



**Universidade Federal do Tocantins  
Campus Universitário de Gurupi  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais**

**RAFAELLA DA COSTA GAMA**

**MÉTODO DA ALTURA RELATIVA APLICADO EM POVOAMENTO  
DE *Khaya senegalensis***

**GURUPI – TO  
2019**



**Universidade Federal do Tocantins  
Campus Universitário de Gurupi  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais**

**RAFAELLA DA COSTA GAMA**

**MÉTODO DA ALTURA RELATIVA APLICADO EM POVOAMENTO  
DE *Khaya senegalensis***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais e Ambientais da Universidade Federal do Tocantins como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais e Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Valdir Carlos Lima de Andrade

**GURUPI - TO  
2019**



## RAFAELLA DA COSTA GAMA

### Método da altura relativa aplicado em povoamento de *Khaya senegalensis*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais e Ambientais em 20/03/2019 foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais e Ambientais e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data da aprovação: 20/03/2019.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Valdir Carlos Lima de Andrade – Orientador - UFT

Prof. Dr. Hélio Garcia Leite – Examinador - UFV

Profª. Drª. Livia Cássia Viana – Examinadora - UFT

Prof. Dr. Gil Rodrigues dos Santos – Examinador - UFT

Gurupi (TO).  
2019.

## DEDICATÓRIA E AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, que sem Ele esse trabalho nunca teria se concretizado. Agradeço em especial aos meus pais, Adelino e Selma, que sempre me apoiaram e sei que me apoiarão incondicionalmente no futuro, a eles dedico os resultados de dois anos de mestrado. Agradeço toda minha família, minha irmã Ludmilla, minhas tias, tios, primas e primos, que sempre estão presentes em minha vida, tornando-a mais especial.

Ao meu orientador o Dr. Valdir Carlos Lima de Andrade, pela paciência, os bons conselhos, as recomendações para enriquecer nosso trabalho durante esse período de orientação e sua importante contribuição para conclusão dessa etapa da minha vida.

Aos amigos da Pós-Graduação, sempre acolhedores, alegres e prestativos no desenvolvimento de nossas atividades acadêmicas, teóricas ou práticas. E no final desses dois anos estamos finalizando mais essa etapa de nossas vidas e que a próxima seja cercada de pessoas como vocês.

A Universidade Federal do Tocantins e, em especial, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, nas pessoas do secretário Jediel, sempre muito prestativo e atencioso, e o coordenador do programa o Dr. Marcos Giongo, sempre disponível quando solicitado.

## RESUMO GERAL

O objetivo do presente trabalho foi analisar o diâmetro e volume estimados pelo Método da Altura Relativa Original e Modificado, em comparação a seus correspondentes obtidos através da cubagem de árvores-amostra em povoamento de *Khaya senegalensis*. As comparações foram analisadas com base no menor erro médio percentual (EMP), menor raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEM), maior correlação linear múltipla entre valores estimados e correspondentes valores observados da variável dependente ( $r_{y_0y_e\%}$ ), menor Bias (Bias%), análise gráfica do resíduo e a exatidão determinada pelo teste qui-quadrado ( $\chi^2$ ) com nível de significância de 0,05 (P%). O ajuste dos modelos de *taper* e volumétricos foram avaliados com base no maior coeficiente de determinação ajustado (CDA), menor erro padrão residual (EPR) e análise gráfica de resíduos. O método original, com coeficiente angular da reta definido pelo  $i$ -ésimo intervalo na  $j$ -ésima árvore-amostra ( $CAR_{ij}$ ) e com coeficiente angular da reta médio ( $\overline{CAR}_i$ ), foi mais eficiente do que o método modificado. O  $\overline{CAR}_i$  melhorou quase todas as estatísticas analisadas. O modelo de Schöpfer (1966) foi o mais eficiente para estimar os diâmetros ao longo do fuste. As estatísticas e gráficos do ajuste com dados reais foram similares aos do ajuste com dados estimados pelos Métodos da Altura Relativa Original e Modificado. Quanto ao volume, o método original foi mais eficiente em estimar o volume individual utilizando o  $CAR_{ij}$ . O método modificado mostrou superioridade quando foi utilizado o  $\overline{CAR}_i$ . Os ajustes dos modelos volumétricos resultaram em estatísticas semelhantes e satisfatórias, sendo concluído que o Método da Altura Relativa é eficiente para gerar dados que poderiam ser utilizados no ajuste de modelos.

Palavras-chave: Função de Afilamento; *Taper*; Método Geométrico; Volume; Geometria Analítica.

## ABSTRACT GERAL

The objective of the present work was to analyze the diameter and volume estimated by the Original and Modified Relative Height Method, in comparison to the corresponding ones obtained through the sampling of sample trees in *Khaya senegalensis* stands. The comparisons were analyzed based on the lower mean percentage error (EMP), the lower square root of the mean square error (RQEM), the higher multiple linear correlation between estimated values and the observed values of the dependent variable ( $r_{y_0y_e\%}$ ), lower Bias (Bias%), graphical analysis of the residue and the accuracy determined by the chi-square test ( $\chi^2$ ) with significance level of 0.05 (P%). The adjustment of the taper and volumetric models were evaluated based on the highest The original method, with the angular coefficient of the line defined by the  $i$ -th interval in the  $j$ -th sample tree ( $CAR_{ij}$ ) and with a slope coefficient of the mean straight ( $\overline{CAR}_i$ ), was more efficient than the modified method, whereas the mean CAR improved almost all the analyzed statistics. The Schöfer model (1966) was the most efficient to estimate the diameters along the shaft. and adjustment graphs with real data were similar to the adjustment with data estimated by the Original and Modified Relative Height Methods. As for volume, the original method was more efficient in estimating the individual volume using  $CAR_{ij}$ . The modified method showed superiority when the  $\overline{CAR}_i$  was used. The adjustments of the volumetric models resulted in similar and satisfactory statistics, and it was concluded that the Relative Height Method is efficient to generate data that could be used in the adjustment of models.

Keywords: sharpening function; taper; geometric method; volume; analytical geometry.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO I - DESCRIÇÃO DO PERFIL DO FUSTE DE KHAYA SENEGALENSIS PELO MÉTODO DA ALTURA RELATIVA</b> .....	<b>12</b>
3.1	INTRODUÇÃO.....	14
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	15
3.2.1	<i>Área de Coleta de Dados</i> .....	15
3.2.2	<i>Dados Coletados</i> .....	15
3.2.3	<i>Método da Altura Relativa Original</i> .....	15
3.2.4	<i>Método da Altura Relativa Modificado</i> .....	18
3.2.5	<i>Alternativas de Utilização do Método da Altura Relativa</i> .....	20
3.2.6	<i>Ajuste de modelos de Taper</i> .....	21
3.2.7	<i>Critérios de análise das estimativas de taper</i> .....	21
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
3.3.1	<i>Análise do ajuste dos modelos de taper</i> .....	25
3.4	CONCLUSÕES.....	30
3.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO II - VOLUMETRIA DE KHAYA SENEGALENSIS PELO MÉTODO DA ALTURA RELATIVA</b> .....	<b>33</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	35
4.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	36
4.2.1	<i>Área de Coleta de Dados</i> .....	36
4.2.2	<i>Dados Coletados</i> .....	36
4.2.3	<i>Método da Altura Relativa Original</i> .....	36
4.2.4	<i>Método da Altura Relativa Modificado</i> .....	39
4.2.5	<i>Alternativas de Utilização do Método da Altura Relativa</i> .....	40
4.2.6	<i>Ajuste de modelos volumétricos</i> .....	41
4.2.7	<i>Critérios de análise</i> .....	41
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
4.3.1	<i>Comparação das Estimativas Volumétricas</i> .....	44
4.3.2	<i>Avaliação do Ajuste dos Modelos Volumétricos</i> .....	45
4.4	CONCLUSÕES.....	50
4.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1. MODELOS DE TAPER AJUSTADOS PARA K. SENEGALENSIS COM 2,9 ANOS DE IDADE NO MUNICÍPIO DE GURUPI – TO.....	21
TABELA 2. CRITÉRIOS ESTATÍSTICOS PARA AVALIAR O MÉTODOS DA ALTURA RELATIVA ORIGINAL E MODIFICADO.....	24
TABELA 3. COEFICIENTES ESTIMADOS DOS MODELOS TAPER AJUSTADOS COM DADOS REAIS DE CUBAGEM PARA KHAYA SENEGALENSIS AOS 2,9 ANOS.....	26
TABELA 4. ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO DOS MODELOS TAPER AJUSTADOS COM DADOS REAIS DE CUBAGEM PARA KHAYA SENEGALENSIS AOS 2,9 ANOS.....	26
TABELA 5. COEFICIENTES ESTIMADOS NO AJUSTE DOS MODELOS DE TAPER COM DADOS ESTIMADOS DE CUBAGEM PELO MÉTODO DA ALTURA RELATIVA ORIGINAL E MODIFICADO PARA KHAYA SENEGALENSIS AOS 2,9 ANOS.....	28
TABELA 6. ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO DOS MODELOS DE TAPER AJUSTADOS COM DADOS ESTIMADOS DE CUBAGEM PELO MÉTODO DA ALTURA RELATIVA ORIGINAL E MODIFICADO PARA KHAYA SENEGALENSIS AOS 2,9 ANOS.....	28
TABELA 7. MODELOS VOLUMÉTRICOS AJUSTADOS PARA K. SENEGALENSIS COM 2,9 ANOS DE IDADE NO MUNICÍPIO DE GURUPI – TO. ....	41
TABELA 8. CRITÉRIOS ESTATÍSTICOS PARA AVALIAR O MÉTODOS DA ALTURA RELATIVA ORIGINAL E MODIFICADO.....	44
TABELA 9. COEFICIENTES ESTIMADOS E ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO DOS MODELOS VOLUMÉTRICOS AJUSTADOS COM DADOS DE CUBAGEM RIGOROSA PELO MÉTODO DE SMALIAN. ....	46
TABELA 10. COEFICIENTES ESTIMADOS E ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO DOS MODELOS VOLUMÉTRICOS AJUSTADOS COM DADOS DO MÉTODO DA ALTURA RELATIVA ORIGINAL. ....	47
TABELA 11. COEFICIENTES ESTIMADOS E ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO DOS MODELOS VOLUMÉTRICOS AJUSTADOS COM DADOS DO MÉTODO DA ALTURA RELATIVA MODIFICADO. ....	47



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: CROQUI DE UMA ÁRVORE AMOSTRA, ILUSTRANDO AS INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DA ALTURA RELATIVA ORIGINAL. FONTE: ANDRADE (2001).....	16
FIGURA 2: CROQUI DE UMA ÁRVORE AMOSTRA, ILUSTRANDO AS INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DA ALTURA RELATIVA MODIFICADO. FONTE: ANDRADE (2001).....	19
FIGURA 3: DISPERSÃO DOS RESÍDUOS EM PORCENTAGEM EM RELAÇÃO AO DIÂMETRO NA ALTURA DE INTERESSE PARA <i>Khaya senegalensis</i> AOS 2,9 ANOS EM GURUPI - TO. .	25
FIGURA 4: DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS DOS MODELOS DE TAPER AJUSTADOS COM DADOS REAIS DE CUBAGEM PARA <i>Khaya senegalensis</i> AOS 2,9 ANOS EM GURUPI - TO. ....	27
FIGURA 5: DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS COM DADOS ESTIMADOS DE CUBAGEM PELO MÉTODO DA ALTURA RELATIVA ORIGINAL E MODIFICADO PARA <i>Khaya senegalensis</i> AOS 2,9 ANOS, EM GURUPI - TO. ....	29
FIGURA 6: CROQUI DE UMA ÁRVORE AMOSTRA, ILUSTRANDO AS INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DA ALTURA RELATIVA ORIGINAL. FONTE: ANDRADE (2001).....	37
FIGURA 7: CROQUI DE UMA ÁRVORE AMOSTRA, ILUSTRANDO AS INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DA ALTURA RELATIVA MODIFICADO. FONTE: ANDRADE (2001).....	39
FIGURA 8: DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DO MÉTODO DA ALTURA RELATIVA ORIGINAL E ALTURA RELATIVA MODIFICADO PARA <i>Khaya senegalensis</i> AOS 2,9 ANOS EM GURUPI - TO. ....	45
FIGURA 9: MELHORES E PIORES PERFIS GERADOS PELO MÉTODO DA ALTURA RELATIVA ORIGINAL E MODIFICADO PARA <i>Khaya senegalensis</i> AOS 2,9 ANOS EM GURUPI - TO. ....	46
FIGURA 10: DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS DOS MODELOS VOLUMÉTRICOS AJUSTADOS COM DADOS DE CUBAGEM RIGOROSA PELO MÉTODO DE SMALIAN PARA <i>Khaya senegalensis</i> AOS 2,9 ANOS EM GURUPI - TO. ....	48
FIGURA 11: DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS DOS MODELOS VOLUMÉTRICOS AJUSTADOS COM DADOS DO MÉTODO DA ALTURA RELATIVA ORIGINAL PARA <i>Khaya senegalensis</i> AOS 2,9 ANOS EM GURUPI - TO. ....	48
FIGURA 12: DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS DOS MODELOS VOLUMÉTRICOS AJUSTADOS COM DADOS DO MÉTODO DA ALTURA RELATIVA MODIFICADO, PARA <i>Khaya senegalensis</i> AOS 2,9 ANOS EM GURUPI - TO. ....	49

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

Em uma área florestal é essencial o monitoramento do desenvolvimento dos povoamentos, através da medição de variáveis dendrométricas como diâmetro, altura, área seccional e volumes de árvores, utilizando amostragem (SCOLFORO, 1997).

Usualmente a obtenção das variáveis dendrométricas é baseada no emprego de equações de *taper* (equações de afilamento do fuste) e volume, como Kozak et al. (1969), Schöpfer (1966), Demaerschalk (1972), Ormerod (1973), Stoate (1945) e Schumacher e Hall (1933). Para utiliza-las é necessário o emprego de cubagem, que em geral, requer o abate das árvores-amostra.

O Método da Altura Relativa é caracterizado por não abater as árvores-amostra, sendo as informações necessárias coletas em número reduzido de árvores, bem como, os dados oriundos de cada indivíduo são menores quando comparado a cubagem se árvores-amostra abatidas (ANDRADE; LEITE, 2001).

A espécie alvo do presente estudo, *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. conhecida popularmente como mogno africano, tem ganhado espaço no Brasil para suprir a demanda de madeira nobre.

De maneira geral, o mogno africano tem boa adaptabilidade no país, mas os estados do Amapá, Goiás, Tocantins, Ceará, Rondônia, Roraima, Pará, Piauí e Mato Grosso são especialmente aptos para produção (ROSA, 2014).

No Pará aos 39 anos o mogno africano cresce cerca de 3 cm/ano e em Minas Gerais, aos quatro anos, são 3,8 cm/ano, enquanto na África, Malásia e Austrália o crescimento em diâmetro é, respectivamente, de 1,9, 2,3 e 2,5 cm/ano (RIBEIRO; SOARES FILHO; SCOLFORO, 2014).

Sabe-se da importância do acompanhamento das variáveis dendrométricas em povoamento florestal, a espécie *K. senegalensis* não é uma exceção à regra, como produtora de madeira nobre com ciclo longo, de 18 a 25 anos, e ainda com plantios relativamente pequenos, a utilização de métodos de para obtenção das variáveis de interesse que não necessite o abatimento de árvores-amostra seria de grande valia.

Diante disso, o presente trabalho teve por objetivo avaliar as estimativas de diâmetro e volume, obtidos pelo Método da Altura Relativa Original e Modificado, em comparação a seus correspondentes observados através da cubagem de árvores-amostra, em povoamento de *K. senegalensis*.

## 2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, V. C. L.; LEITE, H. G. Uso da geometria analítica para descrever o *taper* e quantificar o volume de árvores individuais. **Revista Árvore**, v.25, n.4, p.481-486, 2001.

DEMAERSCHALK, J. P. Converting volume equations to compatible taper equations. **Forest Science**, v.18, n.3, p. 241-245, 1972.

KOZAK, A.; MUNRO, D. D.; SMITH, J. H. G. Taper functions and their application in forest inventory. **Forestry Chronicle**, v.45, n.4, p.278-283, 1969.

ORMEROD, D. W. A simple bole model. **Forestry Chronicle**, v.49, n.3, p.136-138, 1973.

RIBEIRO, A.; SOARES FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. S. Inventário florestal contínuo de plantios de mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) no Estado de Minas Gerais. In: CORTE, Ana Paula et al. **Atualidades em Mensuração Florestal**. 1.ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2014. p.187-191.

ROSA, F. O. **Zoneamento edafoclimático e respostas do mogno africano às condições do Cerrado**. 2014. 77 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solo e Água) - Escola de Agronomia. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

SCHÖEPFER, W. Automatisierung des massen, sorten und wertberechnung stenender waldbestände schriftenreihe bad. [S.l.]:**Wurt-Forstl.**, 1966. Não paginado.

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

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

STOATE, I. N. The use of a volume equation in pine stands. **Australian Forestry**, v.9, p.48-52, 1945.

### 3 CAPÍTULO I - DESCRIÇÃO DO AFILAMENTO DO FUSTE DE *Khaya senegalensis* PELO MÉTODO DA ALTURA RELATIVA

#### RESUMO

O objetivo deste estudo foi comparar os diâmetros estimados pelo Método da Altura Relativa, Original e Modificado, com os diâmetros reais obtidos na cubagem de árvores-amostra abatidas e mensuradas, de *Khaya senegalensis*. As comparações foram feitas com base no menor erro médio percentual (EMP), menor raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEM), maior correlação linear múltipla entre diâmetros estimados e observados ( $r_{y_0y_{e\%}}$ ), menor Bias, análise gráfica do resíduo e a exatidão determinada pelo teste qui-quadrado ( $\chi^2$ ) com nível de significância de 0,05 (P%). As equações de afilamento ajustadas foram avaliadas com base no coeficiente de determinação ajustado (CDA), erro padrão residual (EPR) e análise gráfica de resíduos. O método original com coeficiente angular da reta definido pelo  $i$ -ésimo intervalo na  $j$ -ésima árvore-amostra ( $CAR_{ij}$ ) e com coeficiente angular da reta médio ( $\overline{CAR}_i$ ) foram superiores ao método modificado, e o  $\overline{CAR}_i$  ainda melhorou quase todas as estatísticas analisadas. O modelo de Schöpfer (1966) se mostrou o mais adequado para estimar os diâmetros. As estatísticas e gráficos do ajuste com dados reais foram similares aos do ajuste com dados estimados pelo Método da Altura Relativa Original e Modificado.

Palavras-chave: Função de Afilamento; *Taper*; Método Geométrico; mogno africano.

## ABSTRACT

The objective of this study was to compare the diameters estimated by the Relative Height, Original and Modified Method, with the actual diameters obtained in the sampled and sampled sample trees of *Khaya senegalensis*. The comparisons were made based on the lowest mean error (EMP), the lowest square root mean square error (RQEM), the highest multiple linear correlation between estimated and observed diameters ( $r_{y_0y_e\%}$ ), lower Bias, graphical analysis of the residue and the accuracy determined by chi-square test ( $\chi^2$ ) with a significance level of 0.05 (P%). The adjusted tapering equations were evaluated based on the adjusted coefficient of determination (CDA), residual standard error (EPR) and graphical residue analysis. The original angular-slope method defined by the  $i$ th interval in the  $j$ -th sample tree ( $CAR_{ij}$ ) and with the mean slope coefficient ( $\overline{CAR}_i$ ) were higher than the modified method, and  $\overline{CAR}_i$  still improved almost all analyzed. The Schöpfer model (1966) proved to be the most adequate to estimate the diameters. The statistics and graphs of the adjustment with real data were similar to the adjustment with data estimated by the Original and Modified Relative Height Method.

Keywords: Sharpening Function; Taper; Geometric Method; African mahogany.

### 3.1 INTRODUÇÃO

A mesma árvore tem múltiplos usos finais, gerando valor agregado maior por atingir preços diferentes no mercado e conhecer o afilamento do fuste das árvores é essencial para o planejamento e execução de inventários quando o objetivo é quantificar os multiprodutos da madeira (MACHADO et al., 2004; COSTA et al., 2016).

O *taper* ou afilamento do fuste é a taxa de decréscimo do diâmetro ao longo do tronco em relação ao diâmetro à altura do peito (HUSCH et al., 2003). Os estudos acerca da forma do fuste baseiam-se em equações que estimam com relativa acuracidade o diâmetro em qualquer altura do fuste ( $h$ ), a partir de variáveis como o diâmetro a 1,3 m de altura ( $dap$ ) e a altura total ( $Ht$ ) (CAMPOS; LEITE, 2017).

O ajuste de modelos de *taper* é feito usualmente utilizando dados obtidos através da cubagem de árvores-amostra abatidas no povoamento. Dispor de métodos eficazes para descrição do afilamento do fuste, sem a necessidade de abate de árvores-amostra, é imprescindível para redução de gastos e aumento da agilidade nos procedimentos (ANDRADE et al., 2006; ALMEIDA et al., 2011).

O Método da Altura Relativa visa promover rapidez nos procedimentos e redução de custos. O método foi desenvolvido por Andrade e Leite (1997), com base nos princípios dos sólidos de revolução mostrados por Gomes (1957), para ter uma sequência de procedimentos à serem empregados nas atividades de quantificação de povoamentos florestais. Com transformações algébricas feitas no coeficiente angular de uma reta, para intervalos pré-definidos do fuste, estima-se os diâmetros em diferentes alturas e, conseqüentemente, o volume de madeira no fuste (CABACINHA, 2003, ANDRADE et al., 2009).

O objetivo do presente estudo foi avaliar a eficiência do Método da Altura Relativa, original e modificado, para estimar diâmetros em qualquer altura do fuste, e comparar com os diâmetros obtidos através de medição direta em árvores de *K. senegalensis*.

## 3.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.2.1 Área de Coleta de Dados

Os dados foram obtidos em plantio seminal de mogno africano, da espécie *K. senegalensis*, na Fazenda Jarina, zona rural de Gurupi, região sul do estado do Tocantins, localizada na latitude 11°42'42.2" sul, longitude 48°59'06.8" oeste.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen (1984), enquadra-se no Tropical com inverno seco (Aw), caracterizado por duas estações bem definidas, o verão chuvoso e nítida seca no inverno. A temperatura média anual varia de 28 a 30 °C e precipitação média anual varia de 1.200 a 1.400 mm, com elevado déficit hídrico entre os meses de maio a setembro (INMET, 2017).

O espaçamento inicial do plantio é de 6 x 4 m e a idade, no momento da coleta de dados, era de 2,9 anos. A área do povoamento é de 12 hectares e a área amostral foi de 7.500 m<sup>2</sup>, dividida em 10 parcelas retangulares de 750 m<sup>2</sup> cada (30 x 25 m), instaladas aleatoriamente.

### 3.2.2 Dados Coletados

Foram lançadas, aleatoriamente 10 parcelas retangulares de 750 m<sup>2</sup> cada. Em cada parcela foram abatidas 38 árvores para cubagem, com medição dos diâmetros nas alturas 0,10 m; 0,30 m; 0,70 m; 1,30 m; 2,00 m; e a partir desse ponto a cada metro, até a altura total. Estas árvores foram definidas de modo a abranger toda a amplitude de diâmetros (DAP) existente.

### 3.2.3 Método da Altura Relativa Original

Para estimar os diâmetros das árvores pelo Método da Altura Relativa Original utiliza-se os diâmetros do fuste nas alturas 0,1 m ( $dh_{0,1}$ ) e a 1,3 m de altura (DAP); a altura total (ht) e a altura relativa (hr) situada em um ponto entre o DAP e a ht (Figura 1).

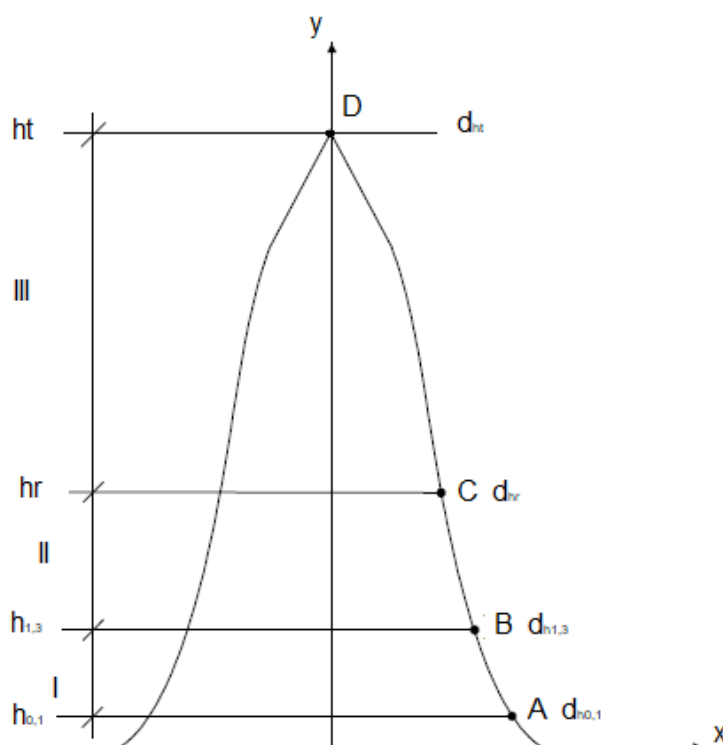


Figura 1: Croqui de uma árvore amostra, ilustrando as informações necessárias para o desenvolvimento do Método da Altura Relativa Original. Fonte: Andrade (2001).

em que:

$d_{h_{0,1}}$  - diâmetro em  $h_{0,1}$  metros do solo (cm);

$d_{h_{1,3}}$  - dap (cm);

$d_{hr}$  - diâmetro medido em  $hr$  (cm);

$d_{ht}$  - diâmetro medido em  $ht$  (cm);

A – ponto contendo o par ordenado  $(x = \frac{d_{h_{0,1}}}{2}; y = h_{0,1})$

B – ponto contendo o par ordenado  $(x = \frac{d_{h_{1,3}}}{2}; y = 1,3)$

C – ponto contendo o par ordenado  $(x = \frac{d_{hr}}{2}; y = hr)$

D – ponto contendo o par ordenado  $(x = 0; y = ht)$

I - intervalo formado entre 0,3 e 1,3 (pontos AB);

II - intervalo formado entre 1,3 e  $hr$  (pontos BC);

III - intervalo formado entre  $hr$  e  $ht$  (pontos CD).



Foi calculada a altura relativa ( $hr$ ) de cada árvore, empregando a expressão 1 (ANDRADE; LEITE, 2001):

$$hr = \frac{(Ht-2)}{2} \quad (1)$$

Utilizando os dados coletados, foi calculado um Coeficiente Angular da Reta (CAR), para três diferentes intervalos do fuste (Intervalo I =  $0,1 \leq h_{ij} \leq 1,30$ ; Intervalo II =  $1,30 < h_{ij} \leq hr$ ; Intervalo III =  $hr < h_{ij} \leq ht$ ), utilizando as expressões:

$$CAR_{Ij} = \frac{1,3-h_{0,1}}{\left(\frac{DAP_j-d_{0,1}}{2}\right)} \quad (2)$$

$$CAR_{IIj} = \frac{1,3-hr_j}{\left(\frac{DAP_j-d_{hr_j}}{2}\right)} \quad (3)$$

$$CAR_{IIIj} = \frac{hr_j-h_{t_j}}{\frac{d_{hr_j}}{2}} \quad (4)$$

em que:

$CAR_j$  = Coeficiente angular da reta definido pelo  $i$ -ésimo intervalo na  $j$ -ésima árvore amostra, em que  $i = I, II$  e  $III$ ;

$d_{0,1}$ ,  $DAP_j$  e  $d_{hr_j}$  = Diâmetros medidos à  $h_{0,1}$ ;  $h_{1,3}$  e  $hr$  metros do nível do terreno, na  $j$ -ésima árvore amostra;

$ht_j$  = Altura total da  $j$ -ésima árvore amostra.

Com base nos coeficientes angulares das retas foram geradas as expressões 5, 6 e 7, que possibilitaram estimar os diâmetros nos três intervalos pré-determinados do fuste:

$$d_{(0,1 \leq h_{ij} \leq 1,30)} = \frac{2h_{ij}-2,6}{CAR_{Ij}} + DAP_j \quad (5)$$

$$d_{(1,30 < h_{ij} \leq hr)} = \frac{2h_{ij}-2,6}{CAR_{IIj}} + DAP_j \quad (6)$$

$$d_{(hr < h_{ij} \leq ht)} = \frac{h_{ij}-1,3}{CAR_{IIj}} + \frac{h_{ij}-ht_j}{CAR_{IIIj}} + \frac{DAP_j}{2} \quad (7)$$

em que:

$d(0,1 \leq h_{ij} \leq 1,30)$  = Diâmetro na  $i$ -ésima altura desejada entre 0,1 m e 1,30 m na  $j$ -ésima árvore amostra;

$d(1,30 < h_{ij} \leq hr)$  = Diâmetro na  $i$ -ésima altura desejada entre 1,30 m e  $hr$  na  $j$ -ésima árvore amostra;

$d (hr < h_{ij} \leq ht)$  = Diâmetro na  $i$ -ésima altura desejada entre  $hr$  e  $ht$  na  $j$ -ésima árvore amostra.

Os diâmetros foram estimados nas mesmas alturas em que foram medidos na cubagem rigorosa, utilizando as fórmulas 5, 6 e 7.

### 3.2.4 Método da Altura Relativa Modificado

No Método da Altura Relativa Modificado (Figura 2) mantiveram-se as medições dos mesmos diâmetros do método original que são nas posições de 0,1 m, 1,3 m ( $dap$ ); altura total ( $ht$ ) e a altura relativa ( $hr$ ) obtida pela expressão 1. No entanto, além de  $hr$  foram calculadas três novas  $hr$  definidas pelas expressões 8, 9 e 10 (ANDRADE, 2001).

$$hr_1 = \frac{(ht-1,7)}{1,7} \quad (8)$$

$$hr_2 = \frac{(ht-1,4)}{1,4} \quad (9)$$

$$hr_3 = \frac{(ht-1,1)}{1,1} \quad (10)$$

Modificações observadas na Figura 2.

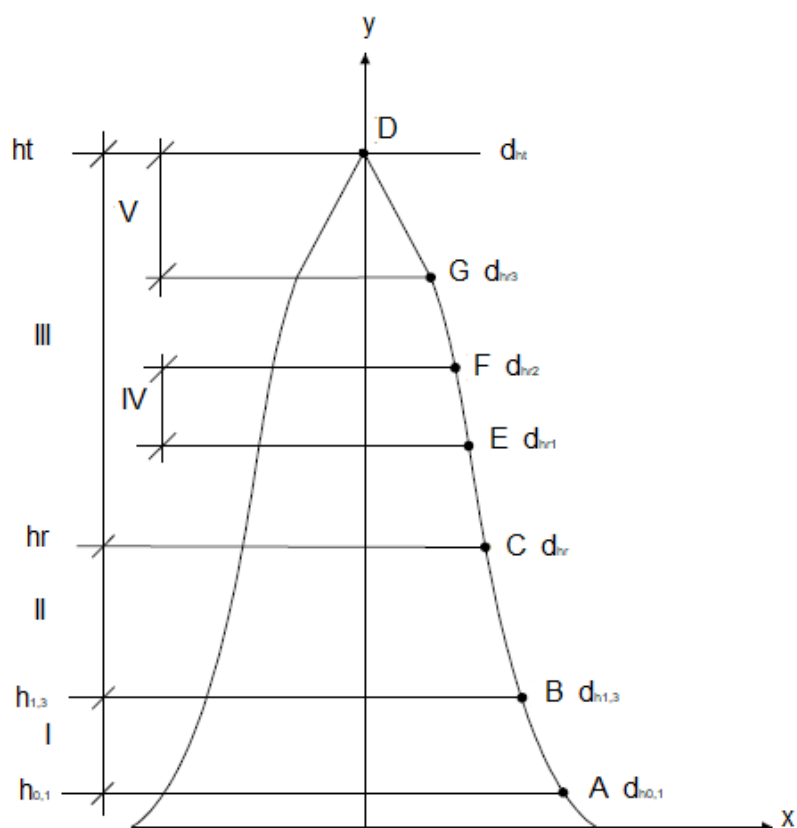


Figura 2: Croqui de uma árvore amostra, ilustrando as informações necessárias para o desenvolvimento do Método da Altura Relativa Modificado. Fonte: Andrade (2001).

em que:

$d_{hr1}$  - diâmetro calculado em  $hr_1$ ;

$d_{hr2}$  - diâmetro calculado em  $hr_2$ ;

$d_{hr3}$  - diâmetro calculado em  $hr_3$ ;

IV - intervalo formado entre  $hr_1$  e  $hr_2$  (pontos EF);

V - intervalo formado entre  $hr_3$  e  $ht$  (pontos GD);

$d_{h_{0,3}}$ ;  $d_{1,3}$ ;  $d_{hr}$ ;  $d_{ht}$ ; I; II e III, definidos anteriormente.

Assim, foram calculados os valores dos CAR utilizados no método original e dois novos CAR, definidos pelas expressões 11 e 12:

$$CAR_{IVj} = \frac{(2(hr_1)_j - 2(hr_2)_j)}{((d_{hr1})_j - (d_{hr2})_j)} \quad (11)$$

$$CAR_{Vj} = \frac{(2(hr_3)_j - 2ht_j)}{(dhr_3)_j} \quad (12)$$

Para cálculo do *taper* entre  $0,1 \leq h_{ij} \leq 1,30$  e  $1,30 < h_{ij} \leq hr_1$  foi utilizada a mesma formulação do método original, enquanto que para as novas seções são utilizadas as expressões 13 e 14.

Para  $hr_1 < h_{ij} \leq hr_3$ :

$$d_{hr_1 < h_{ij} \leq hr_3} = (hr_1 - hr_2)_j^{-1} \left[ \frac{hr_1(hr_2 - 2hr_1 + 2h_i + 1,3) - h_i(hr_2 + 1,3)}{2CAR_{II}} + \frac{(hr_2 - ht)(hr_1 - h_i)}{2CAR_{III}} + \frac{DAP_j(h_i - hr_1)}{4} \right] + \frac{(h_i + hr_1 - 2,6)_j}{(CAR_{II})_j} + DAP_j \quad (13)$$

Para  $hr_3 < h_{ij} \leq h_t$ :

$$d_{hr_3 < h_{ij} \leq h_t} = \left[ \frac{(h_i - ht)}{(hr_3 - ht)} \right]_j \left\{ (hr_1 - hr_2)_j^{-1} \left[ \frac{hr_1(hr_2 - 2hr_1 + 2hr_3 + 1,3) - (hr_3)(hr_2 + 1,3)}{2CAR_{II}} + \frac{(hr_2 - ht)(hr_1 - hr_3)}{2CAR_{III}} + \frac{DAP_j(hr_3 - hr_1)}{4} \right] + \frac{(hr_3 + hr_1 - 2,6)_j}{(CAR_{II})_j} + DAP_j \right\} \quad (14)$$

Os diâmetros foram estimados nas mesmas alturas utilizadas na cubagem das árvores-amostra abatidas, utilizando as fórmulas 5, 6, 13 e 14.

### 3.2.5 Alternativas de Utilização do Método da Altura Relativa

Os diâmetros estimados utilizando o Método da Altura Relativa Original e Modificado, com coeficiente angular da reta individual ( $CAR_{ij}$ ) para cada árvore, foram comparados a seus correspondentes diâmetros observados na cubagem.

Com base nos  $CAR_{ij}$  foi obtido um único valor para cada seção, o coeficiente angular da reta médio ( $\overline{CAR}_i$ ), resultado da média aritmética dos valores calculados pelas equações 2, 3 e 4.

$$\overline{CAR}_i = \frac{1}{n} \sum CAR_{ij} \quad (15)$$

em que:

$n$  = número de unidades de amostra;

### 3.2.6 Ajuste de modelos de *Taper*

Os modelos da Tabela 1 foram ajustados utilizando o software R-Studio versão 3.4.4 (R CORE TEAM, 2015). As estatísticas de precisão e de exatidão, bem como as análises gráficas dos resíduos, também foram feitas utilizando esse mesmo software.

Com os diâmetros obtidos pela cubagem das árvores-amostra foram ajustados cinco modelos de *taper* (Tabela 1). O modelo mais adequado foi ajustado com os dados estimados através do Método da Altura Relativa Original e Modificado.

Tabela 1: Modelos de taper ajustados para *Khaya senegalensis*, com 2,9 anos de idade, no município de Gurupi – TO.

Nº	Modelo Volumétrico	Autor
1	$\left(\frac{Di}{D}\right)^2 = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{Hi}{Ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{Hi}{Ht}\right)^2 + \varepsilon$	Kozak et al. (1969)
2	$\left(\frac{Di}{D}\right) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{Hi}{Ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{Hi}{Ht}\right)^2 + \beta_3 \left(\frac{Hi}{Ht}\right)^3 + \beta_4 \left(\frac{Hi}{Ht}\right)^4 + \beta_5 \left(\frac{Hi}{Ht}\right)^5 + \varepsilon$	Schöpfer (1966)
3	$\left(\frac{Di}{D}\right)^2 = \beta_0 + \beta_1 \sqrt{\frac{Hi}{Ht}} + \beta_2 \left(\frac{Hi}{Ht}\right) + \varepsilon$	Garcia et al. (1993)
4	$\left(\frac{Di}{D}\right)^2 = 10^{2\beta_0} D^{(2\beta_1-2)} Ht^{2\beta_2} (Ht - Hi)^{2\beta_3} + \varepsilon$	Demaerschalk (1972)
5	$\left(\frac{Di}{D}\right)^2 = \left(\frac{Ht - Hi}{Ht - 1,3}\right)^{2\beta_1} + \varepsilon$	Ormerod (1973)

$\beta_n$  = coeficientes a serem estimados, Di = diâmetro na altura Hi (cm), D = diâmetro medido à 1,3 m do solo (cm), Hi = altura da seção (m), Ht = altura total (m).

### 3.2.7 Critérios de análise das estimativas de *taper*

As estatísticas utilizadas para comparar os diâmetros estimados e observados foram: erro médio percentual (EMP), raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEM), correlação linear entre diâmetros observados e estimados ( $r_{y_0y_e\%}$ ), Bias e gráficos de resíduos. E um grupo de dados independentes, composto de 16 árvores-amostra, foi realizado o procedimento estatístico de exatidão, determinada pelo teste qui-quadrado ( $\chi^2$ ) com nível de significância de 0,05 (P%) (ANDRADE; LEITE, 2002; CABACINHA,

2003; LEITE; ANDRADE, 2004; ALMEIDA et al., 2011; TERRA; ANDRADE; FERREIRA JÚNIOR, 2017).

$$EMP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{Y_{ie} - Y_{io}}{Y_{io}} \right) 100 \right] \quad (15)$$

$$RQEM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{ie} - Y_{io})^2}{n}} \quad (16)$$

$$r_{Y_o Y_e\%} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n Y_{io} Y_{ie} - \frac{(\sum_{i=1}^n Y_{io})(\sum_{i=1}^n Y_{ie})}{n}}{\sqrt{\{[\sum_{i=1}^n (Y_{io} - Y_m)^2][\sum_{i=1}^n (Y_{ie} - Y_m)^2]\}}} \right] 100 \quad (17)$$

$$\text{Bias}_{\%} = \frac{(\sum_{i=1}^n Y_{ie} - \sum_{i=1}^n Y_{io})}{\sum_{i=1}^n Y_{io}} 100 \quad (18)$$

$$\text{Resíduo}_{\%} = \left( \frac{Y_e - Y_o}{Y_e} \right) * 100 \quad (19)$$

$$P_{\%} = \sqrt{\frac{196^2}{X_n^2} \sum_{i=1}^n \left( \frac{Y_{io} - Y_{ie}}{Y_{io}} \right)^2} \quad (20)$$

em que:

$Y_{ie}$  = valor estimado da variável de interesse (diâmetro);

$Y_{io}$  = valor observado da variável de interesse (diâmetro);

$Y_m$  = valor real médio;

$X_n^2$  = valor tabelado do qui-quadrado para n graus de liberdade a 5%.

Para analisar os ajustes dos modelos de *taper* foram utilizadas as medidas de precisão: coeficiente de determinação ajustado (CDA), erro padrão residual (EPR) e análise gráfica dos resíduos, sendo:

$$CDA = 1 - \left( \frac{n-1}{n-p} \right) \cdot \left( \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \right) \quad (21)$$

$$EPR = \sqrt{QM_{res}} \quad (22)$$

$$EPR_{\%} = \frac{EPR}{Y_m} \times 100 \quad (23)$$

em que:

p = Números de coeficientes do modelo;

SQres = Soma de quadrados do resíduo;

SQtot = Soma de quadrados total corrigida para a média;

EPR = Erro padrão residual;

QMres = Quadrado médio do resíduo;

EPR% = Erro padrão residual em porcentagem;

### 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os critérios estatísticos de avaliação são apresentados na Tabela 2, onde observa-se que o Método da Altura Relativa Original gerou resultados superiores, com  $CAR_{ij}$  e  $\overline{CAR}_i$ . A utilização do  $\overline{CAR}_i$  no método original melhorou os resultados de quase todos os critérios, com exceção da Bias%, demonstrando um maior viés.

A conicidade das árvores de maiores diâmetros contribuiu para perda de precisão na estimativa dos diâmetros, principalmente nos menores de 6 cm, (Figura 3). Essa conicidade influencia diretamente o  $CAR_{ij}$  e conseqüentemente a estimativa do diâmetro. No entanto, o uso do  $\overline{CAR}_i$  gerou uma compensação nos erros, fato que explica os bons resultados utilizando essa alternativa na aplicação do Método da Altura Relativa.

O Método da Altura Relativa Modificado não acompanhou os bons resultados da metodologia original principalmente em decorrência da fórmula para obtenção do diâmetro na última seção assumir que na altura total o diâmetro é igual a zero, que não foi o caso nos indivíduos de *K. senegalensis* analisados, gerando erros de 100% na estimativa do diâmetro.

Tabela 2: Critérios estatísticos para avaliar o Métodos da Altura Relativa Original e Modificado para *Khaya senegalensis* aos 2,9 anos em Gurupi - TO.

Método	EMP	$r_{y_0y_e}\%$	RQEM%	Bias%	P%
Altura Relativa Original ( $CAR_{ij}$ )	-2,668	97,575	12,853	-0,448	-
Altura Relativa Modificado ( $CAR_{ij}$ )	-13,554	97,064	16,933	-2,627	-
Altura Relativa Original ( $\overline{CAR}_i$ )	-1,549	97,620	10,987	-1,698	29,796
Altura Relativa Modificado ( $\overline{CAR}_i$ )	-14,120	96,765	14,629	-4,218	74,971

EMP = erro médio percentual; RQEM = raiz quadrada do erro quadrático médio;  $r_{y_0y_e}$  (%) = correlação linear entre diâmetros observados e estimados; Bias% = Bias em porcentagem; P% = exatidão determinada pelo teste Qui-quadrado com nível de significância de 0,05.



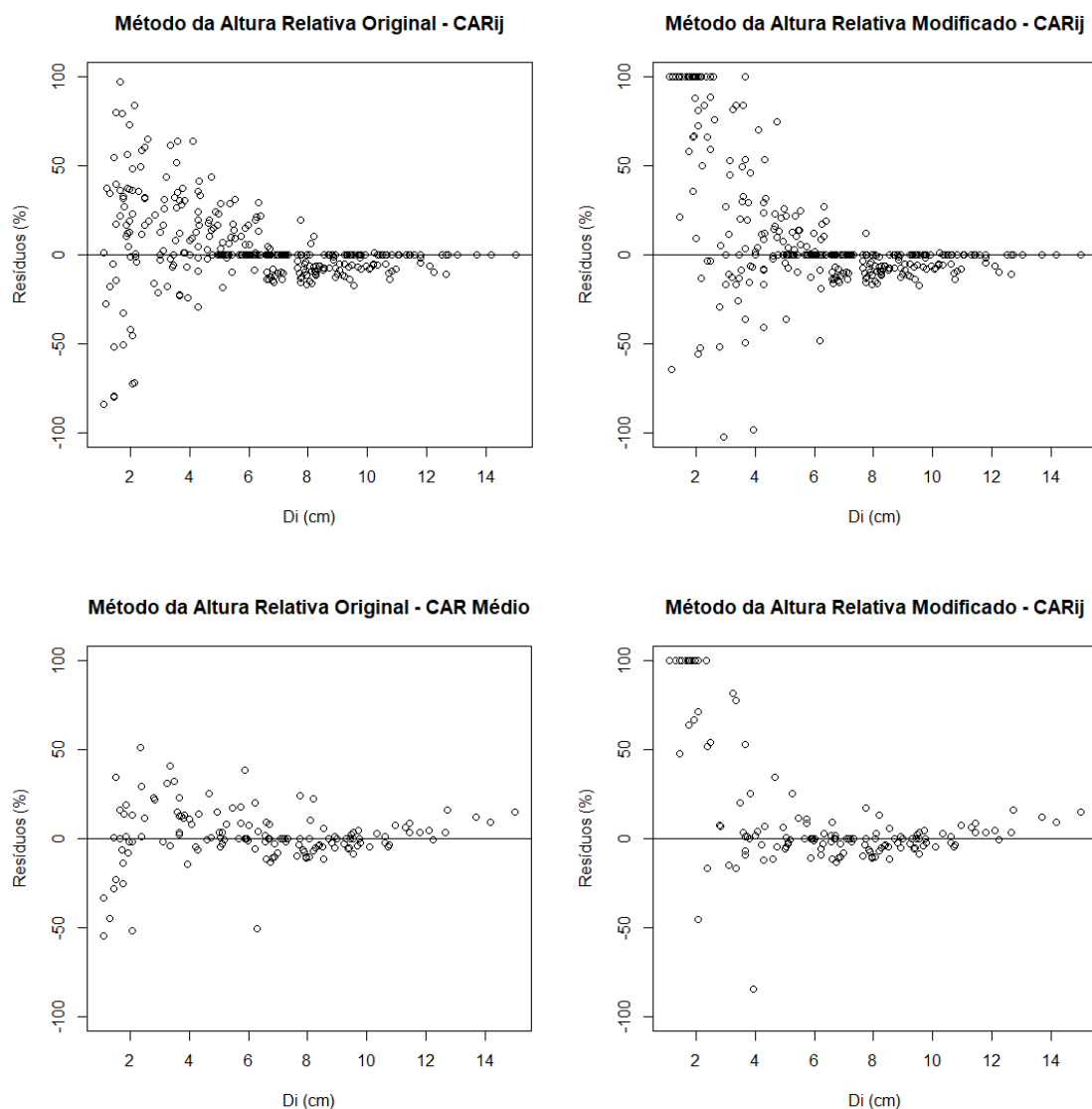


Figura 3: Dispersão dos resíduos em porcentagem em relação ao diâmetro na altura de interesse para *Khaya senegalensis* aos 2,9 anos em Gurupi - TO.

### 3.3.1 Análise do ajuste dos modelos de *taper*

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados, respectivamente, os coeficientes estimados e estatísticas de precisão obtidos no ajuste dos cinco modelos de *taper*, com o mesmo banco de dados que foi utilizado para a comparação dos valores observados de cubagem e estimados através do Método da Altura Relativa. Os resultados indicam o modelo de Schöpfer (1966) como o mais adequado para estimar os diâmetros nas alturas de interesse.

Esses resultados são similares aos obtidos por Lopes et al. (2018) que ajustaram modelos de *taper* para *Khaya ivorensis*, onde o CDA variou de 0,55 a 0,91.

Tabela 3: Coeficientes estimados dos modelos taper ajustados com dados reais de cubagem para *Khaya senegalensis* aos 2,9 anos em Gurupi - TO.

Modelo	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$\hat{\beta}_4$	$\hat{\beta}_5$
Kozak et al. (1969)	2,176	-4,819	2,978	-	-	-
Schöpfer (1966)	1,642	-5,853	20,58	-37,782	31,889	-10,192
Garcia et al. (1993)	2,942	-4,918	2,177	-	-	-
Demaerschalk (1972)	0,2836	0,9695	1,0996	-1,2211	-	-
Ormerod (1973)	-	1,269	-	-	-	-

$\hat{\beta}_n$  = coeficiente estimado.

Tabela 4: Estatísticas de precisão dos modelos taper ajustados com dados reais de cubagem para *Khaya senegalensis* aos 2,9 anos em Gurupi - TO.

Modelo	CDA	EPR%
Kozak et al. (1969)	0,900	13,15
Schöpfer (1966)	0,957	8,65
Garcia et al. (1993)	0,942	10,05
Demaerschalk (1972)	0,816	17,85
Ormerod (1973)	0,721	21,96

CDA = coeficiente de determinação ajustado; EPR% = erro padrão residual em porcentagem.

Observa-se que todos os modelos apresentam erros elevados ao estimar diâmetros menores, especialmente inferiores a 5 cm. No que se refere as estimativas de diâmetros maiores que 5 cm é possível afirmar que o modelo de Schöpfer (1966) apresenta distribuição de resíduos mais homogênea (Figura 4).

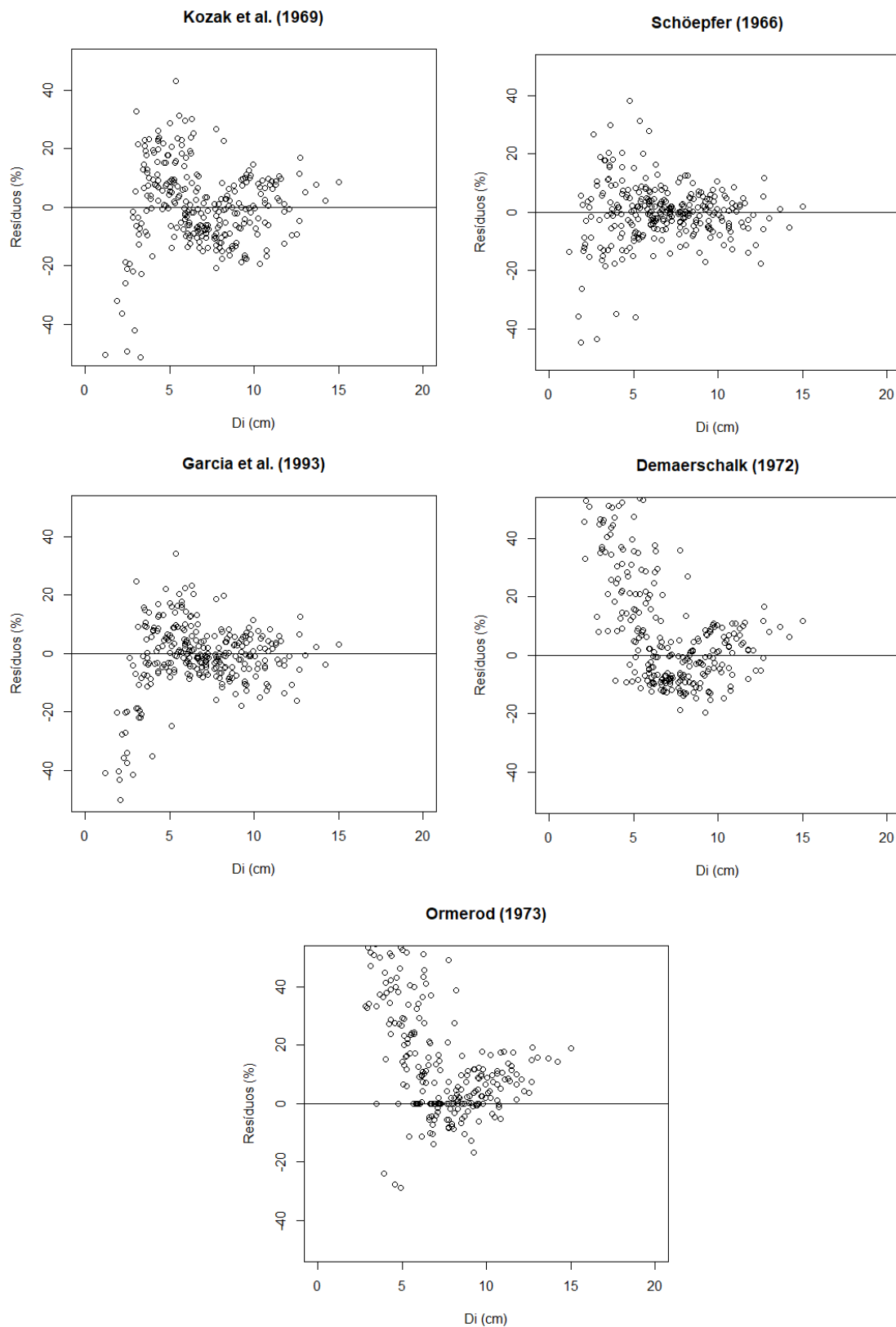


Figura 4: Distribuição de resíduos dos modelos de taper ajustados com dados reais de cubagem para *Khaya senegalensis* aos 2,9 anos em Gurupi - TO.

O ajuste do modelo de Schöpfer (1966) utilizando os dados de cubagem estimados pelo Método da Altura Relativa Original e Modificado e da cubagem das árvores amostra abatidas apresentaram similaridade (Tabelas 5 e 6) e as mesmas tendências nos gráficos de resíduos (Figura 5).

A similaridade nas estatísticas e na distribuição de resíduos demonstra que a utilização do Método da Altura Relativa é viável, excluindo a necessidade de derrubar árvores-amostra no levantamento de dados de uma área florestal. Essa proximidade nos resultados foi observada por Andrade (2016) utilizando o modelo de Kozak (1988).

Tabela 5: Coeficientes estimados no ajuste dos modelos de taper com dados estimados de cubagem pelo Método da Altura Relativa Original e Modificado para *Khaya senegalensis* aos 2,9 anos.

Método	Modelo	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$\hat{\beta}_4$	$\hat{\beta}_5$
Altura Relativa Original	Schöpfer (1966)	1,621	-3,436	5,164	-2,834	-2,445	2,147
Altura Relativa Modificado	Schöpfer (1966)	1,623	-3,523	6,086	-6,521	4,483	-2,190
Cubagem Rigorosa	Schöpfer (1966)	1,642	-5,853	20,580	-37,782	31,889	-10,192

$\hat{\beta}_0$  = coeficiente estimado.

Tabela 6: Estatísticas de precisão dos modelos de taper ajustados com dados estimados de cubagem pelo Método da Altura Relativa Original e Modificado para *Khaya senegalensis* aos 2,9 anos.

Método	Modelo	CDA	EPR%
Altura Relativa Original	Schöpfer (1966)	0,966	10,22
Altura Relativa Modificado	Schöpfer (1966)	0,946	10,47

CDA = coeficiente de determinação ajustado; EPR% = erro padrão residual em porcentagem.

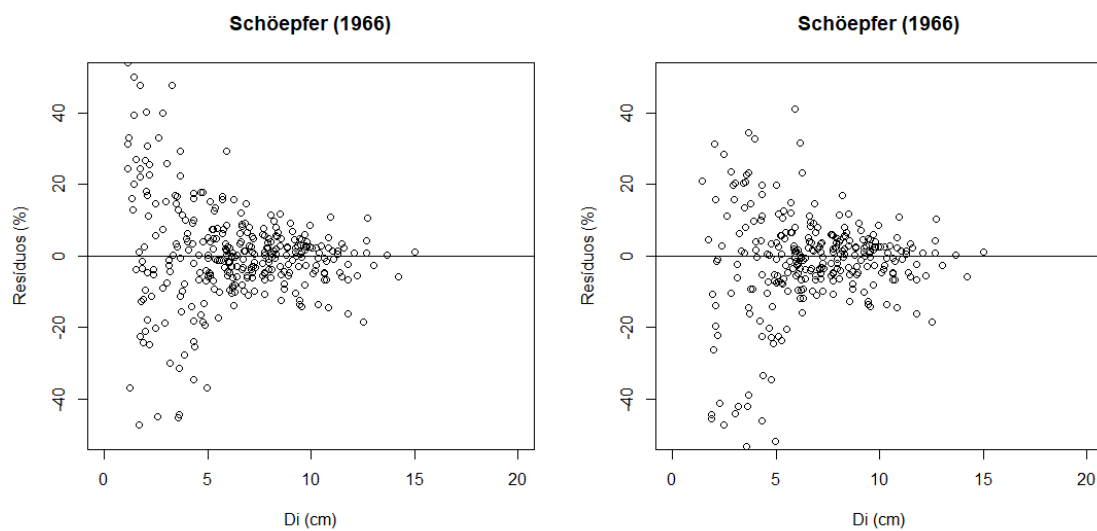


Figura 5: Distribuição de resíduos com dados estimados de cubagem pelo Método da Altura Relativa Original e Modificado para *Khaya senegalensis* aos 2,9 anos, em Gurupi - TO.

### 3.4 CONCLUSÕES

O Método da Altura Relativa Original com  $CAR_{ij}$  e  $\overline{CAR}_i$  é mais eficiente para estimar o afilamento do fuste de *K. senegalensis*, aos 2,9 anos, em comparação o método modificado utilizando as mesmas alternativas ( $CAR_{ij}$  e  $\overline{CAR}_i$ ). A utilização do  $\overline{CAR}_i$  proporciona melhoras em quase todas as estatísticas analisadas, com exceção do Bias%.

Dos cinco modelos de *taper* ajustados o de Schöpfer (1966) é o mais adequado para estimar os diâmetros na altura de interesse. Quando ajustado com dados reais e estimados de cubagem, resulta em estatísticas e distribuição de resíduos similares.

### 3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, R. C.; CABACINHA, C. D.; ROCHA, T. B.; PAULA, A. Volumetria de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake pelo método geométrico do Planalto da Conquista, Bahia. **Revista Caatinga**, v.24, n.1, p.65-75, 2011.

ANDRADE, V. C. L. **Um método para descrever o perfil do tronco em árvores de eucalipto utilizando geometria analítica**. 2001. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 2001.

ANDRADE, V. C. L. Perfil do fuste de *Anadenanthera peregrina* descrito pelo método da altura relativa. **Ciência Florestal**, v.26, n.3, p.875-887, 2016.

ANDRADE, V. C. L.; LEITE, H. G. **Análise do perfil do tronco de árvores utilizando geometria analítica**. Viçosa: UFV, 1997. 35p. Iniciação Científica Sem Bolsa de Pesquisa (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 1997. (manuscrito com direito autoral adquirido).

ANDRADE, V. C. L.; LEITE, H. G. Análise do perfil do tronco de árvores utilizando geometria analítica. **Revista Árvore**, v.25, n.4, p.481 – 486, 2001.

ANDRADE, V. C. L.; CALEGARIO, N.; SCOLFORO, J. R. S. Análise de algumas alternativas para obter o coeficiente angular da reta no método da altura relativa. **Ciência Florestal**, v.16, n.3, p.303-317, 2006.

ANDRADE, V. C. L.; CALEGARIO, N.; SOUZA, A. L.; REZENSE, J. L. P.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Uso de sólidos geométricos para gerar equações de forma do tronco de árvores em pé. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 38, p. 299-311, 2009.

CABACINHA, C. D. **Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a cubagem rigorosa**. 2003. 166 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Lavras, 2003.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: Perguntas e respostas**. 5ª Ed. Viçosa: Editora UFV, 2017. 652 p..

COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; HESS, A. F. Função de afilamento e sortimentos de madeira para *Araucaria angustifolia*. **Revista Ciência Florestal**, v.26, n.2, p.523-533, 2016.

DEMAERSCHALK, J. P. Converting volume equations to compatible taper equations. **Forest Science**, v.18, n.3, p. 241-245, 1972.

GAMA, R. C.; ANDRADE, V. C. L. Equações hipsométricas e volumétricas para mogno africano no sul do Tocantins. **Scientia Agraria Paranaensis**, v.17, n.4, p.507-514, 2018.

GARCIA, S. L. R.; LEITE, H. G.; YARED, J. A. G. Análise do perfil do tronco de morotó (*Didymopanax morototoni*) em função do espaçamento. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1.; CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBS: SBEF, 1993. p.485-491.

GOMES, A. M. A. **Medição dos arboredos**. Lisboa: Livraria Sá da Costa, 1957. 413p.

HUSCH, B.; BEERS, T. W.; JOHN, A. K. **Forest Mensuration**. New Jersey: John Wiley and Sons. 2003.

INMET. **Monitoramento Climático**. 2017. Disponível em:< <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=desvioChuvaAnual> >. Acesso em: 03 de mai.2018.

KÖPPEN, W. **Climatologia com un estúdio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Economica. 479p.

KOZAK, A.; MUNRO, D. D.; SMITH, J. H. G. Taper functions and their application in forest inventory. **Forestry Chronicle**, v.45, n.4, p.278-283, 1969.

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

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. Uso do método da altura relativa em inventário florestal de um povoamento de *Pinus*. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 865-873, 2004.

LOPES, L. S. S.; RODE, R.; PAULETTO, D.; BALONEQUE, D. D.; SILVA, A. R.; SANTOS, K. N. F. Ajuste de modelos de *taper* e sortimento de toras de mogno africano em sistemas agroflorestais em Belterra, Pará. **Agroecossistemas**, v.10, n.1, p.18-28, 2018.

MACHADO, S. A.; URBANO, E.; CONCEIÇÃO, M. B.; FIGUEIREDO FILHO, A.; FIGUEIREDO, D. J. Comparação de modelos de afileamento do tronco para diferentes idades e regimes de desbaste em plantações de *Pinus oocarpa* Schiede. **Pesquisa Floresta Brasileira**, n.48, p.41-64, 2004.

ORMEROD, D. W. A simple bole model. **Forestry Chronicle**, v.49, n.3, p.136-138, 1973.

SCHÖEPFER, W. Automatisierung des Massen, Sorten und Wertberechnung stenender Waldbestände Schriftenreihe Bad. [S.l.]: **Wurtt-Forstl.**, 1966. Não paginado.

TERRA, D. L. C. V.; ANDRADE, V. C. L. de; FERREIRA JÚNIOR, J. M. Funções segmentadas de taper para o clone GG100 no sudeste do Tocantins. **Cerrado Agrociências**, v.8, p.104-115, 2017.



## 4 CAPÍTULO II - VOLUMETRIA DE *Khaya senegalensis* PELO MÉTODO DA ALTURA RELATIVA

### RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar o volume estimado por árvore, pelo Método da Altura Relativa, em comparação aos volumes obtidos através da tradicional cubagem de árvores-amostra abatidas. As estatísticas utilizadas foram o erro médio percentual (EMP), a raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEM), a correlação linear entre volumes observados e estimados ( $r_{y_0y_e\%}$ ), o Bias, além da análise gráfica dos resíduos e exatidão determinada pelo teste qui-quadrado ( $\chi^2$ ) com nível de significância de 0,05 (P%). Modelos volumétricos foram ajustados com os dados provenientes das metodologias avaliadas, e comparados em termos de coeficiente de determinação ajustado (CDA), erro padrão residual (EPR) e análise gráfica dos resíduos. O Método da Altura Relativa Original foi mais eficiente em estimar o volume individual, quando utilizado o coeficiente angular da reta definido pelo i-ésimo intervalo na j-ésima árvore-amostra ( $CAR_{ij}$ ). Ao usar o coeficiente angular da reta médio ( $\overline{CAR}_i$ ) o método modificado mostrou ser superior. Quanto ao ajuste dos modelos, os resultados foram semelhantes e satisfatórios, desse modo, é possível afirmar que o Método da Altura Relativa é eficiente para gerar dados para ajuste de modelos volumétricos.

Palavras-chave: Volume; Método Geométrico; Geometria Analítica; mogno africano.

## ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the volume estimated by tree, by the Relative Height Method, in comparison to the volumes obtained through the traditional sampling of felled sample trees. The mean square error (EMR), the square root of the mean square error (RQEM), linear correlation between observed and estimated volume ( $r_{y_0y_e\%}$ ), Bias, as well as the graphic analysis of the residues and the accuracy determined by the chi ( $\chi^2$ ) with a significance level of 0.05 (P%). Volumetric models were adjusted with data from the methodologies evaluated, and compared in terms of adjusted coefficient of determination (CDA), residual standard error (EPR) and graphical analysis of residues. The original Relative Height Method was more efficient in estimating the individual volume, when the angular coefficient of the line defined by the i-th interval in the j-th sample tree ( $CAR_{ij}$ ) was used. When using the angular coefficient of the mean line ( $\overline{CAR}_i$ ) the modified method proved to be superior. Regarding the fit of the models, the results were similar and satisfactory, so it is possible to affirm that the Relative Height Method is efficient to generate data for adjustment of volumetric models.

Keywords: Volume; Geometric Method; Analytical Geometry; African mahogany.

## 4.1 INTRODUÇÃO

A volumetria de árvores está inserida no cotidiano do engenheiro florestal desde os primórdios, decorrente da importância da madeira na vida do homem. (PÉLLICO NETO, 2004). No Brasil o setor florestal tem importância relevante na economia. Os produtos florestais brasileiros são competitivos no mercado exterior, pois o país possui terras apropriadas para implantação de plantios florestais, as características edáficas e climáticas favoráveis, a idade técnica de corte é menor que em países de clima temperado (SILVA et al., 2005).

O conhecimento do estoque florestal é imprescindível para o planejamento hierárquico (estratégico, tático e operacional) das empresas florestais. O procedimento mais comum para conhecer o volume de plantios florestais é o inventário florestal, empregando equações para obter os volumes de cada árvore mensurada, o que requer abate de árvores-amostra nos povoamentos.

O Método da Altura Relativa, que visa promover rapidez e redução de custos ao inventário florestal, caracteriza-se por não ser necessário abater e cubicar árvores-amostra. Além disso, as informações, a serem obtidas com a árvore em pé, são medidas apenas em algumas árvores de cada parcela do inventário, cerca de cinco indivíduos (ANDRADE; LEITE, 1998; LEITE; ANDRADE, 2002). O método geométrico possui também a vantagem de permitir a realização de medições de diâmetro com a árvore em pé, utilizando-se o Relascópio de Bitterlich ou um Pentaprisma (LEITE; ANDRADE, 2004; SCOLFORO; THIERSCH, 2004).

Ele foi desenvolvido utilizando conceitos da geometria analítica, o perfil do tronco é gerado e através de modificações algébricas no coeficiente angular da reta, em intervalos previamente definidos, sendo geradas equações de taper sem necessidade de abate de árvores-amostra (ANDRADE; LEITE, 2001; LEITE; ANDRADE, 2004; ANDRADE et al., 2006).

O objetivo do presente trabalho foi analisar o volume de árvores de *K. senegalensis*, estimados pelo método da altura relativa, original e modificado, em relação ao volume obtido pelo processo usual de cubagem de árvores-amostra abatidas.

## 4.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.2.1 Área de Coleta de Dados

A coleta de dados foi conduzida em plantio seminal de *K. senegalensis* (mogno africano) em uma Fazenda de 12 hectares localizada na zona rural de Gurupi, região sul do estado do Tocantins, com idade de 2,9 anos, sob arranjo espacial de plantio 6,00 x 4,00 m. A propriedade está localizada na latitude 11°42'42.2" sul, longitude 48°59'06.8" oeste.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen (1984) enquadra-se em Tropical de savana (Aw), clima tropical com estação seca. A temperatura média anual varia de 28 a 30 °C e precipitação média anual varia de 1.200 a 1.400 mm, sendo verão chuvoso, inverno seco e elevado déficit hídrico entre os meses de maio a setembro (INMET, 2017).

Os dados foram coletados em uma área de 7500 m<sup>2</sup>, dividida em 10 parcelas retangulares de 750 m<sup>2</sup> cada (30 x 25 m), implantadas aleatoriamente.

### 4.2.2 Dados Coletados

Foram lançadas, aleatoriamente 10 parcelas retangulares de 750 m<sup>2</sup> cada, nessas parcelas, 38 árvores foram cubadas rigorosamente pelo método de Smalian. As medições ao longo do fuste foram realizadas com uma fita métrica de 150 cm, e foram tomados os diâmetros nas posições: 0,10; 0,30; 0,70; 1,30; 2,00; e seguindo sucessivamente com intervalos de um em um metro até a altura total.

### 4.2.3 Método da Altura Relativa Original

Para estimar os volumes individuais das árvores pelo Método da Altura Relativa Original, desenvolvido por Andrade e Leite (1997), foi medida a altura total (ht) de cada árvore, os diâmetros do fuste nas alturas 0,1 m (h<sub>0,1</sub>) e a 1,3 m de altura (h<sub>1,3</sub>). Foi calculada a altura relativa (hr) de cada árvore, a partir da expressão 1, como pode ser observado na Figura 6.

$$hr = \frac{(Ht-2)}{2} \quad (1)$$

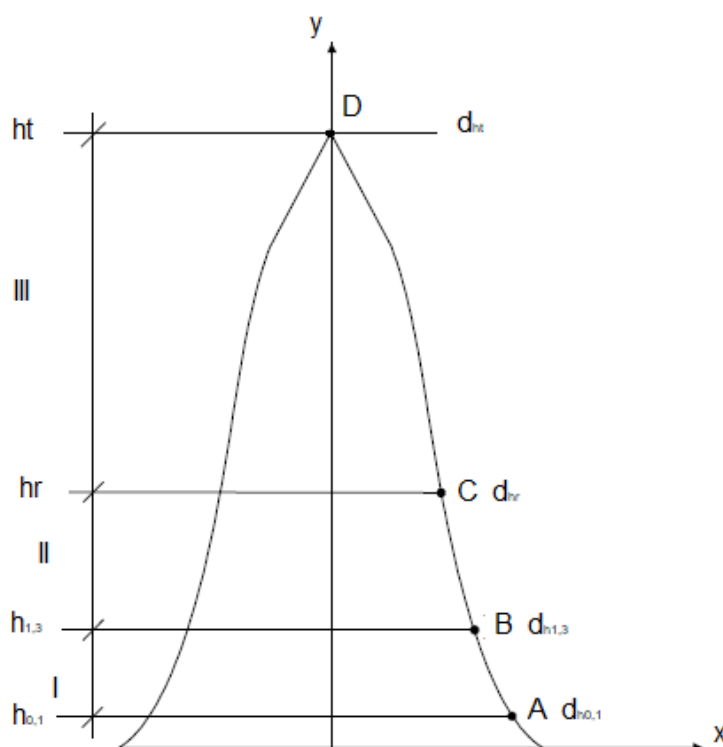


Figura 6: Croqui de uma árvore amostra, ilustrando as informações necessárias para o desenvolvimento do Método da Altura Relativa Original. Fonte: Andrade (2001).

em que:

$d_{h_{0,1}}$  - diâmetro em  $h_{0,1}$  metros do solo (cm);

$d_{h_{1,3}}$  - dap (cm);

$d_{hr}$  - diâmetro medido em  $hr$  (cm);

$d_{ht}$  - diâmetro medido em  $ht$  (cm);

A – ponto contendo o par ordenado  $(x = \frac{d_{h_{0,1}}}{2}; y = h_{0,1})$

B – ponto contendo o par ordenado  $(x = \frac{d_{h_{1,3}}}{2}; y = 1,3)$

C – ponto contendo o par ordenado  $(x = \frac{d_{hr}}{2}; y = hr)$

D – ponto contendo o par ordenado  $(x = 0; y = ht)$

I - intervalo formado entre 0,3 e 1,3 (pontos AB);

II - intervalo formado entre 1,3 e  $hr$  (pontos BC);

III - intervalo formado entre  $hr$  e  $ht$  (pontos CD).

Os Coeficientes Angulares das Retas (CAR), para três diferentes intervalos do fuste (Intervalo I =  $0,1 \leq h_{ij} \leq 1,30$ ; Intervalo II =  $1,30 < h_{ij} \leq hr$ ; Intervalo III =  $hr < h_{ij} \leq ht$ , aplicando-se as expressões:

$$CAR_{Ij} = \frac{1,3-h_{0,1}}{\left(\frac{DAP_j-d_{0,1}}{2}\right)} \quad (2)$$

$$CAR_{IIj} = \frac{1,3-hr_j}{\left(\frac{DAP_j-d_{hr_j}}{2}\right)} \quad (3)$$

$$CAR_{IIIj} = \frac{hr_j-h_{t_j}}{\frac{d_{hr_j}}{2}} \quad (4)$$

em que:

$CAR_{ij}$  = Coeficiente angular da reta definido pelo  $i$ -ésimo intervalo na  $j$ -ésima árvore amostra, em que  $i = I, II$  e  $III$ ;

$d_{0,1}$ ,  $DAP_j$  e  $d_{hr_j}$  = Diâmetros medidos à  $h_{0,1}$ ;  $h_{1,3}$  e  $hr$  metros do nível do terreno, na  $j$ -ésima árvore amostra;

$ht_j$  = Altura total da  $j$ -ésima árvore amostra.

Os coeficientes angulares das retas geraram as equações *taper* 5, 6 e 7, que possibilitaram estimar os diâmetros nos três intervalos distintos do fuste:

$$d_{(0,1 \leq h_{ij} \leq 1,30)} = \frac{2h_{ij}-2,6}{CAR_{Ij}} + DAP_j \quad (5)$$

$$d_{(1,30 < h_{ij} \leq hr)} = \frac{2h_{ij}-2,6}{CAR_{IIj}} + DAP_j \quad (6)$$

$$d_{(hr < h_{ij} \leq ht)} = \frac{h_{ij}-1,3}{CAR_{IIj}} + \frac{h_{ij}-ht_j}{CAR_{IIIj}} + \frac{DAP_j}{2} \quad (7)$$

em que:

$d(0,1 \leq h_{ij} \leq 1,30)$  = Diâmetro na  $i$ -ésima altura desejada entre 0,1 m e 1,30 m na  $j$ -ésima árvore amostra;

$d(1,30 < h_{ij} \leq hr)$  = Diâmetro na  $i$ -ésima altura desejada entre 1,30 m e  $hr$  na  $j$ -ésima árvore amostra;

$d(hr < h_{ij} \leq ht)$  = Diâmetro na  $i$ -ésima altura desejada entre  $hr$  e  $ht$  na  $j$ -ésima árvore amostra.

Os diâmetros foram estimados em várias alturas comerciais ( $h$ ) empregando as equações 5, 6 e 7. Em seguida foram determinados os volumes com emprego da fórmula de Smalian.

#### 4.2.4 Método da Altura Relativa Modificado

No Método da Altura Relativa Modificado mantiveram-se as medições dos mesmos diâmetros do método original que são nas posições de 0,1 m, 1,3 m (DAP); altura total ( $ht$ ) e um ponto entre o  $dap$  e  $ht$ , chamada de altura relativa ( $hr$ ) obtida pela expressão 1. Porém, além dessa  $hr$  foram calculadas três novas  $hr$  (Figura 7) definidas pelas expressões (ANDRADE, 2001):

$$hr_1 = \frac{(ht-1,7)}{1,7} \quad (8)$$

$$hr_2 = \frac{(ht-1,4)}{1,4} \quad (9)$$

$$hr_3 = \frac{(ht-1,1)}{1,1} \quad (10)$$

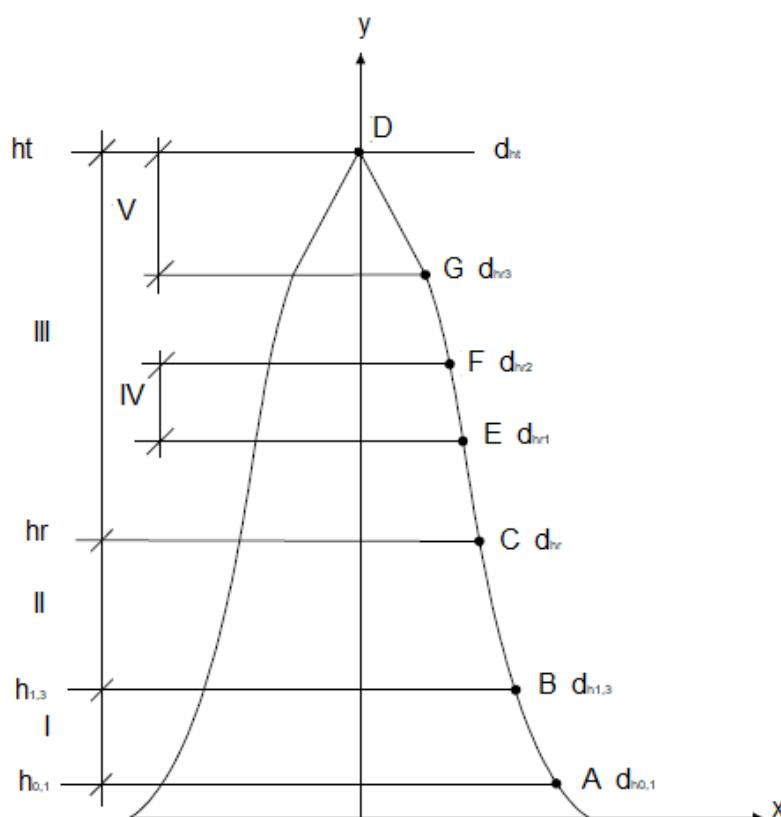


Figura 7: Croqui de uma árvore amostra, ilustrando as informações necessárias para o desenvolvimento do Método da Altura Relativa Modificado. Fonte: Andrade (2001).

em que:

$d_{hr1}$  - diâmetro calculado em  $hr_1$ ;

$d_{hr2}$  - diâmetro calculado em  $hr_2$ ;

$d_{hr3}$  - diâmetro calculado em  $hr_3$ ;

IV - intervalo formado entre  $hr_1$  e  $hr_2$  (pontos EF);

V - intervalo formado entre  $hr_3$  e  $ht$  (pontos GD);

$d_{h0,3}$ ;  $d_{1,3}$ ;  $d_{hr}$ ;  $d_{ht}$ ; I; II e III, definidos anteriormente.

Com os dados coletados foram calculados os valores dos Coeficientes Angulares da Reta (CAR) utilizados no método original, além dos quais foram calculados dois novos CAR definidos pelas expressões:

$$CAR_{IVj} = \frac{(2(hr_1)_j - 2(hr_2)_j)}{((d_{hr1})_j - (d_{hr2})_j)} \quad (11)$$

$$CAR_{Vj} = \frac{(2(hr_3)_j - 2ht_j)}{(d_{hr3})_j} \quad (12)$$

Para cálculo do *taper* entre  $0,1 \leq h_{ij} \leq 1,30$  e  $1,30 < h_{ij} \leq hr_1$  foi utilizada a mesma formulação do método original.

Para  $hr_1 < h_{ij} \leq hr_3$ :

$$d_{hr_1 < h_{ij} \leq hr_3} = (hr_1 - hr_2)_j^{-1} \left[ \frac{hr_1(hr_2 - 2hr_1 + 2h_i + 1,3) - h_i(hr_2 + 1,3)}{2CAR_{II}} + \frac{(hr_2 - ht)(hr_1 - h_i)}{2CAR_{III}} + \frac{DAP_j(h_i - hr_1)}{4} \right] + \frac{(h_i + hr_1 - 2,6)_j}{(CAR_{II})_j} + DAP_j \quad (13)$$

Para  $hr_3 < h_{ij} \leq ht$ :

$$d_{hr_3 < h_{ij} \leq ht} = \left[ \frac{(h_i - ht)}{(hr_3 - ht)_j} \right]_j \left\{ (hr_1 - hr_2)_j^{-1} \left[ \frac{hr_1(hr_2 - 2hr_1 + 2hr_3 + 1,3) - (hr_3)(hr_2 + 1,3)}{2CAR_{II}} + \frac{(hr_2 - ht)(hr_1 - hr_3)}{2CAR_{III}} + \frac{DAP_j(hr_3 - hr_1)}{4} \right] + \frac{(hr_3 + hr_1 - 2,6)_j}{(CAR_{II})_j} + DAP_j \right\} \quad (14)$$

Os volumes foram determinados da mesma forma mencionada em 4.2.3, utilizando as expressões 5, 6, 13 e 14

#### 4.2.5 Alternativas de Utilização do Método da Altura Relativa



O volume individual foi estimado utilizando o Método da Altura Relativa Original e Modificado. As estimativas foram comparadas a seus correspondentes valores reais obtidos via cubagem de árvores-amostra abatidas, utilizando a fórmula de Smalian.

Em um segundo momento, com base nos coeficientes angulares da, foi obtido um único valor para cada seção, resultado da média aritmética dos valores calculados pelas equações 2, 3 e 4:

$$\overline{CAR}_i = \frac{1}{n} \sum CAR_{ij} \quad (15), \text{ sendo } n \text{ o número de unidades de amostra.}$$

#### 4.2.6 Ajuste de modelos volumétricos

Com os volumes obtidos pela fórmula de Smalian (árvores-amostra abatidas), método da altura relativa original e método da altura relativa modificado, foram ajustados os modelos de Schumacher e Hall (1933) e de Stote (1945).

Tabela 7 - Modelos volumétricos ajustados para *Khaya senegalensis* com 2,9 anos de idade no município de Gurupi – TO.

Nº	Modelo Volumétrico	Autor
1	$V = \beta_0 + \beta_1(H) + \beta_2(D)^2 + \beta_3(D^2H) + \varepsilon$	Stoate (1945)
2	$LnV = \beta_0 + \beta_1LnDap + \beta_2LnHt + \varepsilon$	Schumacher e Hall (1933)

$\beta$ = coeficientes a serem estimados,  $V$ = volume total (m<sup>3</sup>),  $Ht$  = altura total (m),  $Dap$  = diâmetro medido à 1,3 m de altura (cm),  $Ln$  = logaritmo neperiano.

#### 4.2.7 Qualidade dos ajustamentos

As estatísticas utilizadas na validação das estimativas obtidas ao aplicar as equações foram: erro médio percentual (EMP), raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEM), correlação linear entre volumes observados e estimados ( $r_{y_0y_e\%}$ ), Bias e análise gráfica dos resíduos, além do teste Qui-quadrado ( $\chi^2$ ), aplicado em um grupo de 16 árvores-amostra independente, em nível de significância de 5%. (LEITE e ANDRADE, 2002; CABACINHA, 2003; LEITE e ANDRADE, 2004; ALMEIDA et al., 2011; TERRA et al., 2017).

$$EMP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{Y_{i_e} - Y_{i_0}}{Y_{i_0}} \right) 100 \right] \quad (16)$$

$$RQEM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{ie} - Y_{io})^2}{n}} \quad (17)$$

$$r_{Y_o Y_{e\%}} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n Y_{io} Y_{ie} - \frac{(\sum_{i=1}^n Y_{io})(\sum_{i=1}^n Y_{ie})}{n}}{\sqrt{\{[\sum_{i=1}^n (Y_{io} - Y_m)^2][\sum_{i=1}^n (Y_{ie} - Y_m)^2]\}}} \right] 100 \quad (18)$$

$$\text{Bias}_{\%} = \frac{(\sum_{i=1}^n Y_{ie} - \sum_{i=1}^n Y_{io})}{\sum_{i=1}^n Y_{io}} 100 \quad (19)$$

$$\text{Resíduo}_{\%} = \left( \frac{Y_o - Y_e}{Y_o} \right) * 100 \quad (20)$$

$$P_{\%} = \sqrt{\frac{196^2}{\chi_n^2} \sum_{i=1}^n \left( \frac{Y_{io} - Y_{ie}}{Y_{io}} \right)^2} \quad (21)$$

em que:

$Y_{ie}$  = valor estimado da variável de interesse (volume);

$Y_{io}$  = valor observado da variável de interesse (volume);

$Y_m$  = valor real médio;

$\chi_n^2$  = valor tabelado do Qui-quadrado para n graus de liberdade e 5% de significância.

Para estabelecer as comparações entre os modelos volumétricos ajustados com cada metodologia foram utilizadas as medidas de precisão: coeficiente de determinação ajustado (CDA), menor erro padrão residual (EPR) e análise gráfica dos resíduos defina anteriormente.

$$CDA = 1 - \left( \frac{n-1}{n-p} \right) \cdot \left( \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \right) \quad (22)$$

$$EPR = \sqrt{QM_{res}} \quad (23)$$

$$EPR_{\%} = \frac{EPR}{Y_m} \times 100 \quad (24)$$

em que:

p = Números de coeficientes do modelo;

SQ<sub>res</sub> = Soma de quadrados do resíduo;

SQ<sub>tot</sub> = Soma de quadrados total;

EPR = Erro padrão residual;

QM<sub>res</sub> = Quadrado médio do resíduo;

EPR% = Erro padrão residual em porcentagem.

### 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.3.1 Comparação das Estimativas Volumétricas

As estatísticas obtidas ao empregar os dados obtidos com as diferentes alternativas são apresentadas na Tabela 8. O Método da Altura Relativa Original foi o mais eficiente para estimar o volume individual, com valores residuais mais próximos de zero, menos viesado e a correlação linear entre volumes observados e estimados mais elevada, comparado ao Método da Altura Relativa Modificado quando os diâmetros foram estimados utilizando um  $CAR_{ij}$ .

Ao utilizar um  $\overline{CAR}_i$  para todas as árvores-amostra, o Método da Altura Relativa Modificado se mostrou superior com base em todas as estatísticas analisadas, com menor diferença entre o volume observado e estimado.

Almeida et al. (2011) compararam o Método da Altura Relativa Original e Modificado e também observaram superioridade da metodologia original para estimar o volume de *Eucalyptus urophylla* aos cinco anos de idade, utilizando o CAR individual.

Tabela 8: Critérios estatísticos para avaliar o Métodos da Altura Relativa Original e Modificado para *Khaya senegalensis* aos 2,9 anos em Gurupi - TO.

Método	EMP	$r_{y_0y_e\%}$	RQEM%	Bias%	P%
Altura Relativa Original ( $CAR_{ij}$ )	0,496	97,988	9,249	0,417	-
Altura Relativa Modificado ( $CAR_{ij}$ )	2,108	97,099	12,928	3,059	-
Altura Relativa Original ( $\overline{CAR}_i$ )	-1,879	98,221	9,812	-3,644	9,700
Altura Relativa Modificado ( $\overline{CAR}_i$ )	0,592	99,446	4,709	-0,011	7,403

EMP = erro médio percentual; RQEM = raiz quadrada do erro médio;  $R_{yy\%}$  = correlação linear múltipla; Bias% = Biais em porcentagem; P% = exatidão determinada pelo teste qui-quadrado com nível de significância de 0,05.

Os resultados supracitados demonstraram boas estimativas do volume individual com método da Altura Relativa Original e Modificado. No entanto, com base

nas Figuras 8 e 9 é possível afirmar que existe perda de precisão nas estimativas, associada a conicidade das árvores de maior diâmetro, com maior dispersão dos resíduos nas árvores de *dap* maior que 8 cm. Esta redução na precisão das estimativas foi observada também por Andrade et al. (2006), Thiersch et al. (2006) e Almeida et al. (2011).

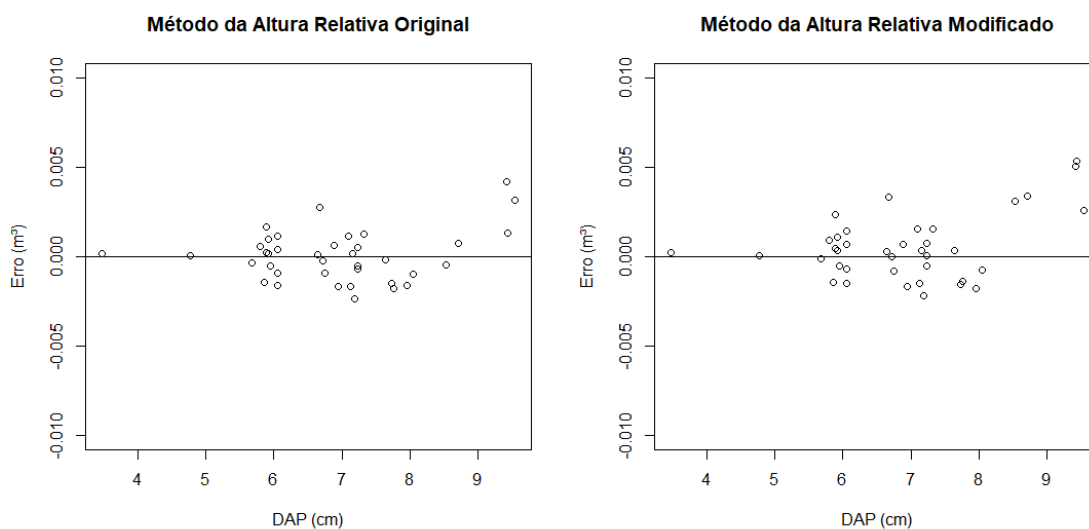


Figura 8: Dispersão dos resíduos do Método da Altura Relativa Original e Altura Relativa Modificado para *Khaya senegalensis* aos 2,9 anos em Gurupi - TO.

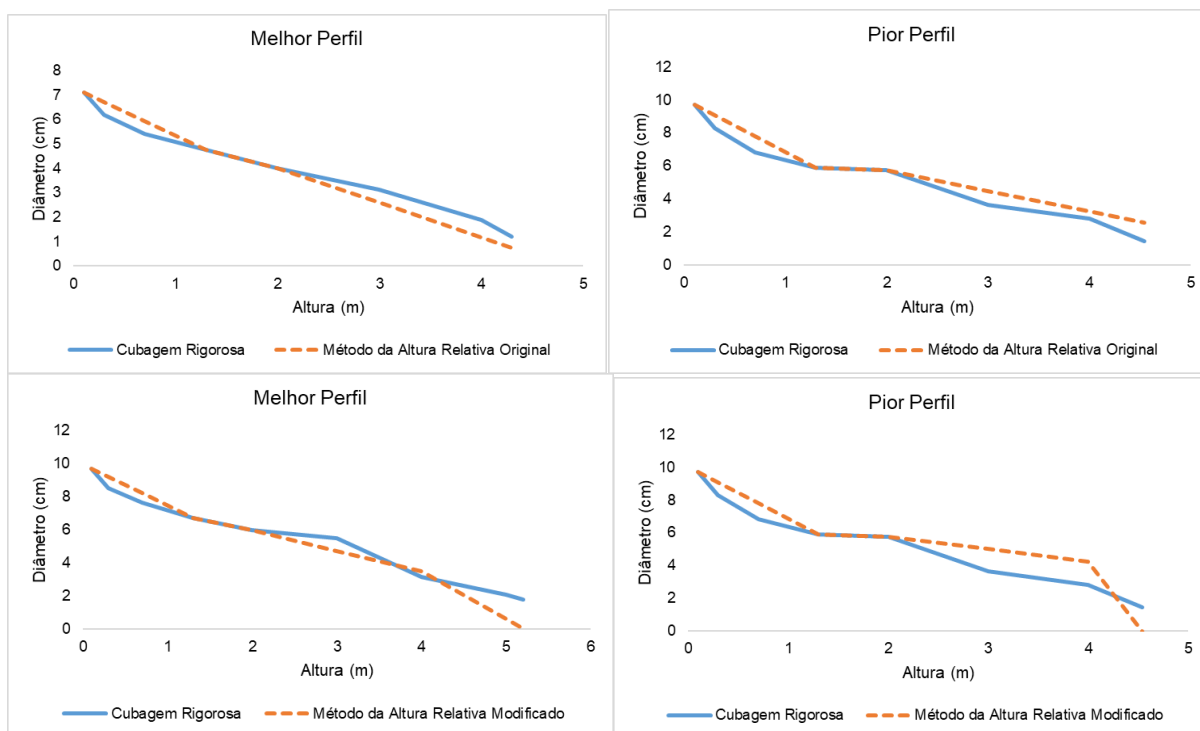


Figura 9: Melhores e piores perfis gerados pelo Método da Altura Relativa Original e Modificado para *Khaya senegalensis* aos 2,9 anos em Gurupi - TO.

#### 4.3.2 Avaliação das equações ajustadas

Nas Tabelas 9, 10 e 11 são apresentados os resultados obtidos com o ajuste dos modelos de Schumacher e Hall (1933) e Stoate (1945), com dados oriundos da cubagem, Método da Altura Relativa Original e Modificado. O método original foi ligeiramente melhor do que os demais, em relação às estatísticas apresentadas na Tabela 8.

Cabe ressaltar que a utilização do Método da Altura Relativa Original ou Modificado não demanda o ajuste de modelos para estimar o volume. Apesar disso, mesmo havendo interesse em ajustar tais modelos não haveria perda de qualidade nos ajustamentos.

Tabela 9: Coeficientes estimados e estatísticas de precisão dos modelos volumétricos ajustados com dados de cubagem pelo método de Smalian para *Khaya senegalensis* aos 2,9 anos em Gurupi - TO.

Modelo	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	CDA	EPR%
Schumacher e Hall (1933)	-9,069	1,878	0,709		0,929	11,39
Stoate (1945)	-2,327 <sup>-3</sup>	7,396 <sup>-4</sup>	1,291 <sup>-4</sup>	2,568 <sup>-5</sup>	0,930	11,48

$\hat{\beta}_0$  = coeficiente estimado; CDA = coeficiente de determinação ajustado; EPR% = erro padrão residual em porcentagem;

Tabela 10: Coeficientes estimados e estatísticas de precisão dos modelos volumétricos ajustados com dados do método da Altura Relativa Original para *Khaya senegalensis* aos 2,9 anos em Gurupi - TO.

Modelo	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	CDA	EPR
Schumacher e Hall (1933)	-8,958	2,051	0,447	-	0,948	10,76
Stoate (1945)	4,879 <sup>-3</sup>	-1,046 <sup>-3</sup>	5,318 <sup>-5</sup>	4,831 <sup>-5</sup>	0,949	10,30

$\hat{\beta}_0$  = coeficiente estimado; CDA = coeficiente de determinação ajustado; EPR = erro padrão residual em porcentagem;

Tabela 11: Coeficientes estimados e estatísticas de precisão dos modelos volumétricos ajustados com dados do método da Altura Relativa Modificado para *Khaya senegalensis* aos 2,9 anos em Gurupi - TO.

Modelo	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	CDA	EPR
Schumacher e Hall	-9,029	2,102	0,445	-	0,923	13,19
Logarítmico (1933)						
Stoate (1945)	6,230 <sup>-3</sup>	-1,430 <sup>-3</sup>	2,718 <sup>-5</sup>	5,715 <sup>-5</sup>	0,932	12,50

$\hat{\beta}_0$  = coeficiente estimado; CDA = coeficiente de determinação ajustado; EPR = erro padrão residual em porcentagem;

Nas Figuras 5, 6 e 7 pode ser observada a semelhança no ajuste dos modelos volumétricos com as três metodologias, fato que corrobora com os resultados das Tabelas 9, 10 e 11.

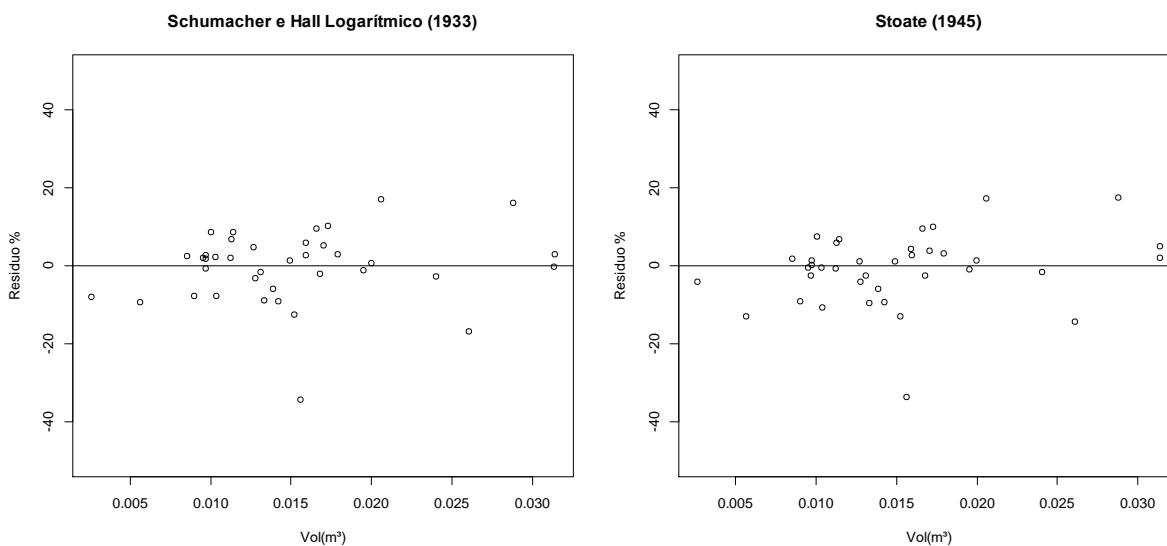


Figura 10: Distribuição de resíduos dos modelos volumétricos ajustados com dados de cubagem rigorosa pelo método de Smalian para *Khaya senegalensis* aos 2,9 anos em Gurupi - TO.

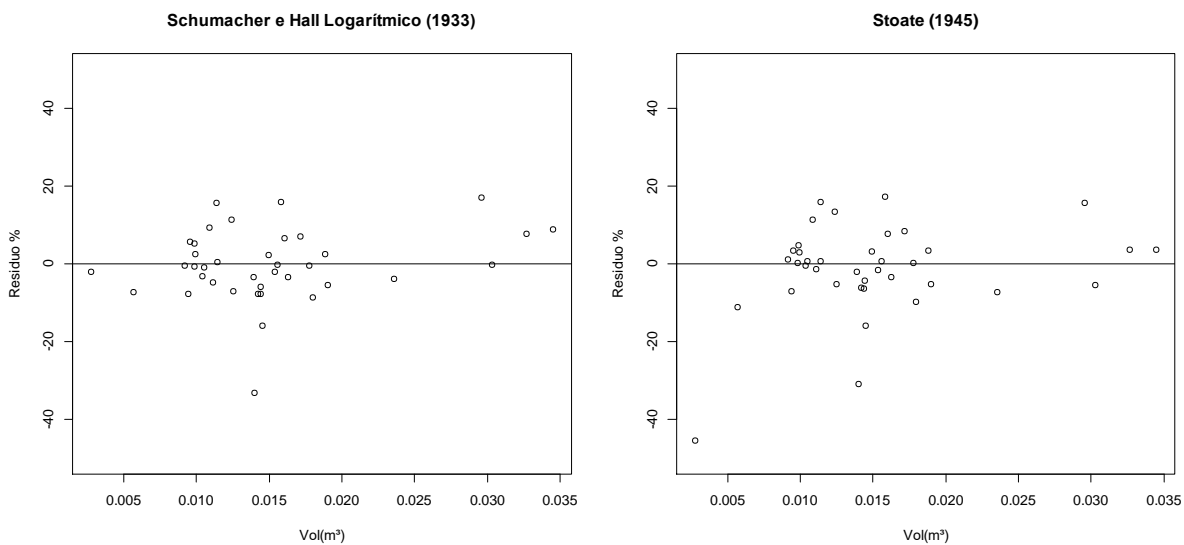


Figura 11: Distribuição de resíduos dos modelos volumétricos ajustados com dados do método da Altura Relativa Original para *Khaya senegalensis* aos 2,9 anos em Gurupi - TO.



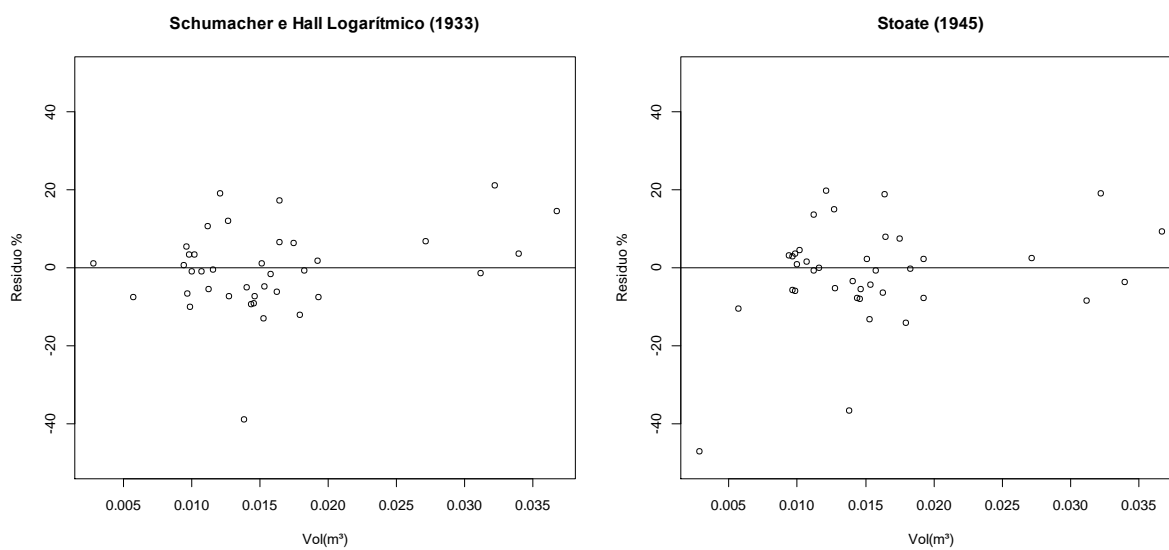


Figura 12: Distribuição de resíduos dos modelos volumétricos ajustados com dados do método da Altura Relativa Modificado, para *Khaya senegalensis* aos 2,9 anos em Gurupi - TO.

#### 4.4 CONCLUSÕES

Os Métodos da Altura Relativa Original e Modificado geram estimativas precisas do volume individual de árvores de *K. senegalensis* de 2,9 anos.

Ambos os métodos são promissores para estimar o volume individual, no entanto, o Método da Altura Relativa Original gerou resultados superiores (menor EMP e RQEM% e maior  $r_{y_0y_e\%}$ ) com relação ao Modificado, quando é empregado nas estimativas dos diâmetros o CAR<sub>ij</sub>.

Ao utilizar o  $\overline{\text{CAR}}_i$  para todas as árvores-amostra a metodologia modificada demonstrou superioridade para estimar o volume individual, com menor diferença entre os valores observados e estimados.

O Método da Altura Relativa demonstrou ser eficiente para obtenção de dados, de forma mais econômica, que poderiam ser usados para o ajuste de modelos volumétricos se necessário.

#### 4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, R. C.; CABACINHA, C. D.; ROCHA, T. B.; PAULA, A. Volumetria de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake pelo método geométrico do Planalto da Conquista, Bahia. **Revista Caatinga**, v.24, n.1, p.65-75, 2011.
- ANDRADE, V. C. L. **Um método para descrever o perfil do tronco em árvores de eucalipto utilizando geometria analítica**. 2001. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 2001.
- ANDRADE, V. C. L., LEITE, H. G. **Análise do perfil do tronco de árvores utilizando geometria analítica**. Viçosa: UFV, 1997. 35p. Iniciação Científica Sem Bolsa de Pesquisa (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 1997. (manuscrito com direito autoral adquirido).
- ANDRADE, V. C. L.; LEITE, H. G. Uma nova metodologia para medir parcelas em inventários florestais. In: Seminário de Iniciação Científica da UFOP, 6., 1998, **Anais...** Ouro Preto: UFOP, 1998, p.73-74.
- ANDRADE, V. C. L.; LEITE, H. G. Análise do perfil do tronco de árvores utilizando geometria analítica. **Revista Árvore**, v.25, n.4, p.481 – 486, 2001.
- ANDRADE, V. C. L.; CALEGARIO, N.; SCOLFORO, J. R. S. Análise de algumas alternativas para obter o coeficiente angular da reta no método da altura relativa. **Ciência Florestal**, v.16, n.3, p.303-317, 2006.
- ANDRADE, V. C. L.; CALEGARIO, N.; SOUZA, A. L.; REZENSE, J. L. P.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Uso de sólidos geométricos para gerar equações de forma do tronco de árvores em pé. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 38, p. 299-311, 2009.
- CABACINHA, C. D. **Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a cubagem rigorosa**. 2003. 166 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Lavras, 2003.
- CABACINHA, C. D.; SCOLFORO, J. R. S.; THIERSCH, C. R.; SALES, N. de L. P.; CARVALHO, L. R. de. Uma nova abordagem para o método geométrico usando o índice da parábola. **Ciência Florestal**, v.23, n.1, p.261-271, 2013.
- GAMA, R. C.; ANDRADE, V. C. L. Equações hipsométricas e volumétricas para mogno africano no sul do Tocantins. **Scientia Agraria Paranaensis**, v.17, n.4, p.507-514, 2018.
- GARCIA, S. L. R.; LEITE, H. G.; YARED, J. A. G. Análise do perfil do tronco de morotó (*Didymopanax morototoni*) em função do espaçamento. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1.; CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBS: SBEF, 1993. p.485-491.
- GOMES, A. M. A. **Medição dos arboredos**. Lisboa: Livraria Sá da Costa, 1957. 413p.
- INMET. **Monitoramento Climático**. 2017. Disponível em:< <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=desvioChuvaAnual> >. Acesso em: 03 de mai.2018.

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

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. Uso do método da altura relativa em inventário florestal de um povoamento de *Pinus*. **Revista Árvore**, v.28, n.6, p.865-873, 2004.

OLIVEIRA, C. P. **Método da altura relativa na estimativa do volume individual para seleção de materiais genéticos de eucalipto**. 2011. 46 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.

PÉLLICO NETTO, S. Equivalência volumétrica: uma nova metodologia para estimativa do volume de árvores. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, v.2, n.1, p.17-30, 2004.

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

SCOLFORO, J. R. S. THIERSCH, C. R. **Biometria florestal: medição, volumetria e gravimetria**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004. 285 p

SILVA, M. L.; JACOVINE, L. A. G.; VALVERDE, S. R. **Economia Florestal**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2005. 178 p.

STOATE, I. N. The use of a volume equation in pine stands. **Australian Forestry**, Canberra, v.9, p.48-52, 1945.

TERRA, D. L. C. V.; ANDRADE, V. C. L.; FERREIRA JÚNIOR, J. M. Funções segmentadas de taper para o clone GG100 no sudeste do Tocantins. **Cerrado Agrociências**, v.8, p.104-115, 2017.

THIERSCH, C.R.; SCOLFORO, J. R.; OLIVEIRA, A. D.; MAESTRI, R.; DEHON, G. Acurácia dos métodos para estimativa do volume comercial de clones de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, v.12, n.2, p.167-181, 2006.