente demanda para que a madeira atenda o mercado consumidor exige estudos detalhados para prever o crescimento da espécie, o que geralmente envolve inventários florestais (CUNHA NETO et al., 2018).

Dessa forma, com o aumento da intensidade do uso e manejo dessa espécie e dado os altos custos dos inventários florestais, demanda-se procedimentos que visem a redução de custos, como a utilização de equações hipsométricas e volumétricas, que tornam a atividade de coleta de dados mais operacional (HOFFMAN et al., 2011). Porém, poucas equações hipsométricas e volumétricas para a espécie estão disponíveis na literatura (HOFFMANN et al., 2011; SILVA et al., 2013; CUNHA NETO et al., 2018).

Um passo anterior a modelagem do crescimento e da produção se encontra na predição de variáveis dendrométricas em nível de indivíduo, como a altura total e o volume do fuste, que são importantes para quantificar variáveis em nível de povoamento, como o volume por unidade de área. Portanto, o conhecimento das características dendrométricas intrínsecas às espécies utilizadas em plantios comerciais é essencial no planejamento da produção quanto na comercialização do produto gerado (SCOLFORO, 2006; CAMPOS; LEITE, 2017; HOFFMAN et al., 2011).

Além da altura total e do volume do fuste, a classificação da capacidade produtiva é um passo importante para a obtenção de prognoses precisas e consistentes (CAMPOS; LEITE, 2017). A classificação da capacidade produtiva é essencial para identificar o potencial produtivo do sítio e fornece um referencial para o diagnóstico e prescrição silvicultural. Para maior utilidade da prognose, uma medida de qualidade do sítio deve ser quantitativa e expressa por um número (BURKHART; TOMÉ, 2012).

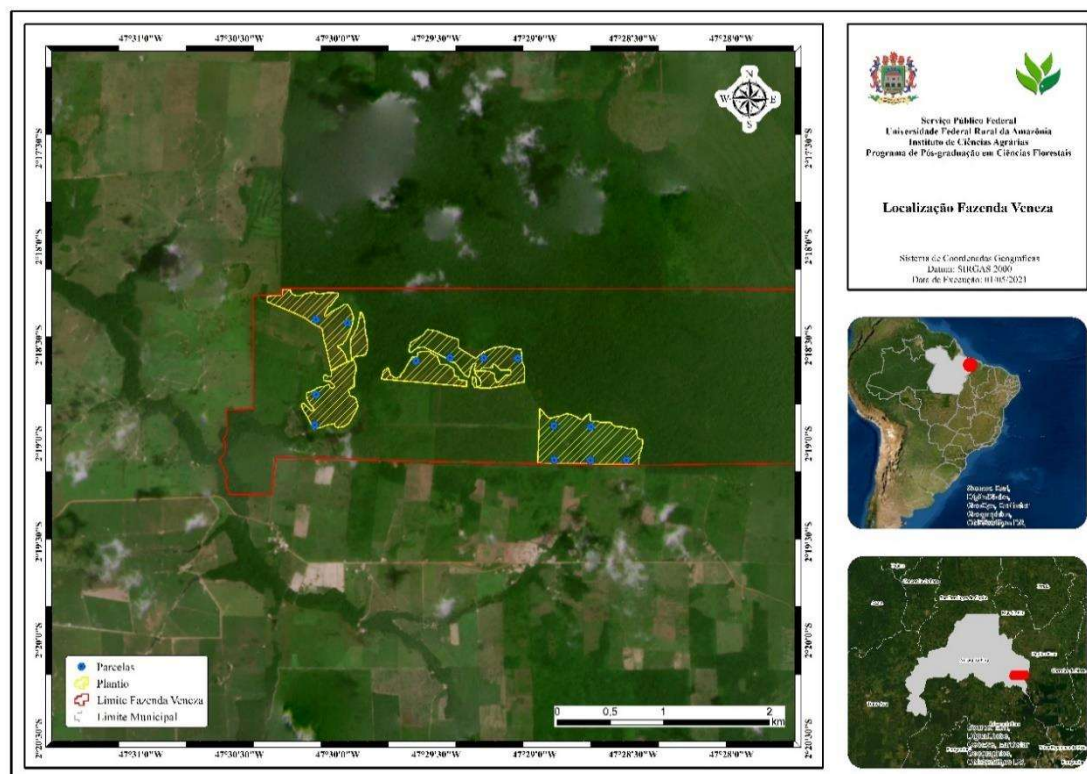
A variável comumente utilizada para a classificação da capacidade produtiva é a altura média das árvores dominantes e codominantes, a qual se correlaciona fortemente com o volume (MENDONÇA et al., 2011). Dessa forma, ela é importante em estudos de crescimento e produção florestal. Esta relação entre a altura média das árvores dominantes e codominantes e a capacidade produtiva do local há muito tempo vem sendo estudada (MENDONÇA et al., 2011), porém, poucos são os estudos para paricá (SILVA et al., 2013).

Dada a necessidade de tornar o manejo florestal mais coerente com o crescimento biológico, a seleção de modelos adequados para a predição e projeção das variáveis dendrométricas é um aspecto muito importante (GONÇALVES et al., 2016). O uso de modelos não lineares, principalmente os de construção teórica, permitem a partir de seus parâmetros uma interpretação do fenômeno que está sendo modelado (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Neste contexto, levantamos as seguintes questões: (i) Quais os modelos de acordo com sua fundamentação teórica, melhor descrevem a relação entre altura-diâmetro? (ii) Modelos de simples e dupla entrada possuem precisão similar na estimativa do volume de árvores individuais de paricá? (iii) A altura dominante serve como indicador da capacidade produtiva, indicando gradientes ambientais distintos? Como hipóteses temos: (H1) Se a relação altura-diâmetro apresenta um padrão biológico, logo, os modelos de construção teórica gerarão estimativas mais compatíveis e precisas quando comparados aos modelos não teóricos. (H2) Se a variabilidade das variáveis dendrométricas for elevada, logo, modelos de dupla entrada proporcionarão estimativas mais precisas e significativas estatisticamente. (H3) Se em uma pequena escala existe variabilidade de gradientes ambientais, logo, espera-se que o paricá responda à variabilidade do sítio, sendo a altura dominante um indicador desta diferença na capacidade produtiva. Assim, o objetivo do presente capítulo foi avaliar modelos para estimativa da altura, do volume de árvores individuais e do crescimento em altura das árvores dominantes de paricá na Amazônia Oriental.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na Fazenda Veneza, pertencente a empresa Tietê Agrícola Ltda, localizada no município de Aurora do Pará, cuja área plantada de paricá é de 123,5 ha e possui quatro talhões (11, 12, 13 e 14) (Figura 1). Os plantios são de origem seminal e foram implantados no ano de 2015, cuja área útil por planta é de 12,25 m<sup>2</sup> (3,5 x 3,5 m), e receberam os mesmos tratos silviculturais (Tabela 1). A área de estudo está situada na região de Floresta Ombrófila Tropical, sub-região dos altos platôs do Pará-Maranhão (IBGE, 2012). Na região predominam os solos: Latossolo Amarelo distrófico petroplíntico (LAd); Latossolo Amarelo distrófico típico (lad) e; Plintossolo Pétrico concrecionário (FFc) (EMBRAPA, 2018). As declividades são classificadas como suave e suave ondulada, chegando próximo de 5% (IBGE, 2012), com altitudes em torno de 79 metros (INMET, 2021). Pela classificação climática de Köppen, a região em que a área de estudo se encontra, está enquadrada no tipo climático Am, o que o caracteriza como quente e úmido, clima tropical chuvoso, com curta estação seca, clima am (ALVARES et al., 2013).



**Figura 1.** Fazenda Veneza ( $2^{\circ}19'15.5''S$   $47^{\circ}30'31.8''W$  e  $2^{\circ}18'12.8''S$   $47^{\circ}26'38.4''W$ ), no município de Aurora do Pará, PA e das parcelas amostradas no plantio de paricá, propriedade da empresa Tiête Agrícola Ltda.

**Tabela 1.** Atividades operacionais silviculturais e suas características implantadas no povoamento seminal de paricá na fazenda Veneza, município de Aurora do Pará-PA.

Ano	Atividade operacional de silvicultura	Características das atividades
0	Combate à formiga	Com iscas formicidas
0	Limpeza da área	Mecanizada
1	Plantio	Manual
1	Replantio	Manual (> 10% de perda)
1	Adubação de arranque	NPK 2-28-16, KCl 100 g.planta <sup>-1</sup>
1	Coroamento	Enxada – 50 cm de raio
1, 2, 3, 4 e 5	Roçagem	Semi e mecanizada com trator hidráulico
1	Adubação de Manutenção	Boro 7 g.planta <sup>-1</sup> , KCl 100 g.planta <sup>-1</sup>

### 3. MÉTODOS

#### 3.1. Procedimento de campo

Foram utilizados dados oriundos de um inventário florestal realizados em diferentes idades (1, 2, 3, 4 e 5 anos), cujo processo de amostragem foi o sistemático, os dados foram coletados de 13 parcelas permanentes, em um grid de 320 m x 320 m. Em todas as parcelas foram tomadas as seguintes medidas: circunferência à 1,30 m do solo (cap em cm), com o auxílio de uma fita métrica, que posteriormente foi convertida em dap (diâmetro à 1,30 m do solo); e altura total (m) que foi tomada a partir do clinômetro modelo Haglöf SWEDEN. A altura dominante foi calculada de acordo com a metodologia de Assmann (1970). Utilizou-se dados de cubagem rigorosa de 104 árvores, conforme o método Smalian (Eq. 1), que consiste na medição do fuste com comprimento de 2 metros. A cubagem seguiu a distribuição diamétrica (método estatístico de distribuição de frequência) do povoamento, sendo utilizadas sete classes determinadas pelo diâmetro médio aritmético (" $\bar{X}$ ") e desvio padrão (s) (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2014), e será calculado o volume em toda a amplitude diamétrica existente nas diferentes classes da floresta (Tabela 2).

$$v = \left(\frac{g_1 + g_2}{2}\right) L_1 + \left(\frac{g_2 + g_3}{2}\right) L_2 + \dots + \left(\frac{g_{n-1} + g_n}{2}\right) L_n \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:  $g_i$  = área seccional da tora (m<sup>2</sup>);  $L_i$  = comprimento da tora (m); e  $v$  = volume (m<sup>3</sup>).

**Tabela 2.** Número de árvores, média, e desvio padrão das variáveis por classe de diâmetro das árvores cubadas no povoamento de paricá no município de Aurora do Pará, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil.

Classe de dap (cm)	N	dap $\bar{X} \pm S$	ht $\bar{X} \pm S$	v $\bar{X} \pm S$
5,6 - 8,1	8	6,56 ± 0,76	7,20 ± 1,67	0,02 ± 0,01
8,1 - 10,6	15	9,40 ± 0,59	11,36 ± 1,53	0,05 ± 0,01
10,6 - 13,1	30	11,66 ± 0,67	13,87 ± 1,33	0,08 ± 0,01
13,1 - 15,6	30	14,01 ± 0,57	15,41 ± 1,61	0,13 ± 0,02
15,6 - 18,1	15	16,64 ± 0,61	16,94 ± 1,61	0,19 ± 0,02
18,1 - 20,6	5	18,76 ± 0,61	18,29 ± 0,91	0,25 ± 0,02
20,6 - 23,1	1	20,75 ± 0,00	18,59 ± 0,00	0,33 ± 0,00
<b>Total Geral</b>	<b>104</b>	<b>12,76 ± 0,63</b>	<b>14,14 ± 1,49</b>	<b>0,11 ± 0,02</b>

Em que, n: número de árvores; dap: diâmetro à 1,30 m do solo (cm); h: altura total (m); e v: volume com casca (m<sup>3</sup>).



**Figura 2.** Procedimentos de mensuração em campo de variáveis em um povoamento de paricá na Amazônia Oriental, Brasil.

### 3.2. Modelagem e análise estatística

#### 3.2.1. Relação hipsométrica e volumétrica

Foram utilizadas 325 árvores-amostra oriundas do inventário florestal de parcelas permanentes para a modelagem da relação hipsométrica e 104 árvores-amostra da cubagem para modelagem volumétrica. Os modelos selecionados para ajuste, estão descritos na Tabela 3.

**Tabela 3.** Modelos hipsométricos e volumétricos selecionados para ajuste aos dados do povoamento de paricá no município de Aurora do Pará, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil.

#	Modelo	Autor
<b>Modelos Hipsométricos</b>		
1	$h = \beta_0 + \beta_1 \text{dap} + \varepsilon_i$	Linha reta
2	$h = \beta_0 + \beta_1 \text{dap} + \beta_2 \text{dap}^2 + \varepsilon_i$	Trorey
3	$h = \beta_0 + \beta_1 \ln(\text{dap}) + \varepsilon_i$	Curtis
4	$h = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 \text{dap}})^{\beta_2} + \varepsilon_i$	Chapman-Richards
5	$h = \beta_0 e^{-e^{\beta_1 - \beta_2 \cdot \text{dap}}} + \varepsilon_i$	Gompertz
6	$h = \left( \frac{\beta_0}{1 + \beta_1 e^{-\beta_2 \cdot \text{dap}}} \right) + \varepsilon_i$	Logistic
<b>Modelos Volumétricos</b>		
1	$v = \beta_0 \text{dap}^{\beta_1} \cdot h^{\beta_2} + \varepsilon_i$	Schumacher-Hall
2	$v = \text{dap}^2 (\beta_0 + \beta_1 h)$	Ogaya
3	$v = \text{dap}^2 h (\beta_0 + \beta_1 \text{dap})$	Takata
4	$v = \beta_0 e^{-e^{\beta_1 - \beta_2 \cdot \text{dap}}} + \varepsilon_i$	Gompertz
5	$v = \beta_0 + \beta_1 \text{dap}^2 + \varepsilon_i$	Kopezky-Gehrhardt
6	$v = \beta_0 + \text{dap}^{\beta_1} + \varepsilon_i$	Husch

Em que: h: altura total (m); dap: diâmetro à altura do peito (cm); v: volume (m<sup>3</sup>);  $\beta_n$ : parâmetros a serem ajustados do modelo, e: base do logaritmo neperiano; ln: logaritmo neperiano;  $\varepsilon_i$ : Erro aleatório.

Fonte: Schumacher e Hall (1933); Scolforo (2006); Campos e Leite (2017).

Em caso de ajustes tendenciosos da melhor equação de altura selecionada, ocasionado por uma correlação baixa entre diâmetro e altura (CAMPOS e LEITE 2017), nesta será aplicada uma técnica de regressão por meio de decomposição de parâmetros e inclusão das covariantes altura dominante e (Hd), idade (Id) e área basal (G), com objetivo de descrever com maior precisão o comportamento da altura total do povoamento de paricá.

### 3.2.2. Modelagem da capacidade produtiva

Para a classificação da capacidade produtiva, foram utilizados modelos ajustados na forma anamórficas e polimórficas, utilizando o método de curva guia e da diferença algébrica (Tabela 4), com idade de referência (IR) de cinco anos, com três classes de capacidade produtiva visando facilitar a estratificação do povoamento, sendo: classe de baixa produtividade (sítio III), média produtividade (sítio II) e alta produtividade (sítio I).

**Tabela 4.** Modelos de crescimento em altura dominante selecionados para ajuste aos dados do povoamento de paricá no município de Aurora do Pará, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil.

#	Modelo	Autor
1	$Hd = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 Id})^{\beta_2} + \varepsilon_i$	Chapman-Richards (Curva guia)
2	$Hd = \beta_0 e^{-e^{-\beta_1 - \beta_2 Id}} + \varepsilon_i$	Gompertz (Curva guia)
3	$Hd = \left( \frac{\beta_0}{1 + \beta_1 e^{-\beta_2 Id}} \right) + \varepsilon_i$	Logistic (Curva guia)
4	$H_{d_{i+1}} = \beta_0 \left( \frac{H_{d_i}}{\beta_0} \right)^{\left( \frac{Id_1}{Id_2} \right)^{\beta_2}}$	Lundqvist-Korf (ADA – Polimórfico)
5	$H_{d_{i+1}} = H_{d_i} \left( \frac{(1 - \exp(-\beta_1 Id_2))^{\beta_2}}{(1 - \exp(-\beta_1 Id_1))^{\beta_2}} \right)$	Chapman-Richards (ADA - Anamórfico)
6	$H_{d_{i+1}} = \beta_1 \left( 1 - \exp\left(\log\left(1 - \left(\frac{H_{d_i}}{\beta_1}\right)^{\frac{1}{\beta_3}}\right)\right) \left(\frac{Id_2}{Id_1}\right)^{\beta_3} \right)$	Chapman-Richards (ADA – Polimórfico)

Em que: Hd: altura dominante (m); I: idade (meses);  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $\sigma$ : parâmetros a serem ajustados do modelo; e: base do logaritmo natural;  $\varepsilon_i$ : Erro aleatório. Fonte: Richards (1959); Gompertz (1825); Burkhardt; Tomé (2012).



### 3.2.3. Critérios de seleção e validação dos modelos

O ajuste dos modelos não lineares foi realizado no software R (R CORE TEAM, 2021) por intermédio da função “nlsLM do pacote minpak. LM” (ELZHOV et al., 2016), que utiliza o algoritmo de Levenberg-Marquardt. Os modelos lineares foram ajustados pela função “lm” do software R (R CORE TEAM, 2021) e os modelos modificados pela inclusão das covariáveis pelo método dos mínimos quadrados generalizados (MCCULLAGH; NELDER, 1983). A escolha do melhor modelo foi baseada de acordo os seguintes critérios estatísticos: coeficiente de correlação entre valores estimados e observados ( $r_{\hat{y}_y}$ ); erro de estimativa absoluto e relativo ( $S_{yx}$  e  $S_{yx}\%$ ); critério de informação de Akaike (AIC) (AKAIKE, 1978); análise gráfica da distribuição dos resíduos; análise dos valores observados e preditos; histograma da frequência de erro relativo e significância dos parâmetros de regressão. Os gráficos foram gerados a partir do pacote ggplot2 (PEDERSEN, 2020).

A normalidade dos resíduos foi testada pelo teste de Shapiro Wilk a 5% de probabilidade de erro. A validação para os modelos selecionados foi realizada com 20% do total dos dados, sendo que para dados paramétricos, será utilizado o teste t Student e para os não paramétricos, utilizaremos o teste Qui-quadrado, ambos a 95% de probabilidade. Para a relação hipsométrica adotaremos a altura oriunda das parcelas como banco de dados de 20% do total para validação. Para testar a segunda hipótese (H2), as estimativas das equações de volume mais precisas, de simples e de dupla entrada, foram comparadas via teste estatístico de acordo com sua distribuição (t Student para uma distribuição paramétrica e Qui-quadrado para uma distribuição não paramétrica, ambos considerando 95% de probabilidade).

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Modelagem da altura

Os resultados dos ajustes para a relação hipsométrica, evidenciaram que os modelos biológicos foram ligeiramente superiores aos modelos lineares, cujo modelo Logístico apresentou menores valores para erro padrão (absoluto e percentual), maior coeficiente de correlação entre valores estimados e observados, além do menor AIC (Tabela 5). Apesar dos modelos biológicos terem apresentado estatísticas de precisão ligeiramente superiores, todos os ajustes proporcionaram valores de  $S_{yx}\%$  superior a 10%, dessa maneira foi necessária uma abordagem que garantisse maior precisão ao modelo. Dessa maneira, o modelo Logístico teve seus coeficientes decomposto com o uso de covariáveis que explicam a variabilidade da altura em povoamentos florestais.

**Tabela 5.** Estimadores e estatísticas de precisão das equações hipsométrica para o povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil.

Modelo	Parâmetros	Erro padrão dos parâmetros	$r$	$S_{yx}$	$S_{yx}\%$	AIC																																																
Linha reta	$b_0 = -1,34706$	0,17683	0,929	1,49	13,89	2866,57																																																
	$b_1 = 1,12209$	0,01591					Trorey	$b_0 = -4,78596$	0,45481	0,934	1,41	13,34	2804,53	$b_1 = 1,79376$	0,08381	$b_2 = -0,02991$	0,00367	Curtis	$b_0 = 34,4389$	0,585	0,934	1,41	13,38	2807,46	$b_1 = -12,1143$	0,1947	Chapman-Richards	$b_0 = 23,19688$	1,05957	0,936	1,39	13,19	2786,24	$b_1 = 0,12596$	0,01125	$b_2 = 2,47802$	0,19224	Gompertz	$b_0 = 21,293137$	0,61684	0,937	1,39	13,12	2777,16	$b_1 = 1,411484$	0,044725	$b_2 = 0,170614$	0,008338	Logístico	$b_0 = 18,891091$	0,35628	0,937	1,382	13,07
Trorey	$b_0 = -4,78596$	0,45481	0,934	1,41	13,34	2804,53																																																
	$b_1 = 1,79376$	0,08381																																																				
	$b_2 = -0,02991$	0,00367					Curtis	$b_0 = 34,4389$	0,585	0,934	1,41	13,38	2807,46	$b_1 = -12,1143$	0,1947	Chapman-Richards	$b_0 = 23,19688$	1,05957	0,936	1,39	13,19	2786,24	$b_1 = 0,12596$	0,01125	$b_2 = 2,47802$	0,19224	Gompertz	$b_0 = 21,293137$	0,61684	0,937	1,39	13,12	2777,16	$b_1 = 1,411484$	0,044725	$b_2 = 0,170614$	0,008338	Logístico	$b_0 = 18,891091$	0,35628	0,937	1,382	13,07	2771,79	$b_1 = 15,499316$	1,00388	$b_2 = 0,286542$	0,009999						
Curtis	$b_0 = 34,4389$	0,585	0,934	1,41	13,38	2807,46																																																
	$b_1 = -12,1143$	0,1947					Chapman-Richards	$b_0 = 23,19688$	1,05957	0,936	1,39	13,19	2786,24	$b_1 = 0,12596$	0,01125		$b_2 = 2,47802$	0,19224					Gompertz	$b_0 = 21,293137$	0,61684	0,937		1,39	13,12					2777,16	$b_1 = 1,411484$	0,044725	$b_2 = 0,170614$		0,008338	Logístico					$b_0 = 18,891091$	0,35628	0,937	1,382	13,07	2771,79	$b_1 = 15,499316$	1,00388	$b_2 = 0,286542$	0,009999
Chapman-Richards	$b_0 = 23,19688$	1,05957	0,936	1,39	13,19	2786,24																																																
	$b_1 = 0,12596$	0,01125																																																				
	$b_2 = 2,47802$	0,19224					Gompertz	$b_0 = 21,293137$	0,61684	0,937	1,39	13,12	2777,16	$b_1 = 1,411484$	0,044725	$b_2 = 0,170614$	0,008338	Logístico	$b_0 = 18,891091$	0,35628	0,937	1,382	13,07	2771,79	$b_1 = 15,499316$	1,00388	$b_2 = 0,286542$	0,009999																										
Gompertz	$b_0 = 21,293137$	0,61684	0,937	1,39	13,12	2777,16																																																
	$b_1 = 1,411484$	0,044725																																																				
	$b_2 = 0,170614$	0,008338					Logístico	$b_0 = 18,891091$	0,35628	0,937	1,382	13,07	2771,79	$b_1 = 15,499316$	1,00388	$b_2 = 0,286542$	0,009999																																					
Logístico	$b_0 = 18,891091$	0,35628	0,937	1,382	13,07	2771,79																																																
	$b_1 = 15,499316$	1,00388																																																				
	$b_2 = 0,286542$	0,009999																																																				

Em que:  $b_i$  = estimadores dos parâmetros;  $S_{yx}$  = erro padrão da estimativa absoluto;  $S_{yx}\%$  = erro padrão da estimativa percentual;  $r$  = coeficiente de correlação entre valores observados e estimados e; AIC = Critério de Informação de Akaike.

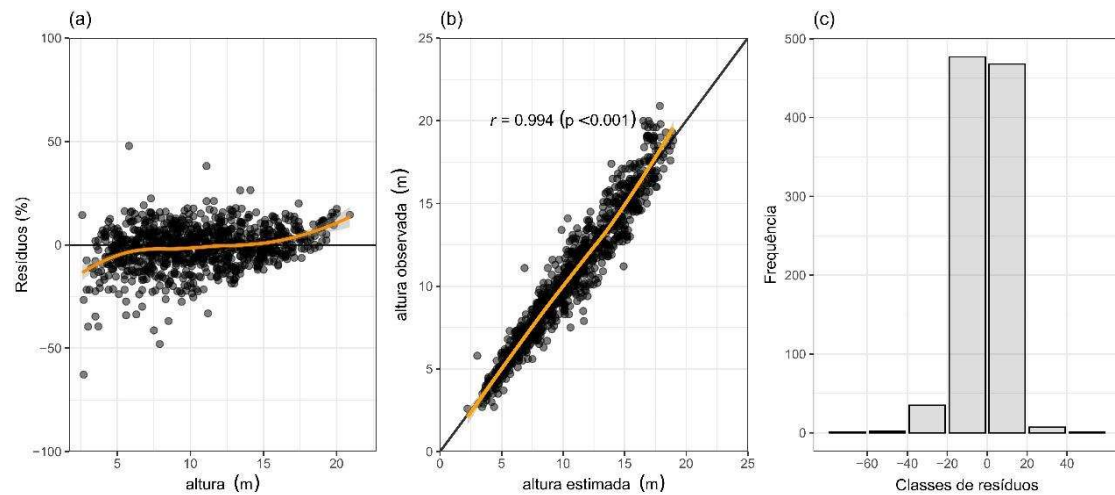
Os resultados do modelo Logístico ajustado com uso de covariáveis (Tabela 6), foram utilizadas na estimativa da altura total, cujas as covariáveis foram: idade do povoamento (anos); área basal do povoamento ( $m^2 ha^{-1}$ ) e; altura dominante (m). O ajuste garantiu melhora significativa nos estimadores de precisão do modelo Logístico, cujo erro padrão percentual foi reduzido em cerca de 4%. O coeficiente de correlação foi de 0,968 e o critério de informação de Akaike de 2554, inferior a todos os modelos ajustados em suas formas originais na Tabela 5.

**Tabela 6.** Estimadores e estatísticas de precisão do modelo Logistic modificado para estimativa da altura total do povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil.

Modelo	Parâmetros	Erro padrão dos parâmetros	$r$	$S_{yx}$	$S_{yx}\%$	AIC
Logistic modificado $ht = \frac{(b_0 + b_{01} hd + b_{02} G)}{(1 + (b_{10} + b_{11} G) \exp(-(b_{20} + b_{21} Id \text{ dap})))}$	$b_0 = 5,40165$	0,638334	0,968	0,994	9,41	2254
	$b_{01} = 0,63445$	0,040009				
	$b_{02} = 0,14355$	0,041405				
	$b_{10} = 5,18497$	0,777859				
	$b_{11} = 1,10675$	0,313015				
	$b_{20} = 0,32171$	0,020568				
	$b_{21} = 0,01024$	0,002352				

Em que:  $b_i$  = estimadores dos parâmetros;  $S_{yx}$  = erro padrão da estimativa absoluto;  $S_{yx}\%$  = erro padrão da estimativa percentual;  $r$  = coeficiente de correlação entre valores observados e estimados e; AIC = Critério de Informação de Akaike.

A dispersão de resíduos do modelo Logistic modificado não mostrou tendenciosidade para estimativa da altura total, com relação superior a 0,9 entre os valores observados e estimados, distribuição de resíduos concentrando-se nas classes centrais de erro (Figura 3).



**Figura 3.** Distribuição dos erros de estimativa (a), correlação entre volumes observados e preditos (b) e histograma da frequência de erro relativo (c), do modelo ajustado de Logistic modificado para o povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil.

#### 4.2. Modelagem do volume

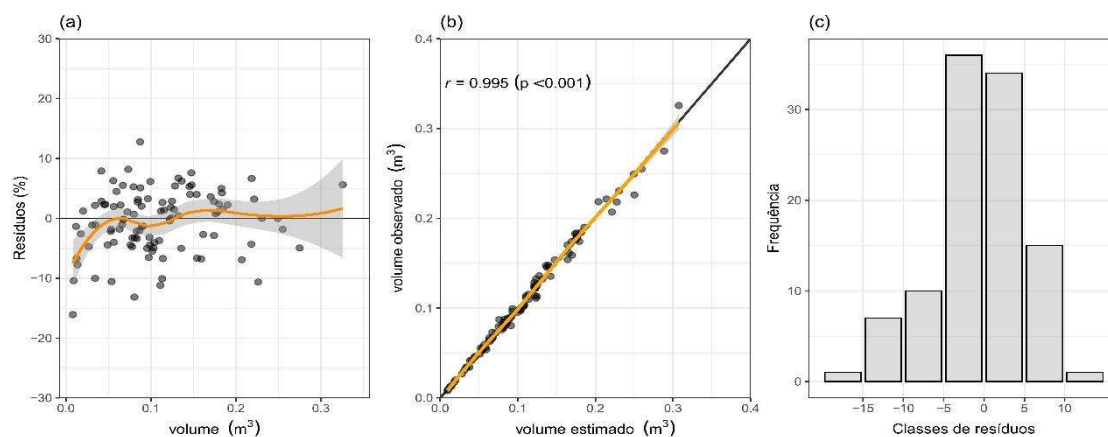
Os ajustes volumétricos, indicaram que o modelo de Schumacher-Hall foi mais preciso para estimativa do volume, com erro padrão absoluto e relativo de  $0,0063 \text{ m}^3$  e  $5,74\%$ , respectivamente, menor AIC e com coeficiente de correlação superior a  $0,99$ , indicando uma forte associação entre os valores estimados e observados. As equações de simples entrada (Gompertz, Kopecky-Gehrhardt e Husch) geram resultados inferiores, com erro padrão relativo superior a  $10\%$ . Todos os ajustes geraram parâmetros significativos (Tabela 7).

**Tabela 7.** Estimadores dos parâmetros e estatísticas de precisão para cada equação volumétrica, ajustadas para árvores de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil.

Modelo	Parâmetros	Erro padrão dos parâmetros	$r$	$S_{yx}$	$S_{yx}\%$	AIC
Schumacher-Hall	$b_0 = 7,945 \times 10^{-05}$	$8,78 \times 10^{-06}$	0,995	0,0063	5,74	-607,07
	$b_1 = 1,87$	0,04802				
	$b_2 = 0,884$	0,06363				
Ogaya	$b_0 = 1,55 \times 10^{-04}$	$2,65 \times 10^{-05}$	0,995	0,0067	6,02	-599,82
	$b_1 = 3,06 \times 10^{-05}$	$1,61 \times 10^{-06}$				
Takata	$b_0 = 19821,19$	$3,28 \times 10^{-05}$	0,995	0,0065	5,90	-603,37
	$b_1 = 322,15$	$1,91 \times 10^{-06}$				
Gompertz	$b_0 = 1,58846$	0,68195	0,984	0,0118	10,66	-502,89
	$b_1 = 1,90121$	0,02296				
	$b_2 = 0,06848$	0,01238				
Kopezky-Gehrhardt	$b_0 = -0,02186$	$3,00 \times 10^{-03}$	0,983	0,0120	10,89	-500,41
	$b_1 = 0,0007527$	$1,53 \times 10^{-05}$				
Husch	$b_0 = 2,07 \times 10^{-04}$	$3,07 \times 10^{-05}$	0,985	0,0116	10,45	-507,25
	$b_1 = 2,419$	$5,37 \times 10^{-02}$				

Em que:  $b_i$  = estimadores dos parâmetros;  $S_{yx}$  = erro padrão da estimativa absoluto;  $S_{yx}\%$  = erro padrão da estimativa percentual;  $r$  = coeficiente de correlação entre valores observados e estimados e; AIC = Critério de Informação de Akaike.

A distribuição dos valores observados e preditos gerados pelo modelo ajustado de Schumacher-Hall, apresentou alta correlação, com distribuição dos resíduos compreendida entre  $\pm 20\%$ , mostrando não tendenciosidade nas estimativas. Para esta distribuição, os maiores números de erros se concentram nas classes de  $\pm 10\%$  (Figura 4).



**Figura 4.** Distribuição dos erros de estimativa (a), correlação entre volumes observados e preditos (b) e histograma da frequência de erro relativo (c), do modelo ajustado de Schumacher-Hall para o povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil.

### 4.3. Modelagem da capacidade produtiva

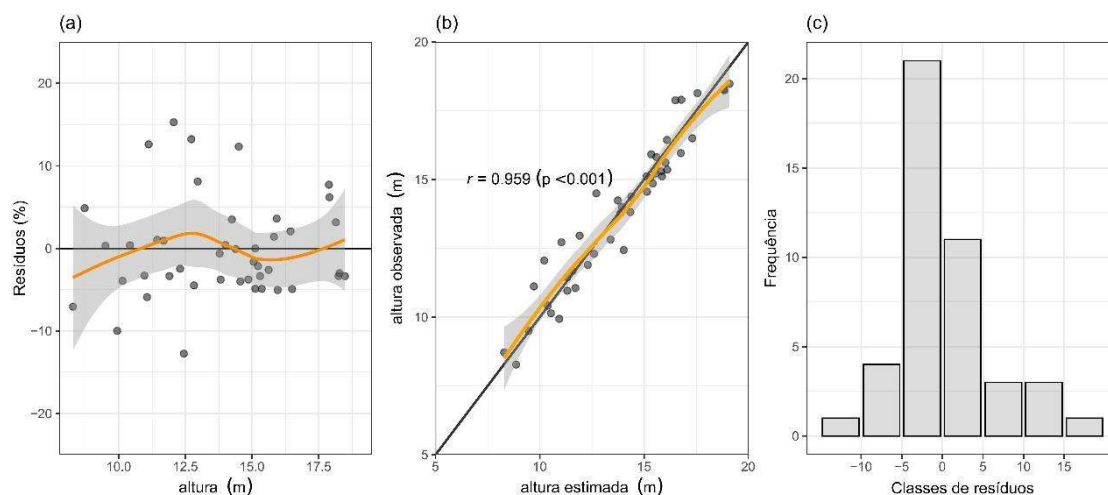
Com base nos critérios estatísticos, o modelo de Chapman-Richards (ADA-anamórfico) foi o que melhor se ajustou aos dados de crescimento de Hd em função da idade, apresentando maior  $r$  (0,959), menor  $S_{yx}$  (0,802 m),  $S_{yx}\%$  (5,79%) e AIC (109,45), fornecendo estimativas mais compatíveis com os dados observados (Tabela 8). Os parâmetros de regressão foram significativos ( $p < 0,05$ ).

**Tabela 8.** Estimadores e estatísticas de precisão das equações de crescimento em altura dominante para o povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil.

Modelo	Parâmetros	Erro padrão dos parâmetros	$r$	$S_{yx}$	$S_{yx}\%$	AIC
Chapman-Richards	$b_0 = 16,7676$	0,9732	0,907	1,724	11,32	220,93
	$b_1 = 0,6745$	0,1901				
	$b_2 = 1,4499$	0,4087				
Logistic	$b_0 = 16,0548$	0,5506	0,907	1,720	13,971	220,68
	$b_1 = 5,2334$	1,3273				
	$b_2 = 1,1593$	0,1788				
Gompertz	$b_0 = 16,4043$	0,6934	0,907	1,721	13,972	220,69
	$b_1 = 0,8658$	0,1817				
	$b_2 = 0,8623$	0,152				
Lundqvist-Korf (ADA – Polimórfico)	$b_1 = 23,2585$	2,2894	0,950	0,865	6,226	116,01
	$b_3 = 0,8126$	0,1052				
Chapman-Richards (ADA - Anamórfico)	$b_1 = 0,6498$	0,07103	0,959	0,802	5,79	109,45
	$b_2 = 1,37255$	0,11244				
Chapman-Richards (ADA – Polimórfico)	$b_0 = 18,14$	0,5013	0,951	0,854	6,153	114,97
	$b_1 = 1,207874$	0,1031				

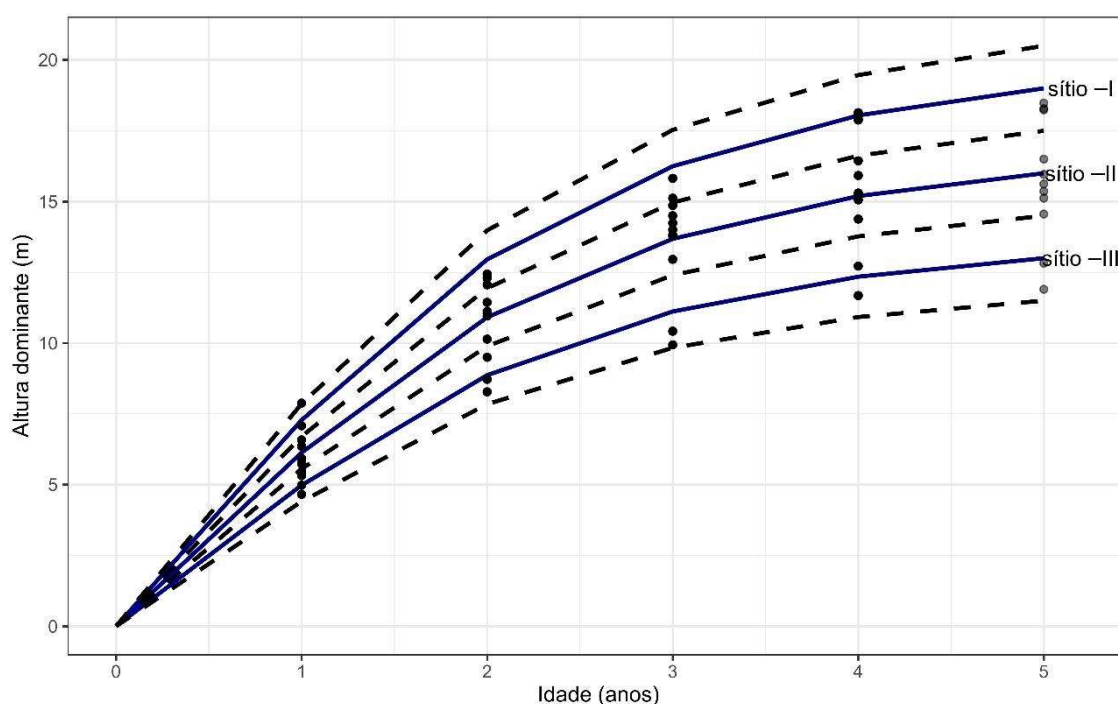
Em que:  $b_i$  = estimadores dos parâmetros;  $S_{yx}$  = erro padrão da estimativa absoluto;  $S_{yx}\%$  = erro padrão da estimativa percentual;  $r$  = coeficiente de correlação entre valores observados e estimados e; AIC = Critério de Informação de Akaike.

A distribuição dos resíduos percentuais desse modelo não demonstrou tendenciosidade na estimativa de Hd, com amplitude de resíduo inferior a  $\pm 20\%$ , concentrados nas classes de  $\pm 5\%$  de erro e apresentando uma alta correlação ( $>0,9$ ) (Figura 5).



**Figura 5.** Distribuição dos erros de estimativa (a), correlação entre volumes observados e preditos (b) e histograma da frequência de erro relativo (c), do modelo ajustado de Schumacher-Hall (ADA – Anamórfico) para o povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil.

As curvas geradas pelo modelo de Chapman-Richards (ADA – Anamórfico), descreveram o comportamento da altura dominante em função da idade. Os resultados demonstraram que existem locais com características produtivas distintas, repercutindo na diferença de potencial produtivo, representada pelos índices de sítio (SI) de 13, 16 e 19 m (Figura 6). A distribuição das parcelas mostra que, 38,5% (n=5), 53,8% (n= 7) e 7,7% (n=1) das mesmas, enquadraram-se nas classes de baixa, média e alta capacidade produtiva, respectivamente.



**Figura 6.** Curvas de índice de sítio para o povoamento de paricá na Amazônia Oriental, Brasil.

#### 4.4. Validação das modelagens

Com base nos resultados dos ajustes dos modelos de altura, volume e altura dominante apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8, selecionou-se um modelo para cada variável foram submetidos ao teste de validação. Apenas os resíduos do modelo de crescimento em altura dominante apresentaram normalidade, dessa maneira o teste t pareado foi utilizado para validação do modelo. Por outro lado, os modelos para estimativa da altura e volume não apresentaram erros com distribuição normal, portanto, o teste utilizado foi o Qui-quadrado conforme a Tabela 9. Os resultados dos testes de validação indicaram que não há diferença estatística ( $p > 0,05$ ) entre os valores observados e estimados pelas equações.

**Tabela 9.** Teste de normalidade e de validação para cada equação selecionada para estimativa da altura total, do volume e da altura dominante do povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil.

Modelo	Shapiro-Wilk	Teste Qui-quadrado / Teste t pareado
Logistic modificado	W = 0,973, p-valor = 0,001	$X^2 = 21941$ , p-valor = 0,195
Schumacher-Hall	W = 0,962, p-valor = 0,015	$X^2 = 380$ , p-valor = 0,236
Chapman-Richards (ADA)	W = 0,930, p-valor = 0,519	t = 0,334, p-valor = 0,744

Em que: W = estatística W calculada;  $X^2$  = calculado conforme a estatística do teste do Qui-quadrado; t = t calculado conforme estatística do teste t bicaudal.



## **5. DISCUSSÃO**

### **5.1. Modelagem da altura**

Conforme foi hipotetizado, os modelos biológicos garantiram qualidade de ajuste ligeiramente superiores e condizentes com a realidade do crescimento biológico da espécie em altura. No entanto, erros inferiores a 10% para estimativa da altura são desejáveis, sendo um valor considerado adequado por muitos estudos relacionados a equações dendrométricas para florestas plantadas (CAMPOS; LEITE 2017). Porém, os ajustes que consideraram apenas a relação altura-diâmetro, proporcionaram erros superiores a 10%, sugerindo estimativas de baixa confiabilidade. Portanto, foi utilizado um modelo genérico, cujas as covariáveis explicam a variabilidade da altura total (CARVALHO et al., 2011; MENDONÇA et al., 2015; ALVES et al., 2017)

Dentro deste contexto, o modelo Logistic com covariantes desenvolvido neste estudo para estimativa da altura do povoamento de paricá, possui a capacidade de estimar a variável para diferentes densidades de povoamento (representada pela área basal), idade (diferentes fases do crescimento) e altura dominante (variabilidade do sítio que incide sobre o crescimento em altura). Esta abordagem vem garantido ganhos de precisão na estimativa da altura em diferentes espécies como eucalipto (GUIMARÃES et al., 2009; MENDONÇA et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2015), pinus (SENA et al. 2015) e cedro australiano (ALVES et al., 2017).

Embora o ajuste de modelos lineares seja mais simples é recomendado o uso de modelos não lineares, pois possuem maior capacidade de explicar a relação não linear entre altura e diâmetro das árvores de paricá, tendo em vista a alta variabilidade de plantios seminais (SENA et al., 2015). Além disso, as covariantes altura dominante, idade e área basal, apresentaram alta significância nos modelos de altura, resultados coerentes com os estudos de Leite e Andrade (2003) e Sena (2015), aos estudar o emprego desta abordagem para estimativa da altura em povoamentos florestais.

### **5.2. Modelagem do volume**

Os modelos de dupla entrada garantiram ajustes mais precisos do povoamento, corroborando com a segunda hipótese elaborada. Tal resultado se dá pelo fato das variáveis dendrométricas em plantios seminais possuírem uma alta variabilidade, o que

reflete sobre o volume das árvores individuais. Portanto, este tipo de modelo é mais indicado nestas situações, mesmo a altura sendo uma variável de difícil mensuração e sujeita a alguns erros (CAMPOS; LEITE, 2017).

Com isso o modelo de Schumacher-Hall foi selecionado e validado para estimativa do volume de árvores em pé de paricá. Este modelo também estimou com precisão os dados de volume de árvores da mesma espécie no estado do Pará com cinco anos de idade (HOFFMANN et al., 2011), demonstrando que o modelo se adequa bem para estimativa do volume total da espécie e para outras como teca (VENDRUSCOLO et al. 2015).

### **5.3. Modelagem da capacidade produtiva**

Por intermédio do crescimento em altura dominante foi possível comprovar que o paricá responde à variabilidade do sítio (fatores de produção: água, luz e nutrientes), confirmando a terceira hipótese elaborada, pois a altura dominante é a variável que menos sofre efeito do espaçamento e de outros tratamentos silviculturais (ASSMANN, 1970; MACHADO et al., 1997; BURKHART; TOMÉ, 2012; MINOCHE et al., 2017).

De maneira geral os modelos ajustados a partir da abordagem da diferença algébrica (ADA), proporcionaram ajustes mais precisos quando comparados com os modelos tradicionais (curva-guia). Tal fato tem relação do modelo selecionado ser ajustado por métodos de equações diferenciais, ou seja, que expressam a variável de produção futura ( $H_d$  na idade futura) em função da idade futura, produção inicial ( $H_d$  na idade inicial) e idade inicial (BURKHART; TOMÉ, 2012).

As curvas anamórficas geradas pelo modelo de Chapman-Richards (ADA), refletiram a tendência de dispersão da nuvem dos valores observados de altura dominante, sugerindo que o método das diferenças algébricas é eficiente para determinar os índices de sítio do povoamento de paricá. De acordo com Bermejo et al. (2004), a variabilidade de capacidade produtiva reflete na importância do uso do índice de sítio na modelagem de crescimento e produção florestal. A maior parte das parcelas encontram-se distribuídas na classe produtiva intermediária e um número menor nas de alta e baixa capacidade produtiva.

Os índices de sítio gerados pelo modelo de Chapman-Richards (ADA), proporcionaram centros de classes de sítio variando de 13 à 19 m, que foram inferiores aos valores encontrados por Silva et al. (2013) (17,5 à 22,5 m) ao estudar um povoamento

de paricá aos cinco anos de idade no estado do Pará. Tais resultados para ambos os estudos, indicam que o modelo de Chapman-Richards (ADA) se adequa aos padrões de crescimento em altura dominante da espécie, proporcionando ajustes precisos.

## 6. CONCLUSÃO

As modelagens aplicadas foram precisas e consistentes com o crescimento das variáveis avaliadas, desenvolvendo o modelo Logistic com covariáveis para altura total, modelo de Schumacher-Hall para o volume e de Chapman-Richards (ADA-anamórfico) para altura dominante. O modelo Logistic com covariantes desenvolvido proporcionou ganhos de precisão na estimativa da altura total para diferentes densidades de povoamento, diferentes fases do crescimento e variabilidade do sítio. Com isso, as modelagens servem de base para condução e planejamento da produção da espécie na Amazônia.

## 7. REFERÊNCIAS

AKAIKE, H. On the likelihood of a time series model. **The Statistician**, v. 27, p. 217–235, 1978.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ALVES, J. DE A. et al. EQUAÇÕES HIPSOMÉTRICAS PARA *Toona ciliata* COM INCLUSÃO DE COVARIANTES HYPSONOMETRIC. v. 27, p. 581–595, 2017.

ASSMANN. **The Principles of Forest Yield Study: Studies in the Organic Production, Structure, Increment and Yield of Forest Stands**. Pergamon, 1970.

BERMEJO, I.; CAÑELLAS, I.; SAN MIGUEL, A. Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, v. 189, n. 1–3, p. 97–110, 2004.

BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. Springer, 2012.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: Perguntas e respostas**. 5. ed. Viçosa: UFV, 2017.

CARVALHO, S. DE P. C. et al. Modelos não lineares generalizados aplicados na predição da área basal e volume de *Eucalyptus* clonal. **Cerne**, v. 17, n. 4, p. 541–548, 2011.

ELZHOV, T. et al. Package “minpack. lm” [https://Cran.R-Project.Org/Web/Packages/Minpack.Lm/Minpack.Lm.Pdf](https://cran.r-project.org/web/packages/Minpack.Lm/Minpack.Lm.Pdf), 2016. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/minpack.lm/minpack.lm.pdf>>

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos: 5ª Edição** Brasília, 2018.

CUNHA NETO, E. M. et al. Prognose da altura total de paricá por meio de redes neurais artificiais. **IV ENCONTRO BRASILEIRO DE MENSURAÇÃO FLORESTAL**, n. September, 2018.

GUIMARÃES, M. A. M. et al. Height-diameter models in forestry with inclusion of covariates. **Cerne**, v. 15, n. 3, p. 313–321, 2009.

GOMPERTZ, B. On the Nature of the Function Expressive of the Law of Human Mortality, and on a New Mode of Determining the Value of Life Contingencies. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 115, p. 513–583, 1825.

GONÇALVES, J. C. et al. Comparação dos modelos prognósticos de Clutter e da função Logística. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 87, p. 311, 2016.

HOFFMANN, R. G. et al. Caracterização dendrométrica de plantios de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke) na região de Paragominas, PA. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 4, p. 675–684, 2011.

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira 2ª edição**. v. 55, 2012.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 23 jan. 2021.

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. DE. Importância das variáveis altura dominante e altura total em equações hipsométricas e volumétricas. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 301–310, 2003.

MACHADO, S. A. et al. Classificação de sítio para bracatingais na região metropolitana de Curitiba. **Bol. Pesq. Fl.**, v. 35, p. 21–37, 1997.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. Guarapuava: UNICENTRO, 2014.

MCCULLAGH, P.; NELDER, J. A. **Generalized linear models**. London: Chapman & Hall, 1983.

MENDONÇA, A. R.; DE CHAVESE CARVALHO, S. P.; CALEGARIO, N. Modelos Hipsométricos Generalizados Mistos Na Predição Da Altura De *Eucalyptus* Sp. **Cerne**, v. 21, n. 1, p. 107–115, 2015.

MENDONÇA, R. D. A. et al. Modelos hipsométricos e de crescimento em altura das árvores dominantes e codominantes para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 90, p. 151–160, 2011.

MINOCHE, D. et al. Determining the site index of Teak (*Tectona grandis* L.) plantations in Tabasco, Mexico. **Ciencia e Investigacion Agraria**, v. 44, n. 2, p. 154–167, 2017.

OLIVEIRA, G. M. V. et al. Equações hipsométricas para *Eucalyptus* spp. Não manejado em idade avançada com técnicas de inclusão de covariantes. **Cerne**, v. 21, n. 3, p. 483–492, 2015.

PAULA, M. T. DE et al. Economic viability of production of tree paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke) of reforestation project in the municipality Paragominas-PA, Brazil. **Journal of Life Sciences**, v. 8, n. January 2014, p. 967–971, 2014.

PEDERSEN, T. L. **Package ‘ggplot2’: RStudio**, 2020.

R CORE TEAM. **A language and environment for statistical computing: R foundation for statistical computing** Vienna, Austria, 2021.

RICHARDS, F. J. A flexible growth function for empirical use. **Journal of Experimental Botany**, v. 10, n. 2, p. 290–301, 1959.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. D. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 9, p. 719–734, 1933.

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

SENA, A. L. M. et al. Linear and nonlinear models with use of covariates for hypsometric relationship of two tropical pine species. **Ciencia Florestal**, v. 25, n. 4, p. 969–980, 2015.

SILVA, G. F. et al. Modeling Growth and Yield of *Schizolobium amazonicum* under Different Spacings. **International Journal of Forestry Research**, v. 2013, n. December, p. 1–10, 2013.

VENDRUSCOLO, D. G. S. et al. Identidade em Modelos Hipsométricos para *Tectona grandis* com Diferentes Espaçamentos em Cáceres-MT. **Nativa**, v. 3, n. 1, p. 44–49, 2015.

## **CAPÍTULO 2: DIFERENTES ABORDAGENS DO MODELO DE CLUTTER NA PROJEÇÃO DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE PARICÁ NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

### **1. INTRODUÇÃO**

Os reflorestamentos possuem o papel de mitigar a pressão nas florestas nativas, promover a recuperação de áreas degradadas, gerar créditos de carbono, bem como possibilitar o desenvolvimento econômico, social e ambiental (ALMEIDA; COUTINHO; SANTANA, 2011; IBÁ, 2020). Devido as suas características, como crescimento rápido e boa adaptação às condições do ambiente, a utilização do paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby) em cultivos florestais e agroflorestais vem sendo implementada (SCHWARTZ et al., 2017). Porém, poucos estudos exploraram o comportamento do crescimento e produção do paricá em plantios comerciais (OHASHI; YARED; FARIAS NETO, 2010; RUIVO et al., 2010; CORDEIRO et al., 2015). Desta forma, o conhecimento crescimento e produção do paricá poderá ajudar na determinação e aplicação de tratamentos silviculturais para melhores rendimentos em plantios comerciais.

Dentre os métodos utilizados para determinar produções futuras em florestas equiâneas, destacam-se, os modelos em nível de povoamento total, no qual, estima o volume médio em função de parâmetros como densidade, idade e sítio (SCOLFORO, 2006; NOVAES et al., 2017). O modelo de Clutter desenvolvido inicialmente para retratar floresta de coníferas, consiste no mais empregado na projeção de produções em povoamentos florestais no Brasil (CLUTTER, 1963). Portanto, este modelo que foi desenvolvido para espécies com maior idade de rotação, pode gerar prognoses imprecisas do crescimento e produção (SALLES et al., 2012).

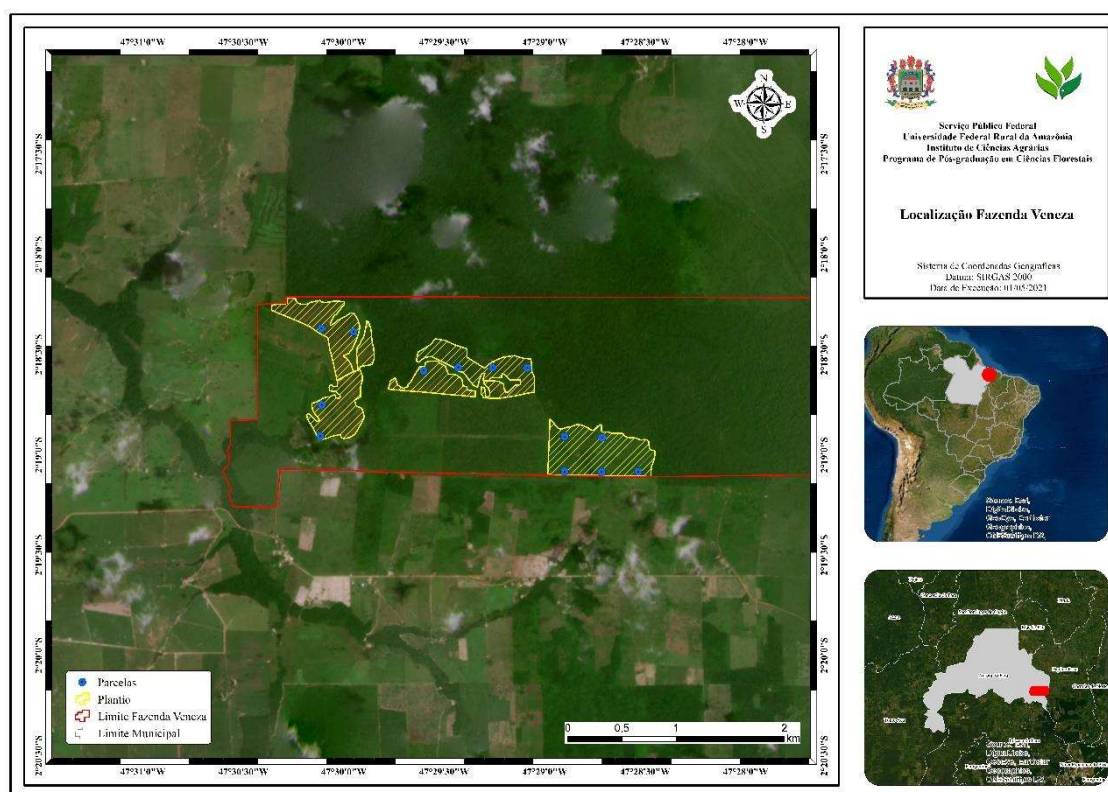
No entanto, este não leva em consideração a mortalidade, ingresso e outras informações, que possibilitem a projeção do crescimento líquido do povoamento. A mortalidade apresenta-se como um componente de crescimento em povoamentos florestais, ocasionada pelo aumento da competição entre árvores, pela limitação dos fatores de crescimento como água, nutrientes e luz (CAMPOS; LEITE, 2017). Por ser uma espécie pioneira, o paricá pode apresentar um ciclo de vida curto, dependendo das condições ambientais e de outros fatores externos, como ataque de patógenos. Em

povoamentos que não são sujeitos a desbaste, os chamados de estocados, como é o caso da rotação do paricá, a mortalidade causa maior influência na produção presente e futura (GOMES et al., 2019).

Neste contexto, utilizando dados de inventário florestal contínuo, levanta-se as seguintes questões: (i) o modelo de Clutter segmentado desenvolvido inicialmente para coníferas, será compatível e preciso na estimativa da produção de uma folhosa como a espécie paricá? (ii) A sobrevivência impacta no poder preditivo do modelo de Clutter? Para a primeira questão, hipotetizamos (H1) se os sinais dos parâmetros de regressão do modelo de Clutter forem consistentes com padrão de crescimento biológico, logo, espera-se projeções compatíveis e precisas para o manejo do povoamento de paricá. (H2) Se a sobrevivência afeta significativamente a densidade do povoamento, logo a inclusão da variável no modelo de Clutter, proporcionará estimativas mais precisas na prognose da área basal e conseqüentemente da produção volumétrica. Com isso, objetiva-se propor um modelo de Clutter com adição da sobrevivência para projetar o crescimento e produção do povoamento de paricá na Amazônia Oriental.

## **2. ÁREA DE ESTUDO**

O estudo foi realizado na Fazenda Veneza, pertencente a empresa Tietê Agrícola Ltda, localizada no município de Aurora do Pará - PA, cuja área plantada de paricá é de 123,5 ha e possui quatro talhões (11, 12, 13 e 14) (Figura 7). Os plantios são de origem seminal e foram implantados no ano de 2015, cuja área útil por planta é de 12,25 m<sup>2</sup> (3,5 x 3,5 m), e receberam os mesmos tratos culturais (Tabela 10). A área de estudo está situada na região de Floresta Ombrófila Tropical, sub-região dos altos platôs do Pará-Maranhão (IBGE, 2012). Na região predominam os solos: Latossolo Amarelo distrófico petroplântico (LAd); Latossolo Amarelo distrófico típico (lad) e; Plintossolo Pétrico concrecionário (FFc) (EMBRAPA, 2018). As declividades são classificadas como suave e suave ondulada, chegando próximo de 5% (IBGE, 2012), com altitudes em torno de 79 metros (INMET, 2021). Pela classificação climática de Köppen, a região em que a área de estudo se encontra, está enquadrada no clima tipo Am, o que o caracteriza como quente e úmido, clima tropical chuvoso, com curta estação seca (ALVARES et al., 2013).



**Figura 7.** Fazenda Veneza ( $2^{\circ}19'15.5''S$   $47^{\circ}30'31.8''W$  e  $2^{\circ}18'12.8''S$   $47^{\circ}26'38.4''W$ ), no município de Aurora do Pará, PA e das parcelas amostradas no plantio de paricá, propriedade da empresa Tiête Agrícola Ltda.

**Tabela 10.** Atividades operacionais silviculturais e suas características implantadas no povoamento seminal de paricá na fazenda Veneza, município de Aurora do Pará, PA.

Ano	Atividade operacional de silvicultura	Características das atividades
0	Combate à formiga	Com iscas formicidas
0	Limpeza da área	Mecanizada
1	Plantio	Manual
1	Replântio	Manual (> 10% de perda)
1	Adubação de arranque	NPK 2-28-16, KCl 100 g.planta <sup>-1</sup>
1	Coroamento	Enxada – 50 cm de raio
1, 2, 3, 4 e 5	Roçagem	Semi e mecanizada com trator hidráulico
1	Adubação de Manutenção	Boro 7 g.planta <sup>-1</sup> , KCl 100 g.planta <sup>-1</sup>



### 3. MÉTODOS

#### 3.1. Modelagem e análise estatística

##### 3.1.1. Modelagem global da produção volumétrica e do número de árvores

Para a modelagem em nível de povoamento total (MPT), foi utilizado o modelo segmentado de Clutter (1963) (Eq. 1, 2 e 3), ajustado de forma simultânea pelo método dos mínimos quadrados em dois estágios, sendo que a equação 2 representa o modelo de Clutter com o efeito da sobrevivência. Para isso, foi necessário determinar a área basal ( $m^2 ha^{-1}$ ), volume ( $m^3 ha^{-1}$ ) e índice de sítio (m), em cada idade e parcela, permitindo realizar prognose da área basal e volume futuro. A altura, volume e índice de sítio, foram

determinados com base nas equações  $h_t = \frac{(5,40165 + 0,63445 Hd + 0,14355 G)}{(1 + (5,18497 + 1,10675 G) \exp(-0,32171 + 0,01024 Id \text{ dap}))^2}$ ,

$v = 0,00007945 \text{ dap}^{1,87} h_t^{0,884}$  e  $H_{d_2} = H_{d_1} \left( \frac{(1 - \exp(-0,6498 Id_2))^{1,37255}}{1 - \exp(-0,6498 Id_1)} \right)$ , ajustada no capítulo

1. Além dessas variáveis, foi inserido o efeito do número de árvores no modelo de área basal de Clutter (Eq. 2), por intermédio do número de árvores futuras ( $N_2$ ), visto se tratar de um povoamento altamente estocado (Eq. 4). A área basal inicial, input para as projeções da produção foi obtida a partir do modelo tal para cada classe de sítio  $G_1 = -22,38684 IS^{0,34869} N_1^{0,35502}$ , gerando G de 3,3  $m^2 ha$  (Sítio 3), 5,24  $m^2 ha$  (Sítio 2) e 6,95  $m^2 ha$  (Sítio 1).

$$\text{Ln}(B_2) = \text{Ln}B_1 \left( \frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_0 \left( 1 - \frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_1 \left( 1 - \frac{I_1}{I_2} \right) S + \text{Ln}\epsilon_i \quad (1)$$

$$\text{Ln}(B_2) = \text{Ln}B_1 \left( \frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_0 \left( 1 - \frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_1 \left( 1 - \frac{I_1}{I_2} \right) S + \alpha_2(N_2) + \text{Ln}\epsilon_i \quad (2)$$

$$\text{Ln}(V_2) = \beta_0 + \beta_1 I_2^{-1} + \beta_2 S + \beta_3 \text{Ln}B_2 + \text{Ln}\epsilon_i \quad (3)$$

$$N_2 = N_1 \cdot \exp[\gamma \cdot (\theta^{Hd_2} - \theta^{Hd_1})] + \epsilon_i \quad (4)$$

Em que, Ln: logaritmo neperiano;  $I_1$  e  $I_2$ : idade atual e futura, respectivamente;  $B_1$  e  $B_2$ : áreas basais nas idades  $I_1$  e  $I_2$ , respectivamente ( $m^2 ha^{-1}$ );  $V_1$  e  $V_2$ : volumes nas idades  $I_1$  e  $I_2$ , respectivamente ( $m^3 ha^{-1}$ ); S: índice de sítio (m);  $N_1$  e  $N_2$ : número de árvore atual e futura, respectivamente ( $árv ha^{-1}$ ); Hd: altura dominante (m);  $\beta_n$ ,  $\alpha_n$ ,  $\gamma$  e  $\theta$ : parâmetros ajustados do modelo, e  $\epsilon_i$ : erro aleatório.

### 3.1.2. Critérios de seleção e validação dos modelos

Para testar a primeira hipótese (H1) da pesquisa, a precisão e compatibilidade das equações ajustadas, foram testadas pelas estatísticas de qualidade de ajuste, seguindo os seguintes critérios estatísticos: coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj.}$ ) para o modelo de Clutter, o coeficiente de correlação Pearson entre os valores estimados e observados ( $r_{\hat{y}_i y_i}$ ) para o modelo de número de árvores, erro de estimativa absoluto e relativo ( $S_{yx}$  e  $S_{yx}\%$ ), critério de informação de Akaike (AIC) (AKAIKE, 1978), análise gráfica da distribuição dos resíduos, dos valores observados e preditos, histograma da frequência de erro relativo, significância dos parâmetros de regressão a 95% de probabilidade. Após a avaliação da precisão dos modelos, foi avaliado a compatibilidade da prognose das diferentes abordagens do modelo de Clutter (CAMPOS; LEITE, 2017), projetando o crescimento em área basal da idade de 36 meses para 60 meses e de 48 meses para 60 meses.

As equações selecionadas foram validadas utilizando o teste t student a 95% de probabilidade para valores estimados paramétricos e teste do Qui-quadrado para não paramétricos, com 15% das parcelas ( $N=2$ ). Para testar a segunda hipótese (H2) as projeções realizadas a partir do modelo de Clutter, com e sem o efeito da sobrevivência, serão comparados pelo teste t student para valores estimados paramétricos ou teste do Qui-quadrado para não paramétricos. Os ajustes dos modelos foram realizados empregando o algoritmo de Levenberg–Marquardt da função “nlsLM”, do pacote ‘minpack.lm’ (ELZHOV et al., 2016) do software R® versão 4.0.5 (R CORE TEAM, 2021). A definição da idade técnica de rotação foi definida quando as curvas de incremento corrente anual (ICA) e incremento médio anual (IMA) se cruzarem, nesse ponto sugere que seja feita intervenção com corte raso (CAMPOS; LEITE, 2017).

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Modelagem de Clutter

O ajuste do modelo de Clutter com e sem o número de árvores sobreviventes, gerou medidas de precisão ( $r$ ,  $S_{yx}$ ,  $S_{yx}\%$  e AIC) suficientes para projeções consistentes da área basal e volume (Tabela 11). Na equação de volume, o sinal do coeficiente  $\beta$  negativo, corrobora com a consistência para projeções dos volumes futuros. No entanto, os parâmetros estimados não foram significativos ( $p > 0,05$ ) para o número de árvores, demonstrando que a variável não possui efeito sobre a produção em área basal e volume. Com isso, foi considerado o modelo sem a adição do  $N_2$ , como variável preditora.

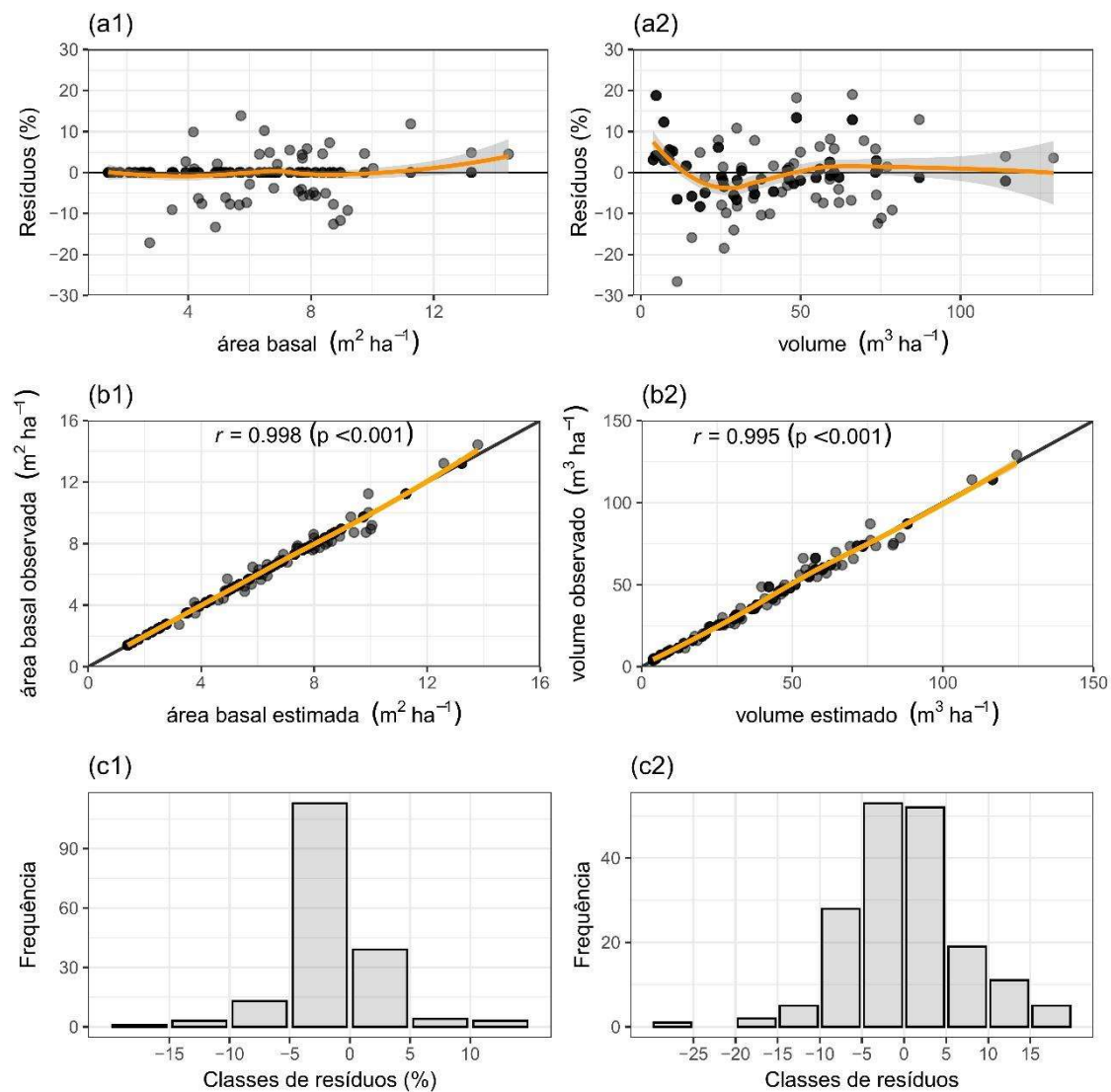
**Tabela 11.** Valores das medidas de precisão dos modelos para projeção de área basal e volume do modelo de Clutter para o povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil.

Modelo	Parâmetros	Erro padrão dos parâmetros	$r$	$S_{yx}$	$S_{yx}\%$	AIC
Nº de árvore	$b_0 = -0,013008$	0,004857	0,987	7,399	0,989	1206,929
Área basal sem N2	$b_0 = 0,462771$	0,167736	0,995	0,259	4,338	28,354
	$b_1 = 0,126041$	0,009981				
Volume sem N2	$b_0 = 1,378369$	0,053855	0,994	2,883	7,2028	878,161
	$b_1 = -0,937243$	0,068066				
	$b_2 = 0,039356$	0,004296				
	$b_3 = 1,106256$	0,029373				
Área basal com N2	$b_0 = 0,470908$	0,073513	0,995	0,259	4,339	29,4058
	$b_1 = 0,126214$	0,007011				
	$b_2 = -2,541739^{ns}$	3,50749				
Volume com N2	$b_0 = 1,395518$	0,054237	0,993	2,921	7,2943	882,6036
	$b_1 = -0,951185$	0,068738				
	$b_2 = 1,099563$	0,029637				
	$b_3 = 1,246387$	0,031678				

Em que:  $b_i$  = estimadores dos parâmetros;  $S_{yx}$  = erro padrão da estimativa absoluto;  $S_{yx}\%$  = erro padrão da estimativa percentual;  $r$  = coeficiente de correlação entre valores observados e estimados e; AIC = Critério de Informação de Akaike.

A distribuição dos valores observados e preditos apresentou alta correlação ( $>0,9$ ), com distribuição dos resíduos compreendida entre  $\pm 30\%$ , mostrando não

tendenciosidade nas estimativas. Para esta distribuição, os maiores números de erros se concentram nas classes de  $\pm 10\%$  (Figura 8).



**Figura 8.** Distribuição dos erros de estimativa (A), correlação entre volumes observados e preditos (B) e histograma da frequência de erro relativo (C), para área basal (1) e volume (2) do modelo de Clutter para o povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil.

Dados os resultados do ajuste do modelo de Clutter apresentado na Tabela 11, o modelo em sua forma usual foi selecionado para validação. Os resíduos apresentaram normalidade, dessa maneira o teste t pareado foi utilizado para validação do modelo. Os resultados do teste de validação indicaram que não há diferença estatística ( $p > 0,05$ ) entre os valores observados e estimados pelas equações de área basal e volume (Tabela 12).

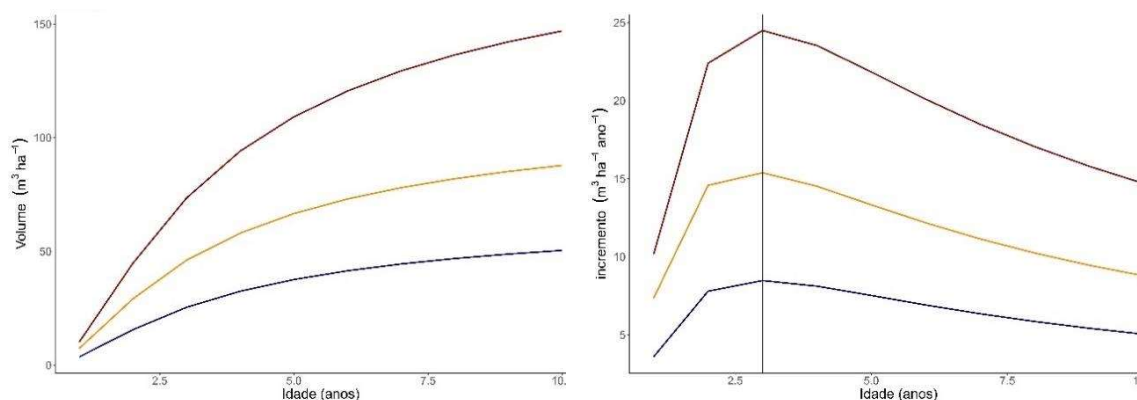
**Tabela 12.** Teste de normalidade e de validação da modelagem de Clutter do povoamento de paricá, na Amazônia Oriental, Brasil.

Modelo	Shapiro-Wilk	Teste t pareado
Área Basal	W = 0,934, p-valor = 0,558	t = -0,175, p-valor = 0,866
Volume	W = 0,931, p-valor = 0,521	t = -0,088, p-valor = 0,932

Em que: W = estatística W calculada; t = t calculado conforme estatística do teste t bicaudal.

#### 4.2. Projeção do crescimento e da produção

A maximização da produção em volume ocorreu no momento em que se atingiu o máximo incremento médio anual ( $IMA_{máx.}$ ), definindo o momento da estagnação teórica do crescimento do povoamento. Os  $IMAs_{máx}$  foram de  $8,48 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (IS = 13 m),  $15,39 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (IS = 16 m) e  $24,50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (IS = 19 m). A idade técnica não variou de acordo com a classe de produtividade, sendo todas aos três anos de idade (Figura 9).



**Figura 9.** Crescimento (1) e produção (2) nos índices de sítio 13 m (linha de cor azul), 16 m (linha de cor amarela) e 19 m (linha de cor marrom) em um povoamento de paricá na Amazônia Oriental, Brasil.

## 5. DISCUSSÃO

### 5.1. Modelagem de Clutter

Conforme foi hipotetizado, o modelo de Clutter (1963) apresentou características desejáveis para a modelagem da área basal e volume, cujos sinais dos parâmetros indicaram que as estimativas possuem precisão e são compatíveis com o crescimento biológico. Apesar de ser um modelo desenvolvido para espécies de alta idade técnica de rotação, como as espécies do gênero *Pinus*, este garantiu estimativas adequadas para o paricá que teoricamente, por ser uma espécie pioneira, possui rápido crescimento e consequentemente idade técnica de rotação mais curta quando comparada com outras essências florestais, como pinus, teca e mogno-africano. O erro padrão percentual, tanto para área basal quanto para volume, foram inferiores a 10%, indicando alta precisão do modelo. Os resultados deste estudo foram superiores aos observados por Silva et al. (2013), que ao modelarem o crescimento e produção para plantios de paricá em diferentes espaçamentos obtiveram erros superiores a 15% para área basal e 10% para volume.

Embora o plantio em questão seja superestocado, o que resulta em maior competição por fatores de produção (água, luz e nutrientes), que porventura afetam o crescimento e resultam na mortalidade de árvores, fenômeno conhecido como auto-desbaste (SILVA et al., 2013), a inserção da variável número de árvores futuras (N2), não garantiu ganhos em precisão e não foi significativa no modelo de Clutter ( $p > 0,05$ ). Pressupomos que tal resultado é consequência da baixa correlação entre as variáveis número de árvores e área basal para o plantio em questão (correlação inferior a 0,1) e sobrevivência superior a 95% das árvores durante os cinco anos de monitoramento. Este padrão pode estar associado com o fato de o plantio estudado ser de origem seminal (OLIVEIRA et al., 2019), o que resulta em alta heterogeneidade das variáveis dendrométricas. Portanto, para uma mesma densidade arbórea e idade, em um mesmo povoamento pode haver uma alta heterogeneidade diamétrica, resultando em diferentes valores para área basal, o que provavelmente ocasionou na não significância da inserção do termo na modelagem em área basal. Esses resultados reforçam a necessidade de novas pesquisas sobre o crescimento da espécie, bem como avanços no melhoramento genético para garantir maior homogeneidade das variáveis dendrométricas.

## **5.2. Projeção do crescimento e da produção**

O crescimento é o resultado da interação de dois componentes antagônicos, sendo um positivo e outro negativo, enquanto o crescimento de uma floresta diz respeito às mudanças ocorridas na sua estrutura dado um período de tempo, em virtude do crescimento das árvores que constituem a floresta. O componente positivo representa a expansão de um organismo e a tendência natural de multiplicação, por outro lado, o componente negativo representa as restrições impostas por fatores externos (competição, estresse hídrico e etc) e por fatores internos (mecanismos auto-regulatórios e envelhecimento) (ZEIDE, 1993; BURKHART; TOMÉ, 2012)

Cabe destacar que, as curvas de crescimento costumam responder capacidade produtiva do local onde está crescendo a floresta, bem como pela densidade de árvores no local. Assim, florestas que têm crescimentos diferentes, têm idades de intervenção diferentes (CAMPOS; LEITE, 2017). No entanto, ao avaliar os padrões de crescimento, as idades técnicas de intervenção foram as mesmas para as diferentes classes de capacidade produtiva, que é um padrão não esperado, visto a significância do modelo de crescimento em altura dominante. Estes resultados evidenciam a necessidade de mais estudos para a espécie, considerando diferentes espaçamentos, sítios, recursos genéticos de diferentes procedências, além de outras abordagens de modelagem.

## **6. CONCLUSÃO**

A modelagem utilizando o modelo simultâneo de Clutter, foi preciso e consistente para prognose da área basal e volume, descrevendo o crescimento biológico do paricá. O número de árvores futuras (sobrevivência), não foi significativa a ponto servir como variável preditiva da área basal e volume do povoamento. A idade técnica de rotação foi antecipada (três anos). A modelagem a nível de povoamento total possibilitou prescrições precisas para melhor condução do povoamento de paricá na Amazônia Oriental.

## 7. REFERÊNCIAS

- AKAIKE, H. On the likelihood of a time series model. **The Statistician**, v. 27, p. 217–235, 1978.
- ALMEIDA, L. S.; COUTINHO, C. H. O.; SANTANA, A. C. Perspectivas para o reflorestamento no estado do Pará a partir do uso da terra no nordeste e sudeste paraense. **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, v. 7, n. 13, 2011.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. Springer, 2012a.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: Perguntas e respostas**. 5. ed. Viçosa: UFV, 2017.
- CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. **Forest Science**, v. 9, n. 3, p. 354–371, 1963.
- CORDEIRO, I. M. C. C. et al. Avaliação de plantios de paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex ducke) barneby de diferentes idades e sistemas de cultivo no município de aurora do pará – PA (Brasil). **Ciencia Florestal**, v. 25, n. 3, p. 679–687, 2015.
- NOVAES, D. M. et al. Modelagem do crescimento de árvores e de povoamentos de *tectona grandis* utilizando dados de análise de tronco e de parcelas permanentes. **Revista Arvore**, v. 41, n. 5, 2017.
- ELZHOV, T. et al. **Package “minpack. lm”** <https://Cran.R-Project.Org/Web/Packages/Minpack.Lm/Minpack.Lm.Pdf>, 2016. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/minpack.lm/minpack.lm.pdf>>
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos: 5ª Edição** Brasília, 2018.
- GOMES, J. M. et al. *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (huber ex ducke) barneby can be used in enrichment planting in gaps caused by logging in Amazonia. **Ciencia Florestal**, v. 29, n. 1, p. 421–428, 2019.
- IBÁ. Brazilian tree industry annual report - base year 2019. **Associação Brasileira de Árvores**, p. 160, 2020.
- IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira 2ª edição**. [s.l: s.n.]. v. 55
- INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 23 jan. 2021.
- OHASHI, S. T.; YARED, J. A. G.; FARIAS NETO, J. T. DE. Variabilidade entre procedências de paricá *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby plantadas no município de Colares - Pará. **Acta Amazonica**, v. 40, n. 1, p. 81–88, 2010.



OLIVEIRA, L. G. M. et al. Variabilidade genética de duas procedências de mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev) no cerrado. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 124, p. 624–631, 2019.

R CORE TEAM. **A language and environment for statistical computing: R foundation for statistical computing** Vienna, Austria, 2021.

RUIVO, M. D. L. et al. Evaluation of growth of paricá ( *Schizolobium amazonicum* Huber ( Duck )) in differents agroforestry systems in northeast of Pará , Brazil. **World**, n. August, p. 56–58, 2010.

SALLES, T. T. et al. Clutter model in modeling growth and yield of eucalyptus in crop-livestock-forest integration systems. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 47, n. 2, p. 253–260, 2012.

SILVA, G. F. et al. Modeling Growth and Yield of *Schizolobium amazonicum* under Different Spacings. **International Journal of Forestry Research**, v. 2013, n. December, p. 1–10, 2013.

SCHWARTZ, G. et al. Enrichment planting in logging gaps with *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby: A financially profitable alternative for degraded tropical forests in the Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 390, p. 166–172, 2017.

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