

UMA NOVA ABORDAGEM PARA O MÉTODO GEOMÉTRICO USANDO O ÍNDICE DA PARÁBOLA

A NEW APPROACH FOR THE GEOMETRIC METHOD USING THE PARABOLA INDEX METHOD

Christian Dias Cabacinha¹ José Roberto Soares Scolforo² Cláudio Roberto Thiersch³
Nilza de Lima Pereira Sales⁴ Letícia Renata de Carvalho⁵

RESUMO

O objetivo deste artigo é apresentar uma nova abordagem para o método geométrico, substituindo o coeficiente angular da reta pelo índice da parábola na geração de equações *taper* para estimar o volume de árvores individuais e comparar as estimativas de volume realizadas a partir desta nova abordagem com o volume obtido pela cubagem rigorosa de clones de eucalipto. A partir de modificações algébricas no índice da parábola e considerando os mesmos intervalos definidos para o método geométrico original, foram desenvolvidas expressões *taper*. De uma base de dados de 48 parcelas com 1819 árvores cubadas, 349 foram retiradas aleatoriamente para avaliação da nova abordagem proposta. Duas abordagens utilizando o índice da parábola foram propostas, uma usando dois diâmetros de apoio e outra usando um diâmetro de apoio na obtenção das equações *taper*. Os métodos foram então aplicados nas demais árvores amostradas e os volumes por parcela foram obtidos e comparados estatisticamente com o volume da parcela cubada. Os resultados mostraram que não existem diferenças entre os volumes estimados pelos métodos propostos e o volume da cubagem rigorosa. Portanto os mesmos podem ser usados com segurança nos inventários florestais.

Palavras-chave: volume; *taper*; inventário florestal.

ABSTRACT

The aim of this paper is to present a new approach for the geometric method, substituting the angular coefficient by the parable index in the generation of taper equations to estimate the volume of individual trees and to compare the volume estimates accomplished, starting from this new approach with the volume obtained by the rigorous cubage of eucalyptus clones. Starting from algebraic modifications in the parable index and considering the same measured points for the original geometric method, expression tapers were developed. Data of 48 plots with 1819 cubed trees, 349 were randomized for the evaluation of the new proposed approach. Two approaches using the parable index were proposed, firstly using two support diameters and secondly using one support diameter in the obtaining of the taper equations. The methods were applied in the other trees and the plot volumes were obtained and compared with the cubed plots volume. The results showed that differences do not exist between the volumes for the proposed methods and the volume rigorous cubage. Therefore, the methods can be used with safety in the forest inventories.

Keywords: volume; taper; forest inventory.

1. Engenheiro Florestal, Dr., Professor Adjunto do Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, Caixa Postal 135, CEP 39404-006, Montes Claros (MG). cabacinha@ica.ufmg.br
2. Engenheiro Florestal, Dr., Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras, Caixa Postal 37, CEP 37200-000, Lavras (MG). jscolforo@dcf.ufla.br
3. Engenheiro Florestal, Dr., Professor Adjunto do Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal de São Carlos, Rodovia João Leme dos Santos, km 110, CEP 18052-780, Sorocaba (SP). crthiersch@ufscar.br
4. Engenheira Florestal, Dra., Professora Adjunta do Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, Caixa Postal 135, CEP 39404-006, Montes Claros (MG). nsales@ica.ufmg.br
5. Engenheira Florestal, Dra., Professora Adjunta do Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, Caixa Postal 135, CEP 39404-006, Montes Claros (MG). leticiarenata@ica.ufmg.br

Recebido para publicação em 30/06/2010 e aceito em 23/09/2011

INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da ciência florestal, há mais de 500 anos, até hoje em dia, a volumetria de árvores constitui um tema relevante, dada a importância da madeira para a vida do homem (PÉLLICO NETO, 2004). No Brasil, por exemplo, o setor florestal é de importância relevante para o desenvolvimento econômico, pois os produtos florestais brasileiros apresentam uma grande competitividade no mercado exterior devido à disponibilidade de terras apropriadas para reflorestamento, características edafoclimáticas favoráveis, idade de corte menor que nos países de clima temperado ou frio, tecnologia adequada e infraestrutura desenvolvida no país (SILVA et al., 2005).

O procedimento mais adotado, para conhecer a volumetria dos maciços florestais, é a utilização de equações de volume. Para obtê-las, é necessário usar algum método de cubagem rigorosa, realizada em árvores previamente selecionadas. Em geral, esta opção exige o abate das árvores amostradas e a medição de vários diâmetros ao longo do fuste, atividade que é trabalhosa e foge a rotina das medições do dap (diâmetro a altura do peito) e das alturas das árvores que compõem a parcela do inventário. Assim, propostas que visem reduzir o tempo de realização da cubagem rigorosa e também associá-la à rotina das medições realizadas nas parcelas que compõem a amostra, podem propiciar grandes alterações no custo e na acurácia desta atividade.

O método geométrico ou método da altura relativa tem como filosofia de trabalho, exatamente promover rapidez e redução de custos. Foi desenvolvido por Andrade (2001) utilizando princípios dos sólidos de revolução como mostrado em Gomes (1957). Neste método, a partir de modificações algébricas feitas no coeficiente angular da reta, formada em intervalos pré-definidos na árvore em pé, ou seja, sem o abate, são geradas expressões de *taper*. Segundo Scolforo e Thiersch (2004) e Leite e Andrade (2004), o método geométrico possui também a vantagem de permitir a realização de medições de diâmetros com a árvore em pé, utilizando-se o Relascópio de Bitterlich ou um pentaprisma.

Segundo Andrade (2001), a base teórica do método segue o seguinte postulado: “Existe um determinado ponto entre o dap e a altura total de uma árvore, em que esta, ao ser dividida em dois intervalos, possibilita a minimização dos erros da estimativa do *taper*. Este fato ocorre em relação

ao dap, pois, considera-se que o perfil de uma árvore seja o resultado da intercessão de várias retas com coeficientes angulares, em intervalos aproximadamente iguais”.

É sabido que a forma da árvore é uma característica que possui influência direta sobre a precisão das estimativas do volume individual, portanto do volume do povoamento florestal e que o perfil da árvore é formado por segmentos de parábolas e não de retas como proposto pelo método geométrico original. Na geometria analítica existe um índice chamado “índice da parábola” que descreve o perfil do cone, do parabolóide e do neiloide, que são exatamente os sólidos geométricos que compõem o tronco das árvores (GOMES, 1957). Portanto, a partir de modificações algébricas feitas no índice da parábola, formada em intervalos pré-definidos na árvore em pé, ou seja, sem o abate, pode-se também gerar expressões de *taper*, com melhorias na precisão.

Neste contexto, o objetivo deste artigo é apresentar uma nova abordagem para o método geométrico utilizando o índice da parábola na geração de equações *taper*, para estimar o volume de árvores individuais e comparar as estimativas de volume realizadas a partir deste método com o volume obtido pela cubagem rigorosa de clones de eucalipto plantados em três sítios florestais.

MATERIAL E MÉTODO

Área de estudo e levantamento dos dados

A área deste estudo está localizada no município de Aracruz na região metropolitana do estado do Espírito Santo. De acordo com Golfari et al. (1978) na região do município de Aracruz, predominam solos do tipo Latossolo Amarelo, com horizonte A moderado, textura média e relevo plano. O clima segundo a classificação de Köppen é, AW, clima tropical úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno.

Foram lançadas aleatoriamente 48 parcelas circulares de 360 m² para um único material genético clonal, em uma mesma idade, 6,5 anos, em três classes de sítios (I, II, III), plantados no espaçamento 3 x 3 m.

Todas as 1819 árvores das 48 parcelas foram abatidas e cubadas rigorosamente pelo método de Smalian. Durante a cubagem foram medidos com suta, os diâmetros nas posições: 0,10; 0,30; 0,50; 0,70; 0,90; 1,10; 1,30; 2,00; 3,00 metros e assim sucessivamente até a altura total. Na ocasião da cubagem também foram medidos os diâmetros

correspondentes à altura relativa (hr), ou seja, $hr = (ht - 2)/2$, bem como a altura comercial correspondente ao diâmetro mínimo de 4 cm. Os dados de cubagem permitiram o conhecimento dos diâmetros reais em hr e $h_{0,3}$ e também os volumes comerciais (até 4,0 cm de diâmetro) e totais reais das árvores individuais e das parcelas.

Desenvolvimento do método geométrico usando o índice da parábola

Partindo da metodologia desenvolvida por Andrade (2001), o desenvolvimento do método consistiu em, primeiramente, calcular os índices da parábola que passam por pontos pré-definidos na árvore. Usando expressões desenvolvidas por Gomes (1957), o índice da parábola pôde ser calculado, para os diferentes segmentos da árvore a partir de procedimentos matemáticos como adotado por Leite e Andrade (2002). Gerou-se expressões *taper* para estimar o diâmetro e o volume comercial e total por árvore. Maiores detalhes podem ser vistos em Cabacinha (2003).

Buscando melhorias nas estimativas dos diâmetros, duas diferentes abordagens para o método geométrico usando o índice da parábola foram concebidas. Uma utilizando dois diâmetros de apoio, que definiram mais duas alturas relativas para obtenção destes diâmetros no fuste: hr_1 e hr_2 . Outra utilizando um diâmetro de apoio, definido por hr_1 .

Análise dos dados

Foram retiradas da base de dados 349 árvores pertencentes a nove parcelas, três parcelas em cada sítio para testar as estimativas realizadas pelas abordagens propostas. As expressões *taper* obtidas foram então utilizadas para estimar o volume comercial (até 4,0 cm) e total de todas as árvores.

Testou-se, qual a melhor posição do fuste para estimar os diâmetros de apoio (dhr_1 e dhr_2) para aplicação do método, combinando a posição definida por hr_1 , do intervalo entre o dap e dhr e a posição definida por hr_2 , do intervalo entre dhr e $d_{0,0}$ (diâmetro na altura total). As combinações resultaram da variação em 10 % da posição de medição de dhr_1 e dhr_2 , isto é, na primeira combinação, dhr_1 foi estimado para uma altura corresponde a 10 % do intervalo entre o dap e dhr e dhr_2 foi estimado para uma altura correspondente a 10 % do intervalo entre o dhr e $d_{0,0}$ e assim de 10 em 10 % até a última combinação testada, onde dhr_1 foi estimado para uma altura corresponde a 90 % do intervalo entre o dap e dhr e dhr_2 foi estimado para uma altura correspondente a

90 % do intervalo entre o dhr e $d_{0,0}$.

A soma destas combinações resultou em um total de 81 possibilidades de tomadas dos diâmetros de apoio. Para cada uma das combinações testadas, gerou-se a média dos volumes totais que foram comparadas em uma análise de variância em esquema fatorial (com dois fatores), O fator 1 foi o sítio, com três níveis: sítios I, II e III; e o fator 2 foram os volumes obtidos a partir das 81 combinações possíveis mais o volume cubado (testemunha), totalizando 82 níveis.

Nos casos em que ocorreram diferenças significativas, foi executado o teste de média de Tukey, considerando o nível de significância $\alpha = 0,05$. Para a análise de variância e para o teste de média foram considerados os seguintes tratamentos:

- Tratamento 1: Volume total médio obtido a partir da cubagem rigorosa (Testemunha);

- Tratamento 2: Volume total médio obtido a partir da combinação 10 % - 10 % e assim sucessivamente até o tratamento 82;

- Tratamento 82: Volume total médio obtido a partir da combinação 90 % - 90 %.

A combinação escolhida foi então usada no método para estimar os volumes comerciais e totais das demais árvores amostradas.

Realizou-se uma análise exploratória dos dados utilizando gráficos *box plot* visando revelar *outliers* e visualizar a locação, a dispersão, a simetria e o peso das caudas da base de dados (CUNHA et al., 2002). Os *outliers* podem indicar que os modelos propostos de estimativa para os volumes comerciais e totais das árvores amostra são incompatíveis com os dados.

Para cada um dos métodos de estimativa foi feita uma análise de regressão. Ajustou-se um modelo linear simples, $V_i = \beta_0 + \beta_1 \hat{V}_i + \varepsilon_i$ em que o volume cubado (V_i) foi a variável dependente e o volume comercial e total obtido pelas diferentes abordagens do método geométrico, utilizando o índice da parábola, foi a variável independente do modelo.

Para avaliar o desempenho das equações na estimativa do volume em cada sítio, foi avaliado o coeficiente de determinação (R^2) em percentagem, o erro padrão residual (S_{yx}), na escala original da variável dependente e em percentagem e gráficos mostrando a dispersão dos volumes obtidos pela cubagem rigorosa e métodos estudados.

Posteriormente as equações *taper* foram utilizadas para estimar o volume total das vinte e nove parcelas restantes, treze parcelas em cada sítio. Esta etapa possibilitou avaliar o desempenho dos métodos na estimativa do volume do inventário florestal.

Para identificar os métodos que propiciaram estimativas do volume semelhantes aos volumes reais das parcelas obtidos pela cubagem rigorosa, foi aplicada aos dados uma análise de variância em esquema fatorial (com dois fatores). O fator 1 foi o sítio, com três níveis: sítios I, II e III; e o fator 2 foram os métodos de obtenção do volume utilizados, com três níveis: volume da parcela obtido pela cubagem rigorosa, volume da parcela obtido pelo método geométrico utilizando o índice da parábola com dois diâmetros de apoio e volume da parcela obtido pelo método geométrico utilizando o índice da parábola com um diâmetro de apoio.

Quando a interação foi significativa considerando o nível de significância $\alpha = 0,05$, procedeu-se o desdobramento da interação, aplicando-se o teste de Tukey para as médias dos volumes estimados. Quando a interação não foi significativa, aplicou-se o mesmo teste somente para o fator 2, ou seja, para as estimativas de volume obtidas a partir da cubagem rigorosa e das duas novas abordagens do método geométrico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Método geométrico usando o índice da parábola com dois diâmetros de apoio

Partindo da expressão (1) que segundo Gomes (1957), é a equação reduzida de uma curva plana designada por parábola ordinária ou de Apollonius e das posições de tomadas de diâmetro da figura 1:

$$d_i = b(h_i)^r \quad (1)$$

Onde: d_i = diâmetro; b = coeficiente real; h_i = altura e r = índice da parábola.

Para a seção III da Figura 1, considerando a expressão 1 com $r=1$, tem-se:

$$d_i = b(h_i) \quad (1.1)$$

De acordo com Gomes (1957) tal expressão (1.1), traduz os perfis das extremidades dos fustes e respeita duas retas passando pela origem (vértice da parábola) e simétricas em relação ao eixo das abscissas, o ângulo α , igual a 45° , que as retas formam com este eixo condicionam o valor de b ($b=\text{tg } \alpha$). Portanto $b=1$.

Para a seção III da Figura 1, considerando

agora a expressão 1 com $b=1$, tem-se:

$$\frac{dhr}{2} = (ht - hr)^{r_{III}} \quad (2)$$

Aplicando propriedades de logaritmo e rearranjando a expressão (2), tem-se:

$$\log\left(\frac{dhr}{2}\right) = r_{III} * \log(ht - hr) \rightarrow r_{III} = \frac{\log\left(\frac{dhr}{2}\right)}{\log(ht - hr)} \quad (3)$$

Para a seção II definindo como hr_2 uma altura de medição entre hr e ht e estimando o d_{hr_2} (diâmetro de apoio) a partir da expressão:

$$dhr_2 = 2(ht - hr_2)^{r_{II}} \quad (4)$$

Desta forma tem-se:

$$\frac{dap}{2} = \frac{dhr_2}{2} + b * (hr_2 - 1,3)^{r_{II}} \quad (5)$$

$$\frac{dhr}{2} = \frac{dhr_2}{2} + b * (hr_2 - hr)^{r_{II}} \quad (6)$$

Isolando b em 5 e 6, tem-se:

$$b = \frac{dap - dhr_2}{2(hr_2 - 1,3)^{r_{II}}} \quad (7)$$

$$b = \frac{dhr - dhr_2}{2(hr_2 - hr)^{r_{II}}} \quad (8)$$

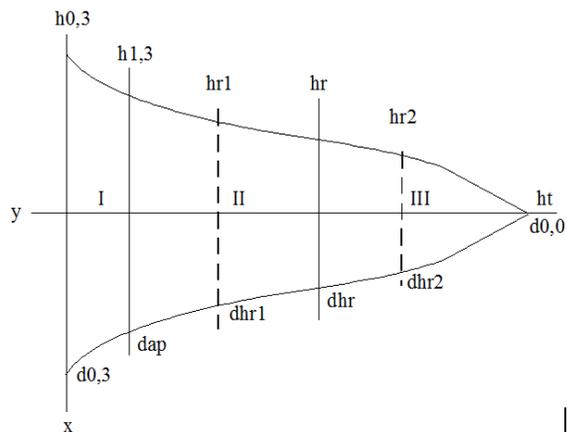


FIGURA 1: Croqui de uma árvore amostra, ilustrando as informações necessárias para o desenvolvimento do método geométrico, usando o índice da parábola com dois diâmetros de apoio.

FIGURE 1: Sketch of a tree sample, illustrating the necessary information for the development of the geometric method, using the parable index with support of two diameters.

Igualando 7 e 8 e rearranjando, tem-se:

$$\frac{dhr - dhr_2}{2(hr_2 - hr)^{r_{II}}} = \frac{dap - dhr_2}{2(hr_2 - 1, 3)^{r_{II}}} \rightarrow$$

$$\frac{dap - dhr_2}{dhr - dhr_2} = \frac{(hr_2 - 1, 3)^{r_{II}}}{(hr_2 - hr)^{r_{II}}} \rightarrow$$

$$\frac{dap - dhr_2}{dhr - dhr_2} = \left(\frac{hr_2 - 1, 3}{hr_2 - hr}\right)^{r_{II}} \rightarrow$$

$$r_{II} = \frac{\log(dap - dhr_2) - \log(dhr - dhr_2)}{\log(hr_2 - 1, 3) - \log(hr_2 - hr)} \quad (9)$$

Para a seção I, assim como foi definido para a seção II, estipulou-se também um hr_1 entre 1,30 e hr , e estimou-se o diâmetro de apoio dhr_1 a partir da expressão:

$$dhr_1 = dhr_2 + 2 * b * (hr_2 - hr_1)^{r_{II}} \quad (10)$$

Desta forma tem-se:

$$\frac{d_{0,3}}{2} = \frac{dhr_1}{2} + b * (hr_1 - h_{0,3})^{r_I} \quad (11)$$

$$\frac{dap}{2} = \frac{dhr_1}{2} + b * (hr_1 - 1, 30)^{r_I} \quad (12)$$

Isolando b , em 11 e 12, tem-se:

$$b = \frac{d_{0,3} - dhr_1}{2(hr_1 - h_{0,3})^{r_I}} \quad (13)$$

$$b = \frac{dap - dhr_1}{2(hr_1 - 1, 30)^{r_I}} \quad (14)$$

Igualando as expressões 13 e 14 tem-se:

$$\frac{d_{0,3} - dhr_1}{2(hr_1 - h_{0,3})^{r_I}} = \frac{dap - dhr_1}{2(hr_1 - 1, 30)^{r_I}} \rightarrow$$

$$\frac{dap - dhr_1}{d_{0,3} - dhr_1} = \frac{(hr_1 - 1, 30)^{r_I}}{(hr_1 - h_{0,3})^{r_I}}$$

$$\frac{dap - dhr_1}{d_{0,3} - dhr_1} = \left(\frac{hr_1 - 1, 30}{hr_1 - h_{0,3}}\right)^{r_I} \rightarrow$$

$$r_I = \frac{\log(dap - dhr_1) - \log(d_{0,3} - dhr_1)}{\log(hr_1 - 1, 30) - \log(hr_1 - h_{0,3})} \quad (15)$$

Isolando-se dh_{ij} , em 3, 9 e 15 e utilizando-se as expressões resultantes, torna-se possível a estimativa dos diâmetros a qualquer altura. Assim, as expressões podem ser aplicadas da seguinte forma:

Para $0,3 < h_i < hr_1$ m, tem-se:

$$d_{hij} = \frac{\left\{ d_{ij} * \left[\left(\frac{hr_1 - 1,3}{hr_1 - h_{ij}} \right)^{r_I} \right] \right\} - dap}{\left[\left(\frac{hr_1 - 1,3}{hr_1 - h_{ij}} \right)^{r_I} \right] - 1} \quad (16)$$

Para $hr_1 < h_i < hr_2$ m, tem-se:

$$d_{hij} = \frac{dap - \left\{ \left[\left(\frac{hr_2 - 1,3}{hr_2 - h_{ij}} \right)^{r_{II}} \right] * d_{hr} \right\}}{1 - \left[\left(\frac{hr_2 - 1,3}{hr_2 - h_{ij}} \right)^{r_{II}} \right]} \quad (17)$$

Para $hr_2 < h_i < ht$ m, tem-se:

$$d_{hij} = 2(ht - hr)^{r_{III}} \quad (18)$$

Método geométrico usando o índice da parábola com um diâmetro de apoio

Neste caso considerou-se que a árvore possuía apenas duas seções (Figura 2).

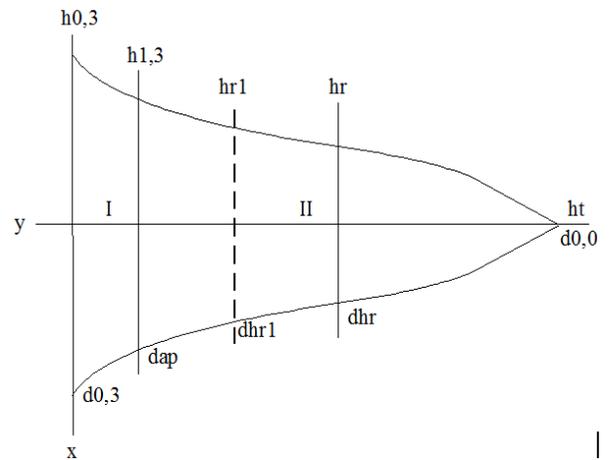


FIGURA 2: Croqui de uma árvore amostra, ilustrando as informações necessárias para o desenvolvimento do método da altura relativa, usando o índice da parábola com um diâmetro de apoio.

FIGURE 2: Sketch of a tree sample, illustrating the necessary information for the development of the geometric method, using the parable index with support of one diameter.

Para a seção II

$$\frac{dap}{2} = b * (ht - 1,30)^{r_{II}} \quad (19)$$

$$\frac{dhr}{2} = b * (ht - hr)^{r_{II}} \quad (20)$$

Isolando b, nas expressões 19 e 20, tem-se:

$$b = \frac{dap}{2(ht - 1,30)^{r_{II}}} \rightarrow b = \frac{dhr}{2(ht - hr)^{r_{II}}} \rightarrow$$

$$\frac{dap}{2(ht - 1,30)^{r_{II}}} = \frac{dhr}{2(ht - hr)^{r_{II}}}$$

$$\frac{dap}{dhr} = \frac{(ht - 1,30)^{r_{II}}}{(ht - hr)^{r_{II}}} \rightarrow \frac{dap}{dhr} = \left(\frac{ht - 1,30}{ht - hr}\right)^{r_{II}} \rightarrow$$

$$r_{II} = \frac{\log(dap) - \log(dhr)}{\log(ht - 1,30) - \log(ht - hr)} \quad (21)$$

Para a seção I, assim como foi feito no índice da parábola usando dois diâmetros de apoio, foi definido uma hr_1 entre 1,30 e hr, e estimado o diâmetro de apoio dhr_1 , a partir da seguinte expressão:

$$dhr_1 = 2 * b * (ht - hr_1)^{r_{II}} \quad (22)$$

O desenvolvimento do método procedeu-se da mesma forma que para a seção I do índice da parábola usando dois diâmetros de apoio, então, tem-se:

$$r_I = \frac{\log(dap - dhr_1) - \log(d_{0,3} - dhr_1)}{\log(hr_1 - 1,30) - \log(hr_1 - h_{0,3})} \quad (23)$$

Isolando-se dh_{ij} , em 21 e 23 e utilizando-se as expressões resultantes, torna-se possível a estimativa dos diâmetros a qualquer altura. Assim, as expressões podem ser aplicadas da seguinte forma:

Para $0,3 < h_i < hr_1$ m, tem-se:

$$d_{hij} = \frac{\left\{ d_{ij} * \left[\left(\frac{hr_1 - 1,3}{hr_1 - h_{ij}} \right)^{r_I} \right] \right\} - dap}{\left[\left(\frac{hr_1 - 1,3}{hr_1 - h_{ij}} \right)^{r_I} \right] - 1} \quad (24)$$

Para $hr_1 < h_i < ht$ m, tem-se:

$$d_{hij} = \frac{dap}{\left(\frac{ht - 1,3}{ht - h_{ij}} \right)^{r_{II}}} \quad (25)$$

Usando as expressões 16, 17, 18 e 24 e 25 foi possível estimar os diâmetros nas mesmas alturas consideradas para a cubagem rigorosa o que permitiu a obtenção dos volumes comerciais (até 4,0 cm) e totais das árvores aplicando-se a fórmula de Smalian.

Melhor combinação de diâmetros de apoio para o método geométrico utilizando o índice da parábola

A análise de variância para as 81 combinações de diâmetros de apoio para o método geométrico utilizando o índice da parábola revelou que existem diferenças entre a posição de medição de dhr_1 e dhr_2 para os sítios I e III ($p < 0,0001$). Observou-se que dentro do sítio II, não houve diferença significativa entre as médias dos volumes geradas pelo método geométrico usando o índice da parábola com diferentes combinações de posições de tomada dos diâmetros de apoio.

No desdobramento dos tratamentos dentro de cada sítio, verificou-se que no sítio I, ocorreu uma superestimativa do volume e que todas as médias geradas pelas combinações foram semelhantes e diferiram da testemunha (cubagem rigorosa), sendo que a combinação que mais se aproximou da testemunha foi a 90 % entre 1,30 e hr e 10 % entre hr e ht. Já no sítio III, ocorreu uma subestimativa do volume e todas as médias geradas pelas combinações foram semelhantes e diferiram da testemunha (cubagem rigorosa), porém, a combinação que mais se aproximou da testemunha foi a 10 % entre 1,30 e hr e 60 % entre hr e ht. Os resultados obtidos mostram que para dois sítios (I e III) há diferenças entre as combinações e a testemunha o que dificulta a definição da melhor posição para os diâmetros de apoio. Já para o sítio II qualquer posição pode ser utilizada. Foi então avaliada a exatidão (diferença do estimado para o real) para cada uma das 81 combinações estudadas. A combinação que apresentou maior acurácia foi 10 % entre 1,30 m e hr e 60 % entre hr e ht.

Estimativas dos volumes comerciais (até 4,0 cm) e totais

Para visualizar as principais diferenças entre os volumes obtidos a partir da cubagem rigorosa e as estimativas de volume comercial e total realizadas pelas abordagens estudadas para cada sítio e possíveis outliers, construiu-se os box plot. Observou-se que para todos os sítios, em todos os métodos estudados, os valores extremos foram

ausentes, indicando que os modelos propostos são compatíveis com os dados; estabilidade das variâncias, resultado de grande importância na aplicação da análise de variância. Os volumes comerciais e totais obtidos pela cubagem, para os sítios I e II, apresentaram maior simetria e os volumes do sítio III apresentaram certa assimetria à direita. Este comportamento simétrico e assimétrico dos volumes cubados para os diferentes sítios foi captado pelos dois métodos propostos. Este resultado está associado à própria natureza da base de dados e demonstra a grande habilidade que os dois métodos propostos possuem em realizar estimativas precisas do volume individual.

Na Figura 3, pode-se observar a dispersão entre os volumes comerciais e totais da cubagem rigorosa e os volumes comerciais e totais para o método geométrico usando o índice da parábola com dois e um diâmetros de apoio para o sítio I. A equação de regressão, além de apresentar excelentes estatísticas, R^2 superiores a 93 % e Syx inferiores

a $\pm 0,0232 \text{ m}^3$, não apresentou tendenciosidade nas estimativas de volume. Embora se observe que para quatro indivíduos com daps entre 15,0 e 18,0 cm a equação de regressão ajustada apresenta maiores erros associados.

Na Figura 4, pode-se observar a dispersão entre os volumes comerciais e totais da cubagem rigorosa e os volumes comerciais e totais para o método geométrico usando o índice da parábola com dois e um diâmetros de apoio para o sítio II. A equação de regressão apresenta estatísticas superiores às obtidas para o sítio I, R^2 superiores a 95 % e Syx inferiores a $\pm 0,0150 \text{ m}^3$, não apresentou tendenciosidade nas estimativas de volume.

Na Figura 5, pode-se observar a dispersão entre os volumes comerciais e totais da cubagem rigorosa e os volumes comerciais e totais para o método geométrico usando o índice da parábola com dois e um diâmetros de apoio para o sítio III. A equação de regressão apresenta boas estatísticas,

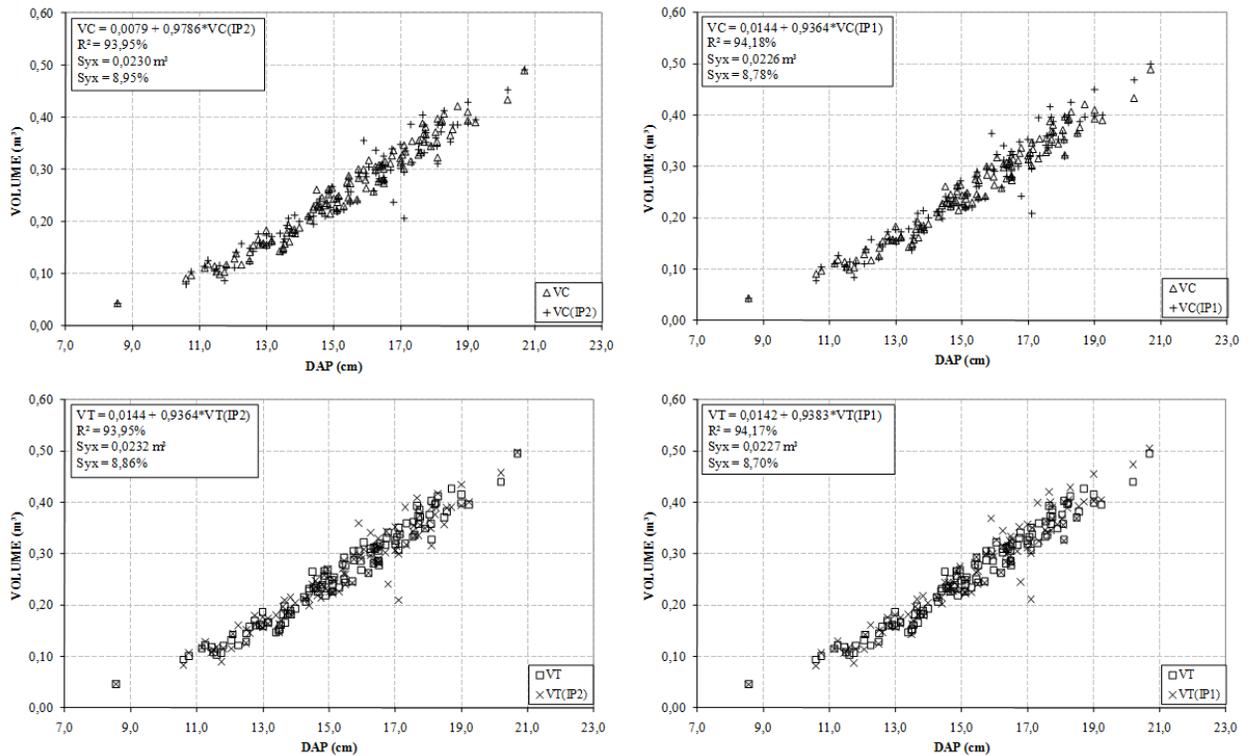


FIGURA 3: Dispersão entre os volumes comerciais (VC) e totais (VT) obtidos pela cubagem rigorosa e o método geométrico usando dois e um (IP2, IP1) diâmetros de apoio para o sítio I. Equação ajustada pela regressão; R^2 =coeficiente de determinação; Syx =erro padrão residual na escala original da variável dependente (m^3) e em percentagem.

FIGURE 3: Dispersion between commercial volumes (VC) and total volumes (VT) obtained by rigorous cubage and geometric method using two and one (IP2, IP1) support diameters for the site I. Adjusted regression equation, R^2 =coefficient of determination; Syx =standard error residual in the original scale of the dependent variable (m^3) and in percentage.

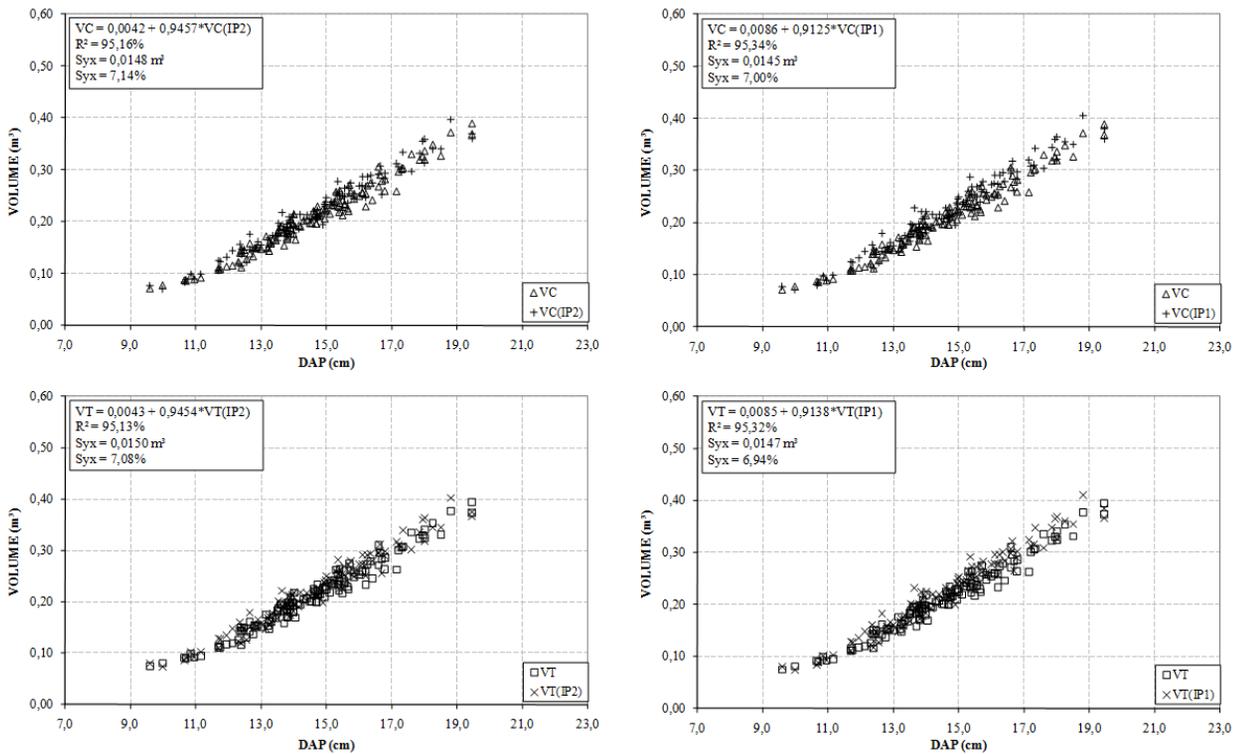


FIGURA 4: Dispersão entre os volumes comerciais (VC) e totais (VT) obtidos pela cubagem rigorosa e o método geométrico usando dois e um (IP2, IP1) diâmetros de apoio para o sítio II. Equação ajustada pela regressão; R^2 =coeficiente de determinação; Syx=erro padrão residual na escala original da variável dependente (m^3) e em percentagem.

FIGURE 4: Dispersion between commercial volumes (VC) and total volumes (VT) obtained by rigorous cubage and geometric method using two and one (IP2, IP1) support diameters for the site II. Adjusted regression equation, R^2 =coefficient of determination; Syx=standard error residual in the original scale of the dependent variable (m^3) and in percentagem.

porém, inferiores aos demais sítios, R^2 superiores a 92 % e Syx inferiores a $\pm 0,0209 m^3$, não apresentou tendenciosidade nas estimativas de volume. Embora as estimativas para vários indivíduos tenham maiores erros associados.

De maneira geral, para os três sítios, as duas novas abordagens do método geométrico apresentaram excelentes resultados, embora as mesmas posições de tomadas de diâmetro definidas por Andrade (2001) tenham sido utilizadas. Thiersch et al. (2006) quando avaliaram a acurácia dos métodos para estimativa do volume comercial de clones de *Eucalyptus* sp. verificaram que o método geométrico original foi preciso e exato, quando o diâmetro foi mensurado a 0,1 m; 1,3 m e na altura relativa. Para o sítio III a maior dispersão dos volumes estimados pelos os métodos e as estatísticas de regressão levemente inferiores às dos sítios II e III, pode estar associada à maior variabilidade de forma dos fustes neste sítio e perdas de precisão

do método geométrico nas estimativas de diâmetro neste sítio. Andrade et al. (2006) ao utilizarem uma modificação do método geométrico original para caracterizar o perfil do tronco de árvores de eucalipto, observaram que em média, há perdas de precisão na estimativa do diâmetro à medida que a altura se distancia em direção à altura total. No entanto, os autores acrescentam que como se tratam de diâmetros menores, os erros observados podem não influenciar indesejavelmente a predição do volume. Outros estudos focados no poder de estimativa dos métodos com o controle da forma dos fustes na base de dados podem esclarecer este fato.

Como não foram observadas diferenças no comportamento dos métodos nas estimativas de volume comercial e total, para avaliar a eficiência dos métodos nas estimativas de volume por unidade de área considerando as parcelas do inventário optou-se pelo volume total. Na Tabela

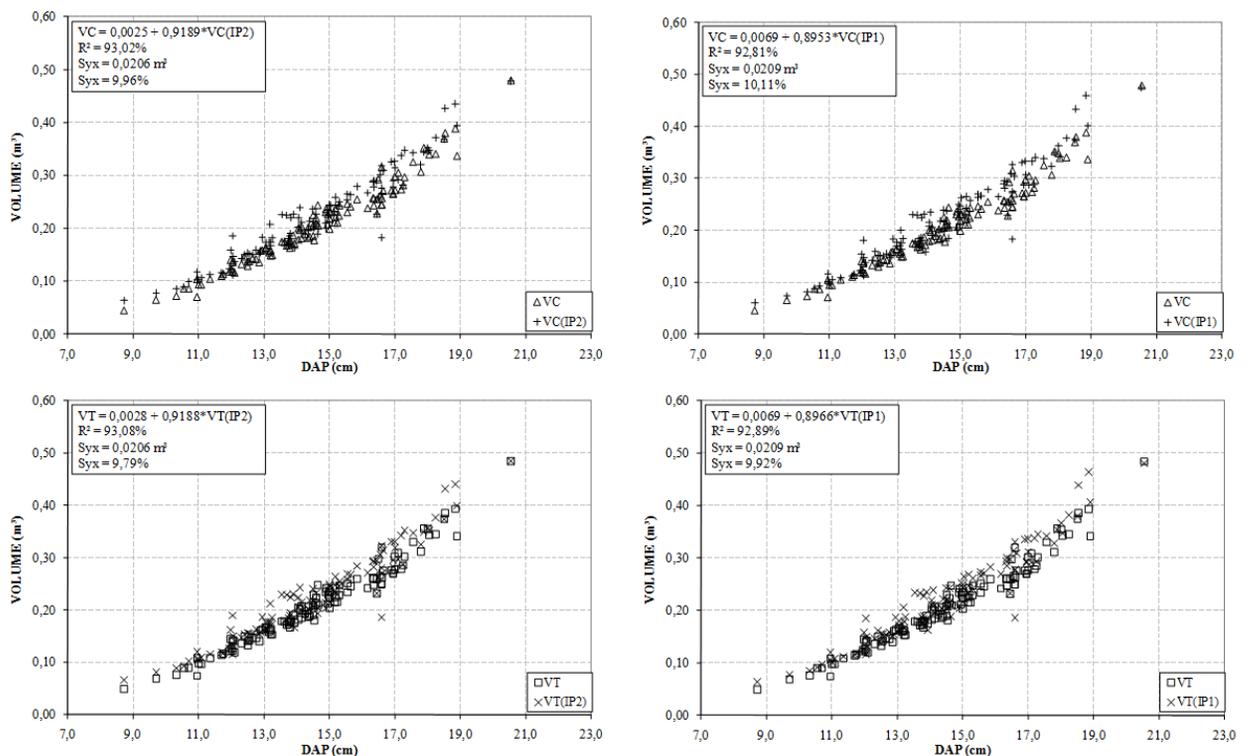


FIGURA 5: Dispersão entre os volumes comerciais (VC) e totais (VT) obtidos pela cubagem rigorosa e o método geométrico usando dois e um (IP2, IP1) diâmetros de apoio para o sítio III. Equação ajustada pela regressão; R^2 =coeficiente de determinação; Syx =erro padrão residual na escala original da variável dependente (m^3) e em percentagem.

FIGURE 5: Dispersion between commercial volumes (VC) and total volumes (VT) obtained by rigorous cubage and geometric method using two and one (IP2, IP1) support diameters for the site III. Adjusted regression equation, R^2 =coefficient of determination; Syx =standard error residual in the original scale of the dependent variable (m^3) and in percentage.

1, pode-se observar uma síntese destes volumes obtidos para as parcelas do inventário. As médias dos volumes por parcela não apresentaram diferenças estatísticas. Verifica-se uma baixa variabilidade nos volumes dos três sítios, entretanto, corroborando com o resultado obtido para os volumes individuais, no sítio III, observa-se uma maior variabilidade.

No sítio I, o método geométrico usando o índice da parábola com dois diâmetros de apoio subestimou o volume (Erro = +2,10 %) e o método geométrico usando o índice da parábola com um diâmetro de apoio apresentou uma pequena tendência em superestimar o volume (Erro = -0,43 %). Já para os demais sítios a tendência foi de superestimar o volume e erros maiores, exceto o método geométrico usando o índice da parábola com dois diâmetros de apoio para o sítio II, que apresentou um erro = -1,47 %, o menor erro encontrado para todos os sítios para este método.

De maneira geral as estimativas de volume por unidade de área realizada pelos métodos, também apresentaram excelentes resultados com erros inferiores a 5 % em todos os casos.

Na Tabela 2 pode-se observar uma síntese do inventário florestal. Estes resultados mostram que os métodos propostos geram erros de amostragem inferiores a 10 % (máximo admitido para o inventário florestal).

O menor erro de amostragem encontrado foi 5,09 % para o método geométrico usando o índice da parábola com dois diâmetros de apoio no sítio I e o maior erro foi 6,89 % para a cubagem rigorosa no sítio III. Como os métodos estimam o *taper*, tendem a estabilizar a variância dos volumes, diminuindo o desvio padrão da média e consequentemente o erro do inventário. Devido a este fato, os métodos testados em todos os casos geraram erros de amostragem inferiores aos obtidos pela cubagem rigorosa.

TABELA 1: Síntese dos volumes totais obtidos por parcela.

TABLE 1: Summary of total volumes obtained by plot.

Sítio	Estatísticas	CR	IP2	IP1
I	VT Médio	9,4916	9,2926	9,5328
	Erro	-	+ 2,10 %	- 0,43 %
	VT Máximo	11,5554	10,9045	11,3776
	VT Mínimo	8,1548	8,4518	8,5271
	SD	± 0,9066	± 0,7819	± 0,8654
	CV	9,55 %	8,41 %	9,08 %
II	VT Médio	9,2981	9,4350	9,6253
	Erro	-	- 1,47 %	- 3,52 %
	VT Máximo	10,8981	11,0295	11,2898
	VT Mínimo	7,7750	8,1162	8,1934
	SD	± 1,0121	± 0,9195	± 0,9604
	CV	10,88 %	9,75 %	9,98 %
III	VT Médio	8,7186	9,0152	9,1065
	Erro	-	- 3,40 %	- 4,45 %
	VT Máximo	10,5517	10,6059	10,6518
	VT Mínimo	7,3388	7,6775	7,7521
	SD	± 0,9938	± 0,8776	± 0,8719
	CV	11,40 %	9,73 %	9,57 %

Em que: CB = Cubagem Rigorosa; IP2 = Método geométrico usando o índice da parábola com dois diâmetros de apoio; IP1 = Método geométrico usando o índice da parábola com um diâmetro de apoio; VT = Volume Total; SD = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação.

TABELA 2: Síntese do Inventário Florestal.

TABLE 2: Summary of Forest Inventory.

Sítio	Método	\bar{V}/ha	$S\bar{v}$ (m^3/ha)	E%	Limite de Confiança (m^3/ha)	
					Inferior	Superior
I	CR	263,6566	6,9846	5,77	248,2892	278,8759
	IP2	258,1268	6,0241	5,09	252,1027	271,2534
	IP1	264,7992	6,6669	5,49	258,1324	279,3263
II	CR	258,2795	7,7973	6,58	241,2892	275,2698
	IP2	262,0822	7,0840	5,89	254,9981	277,5128
	IP1	267,3698	7,3991	6,03	259,9707	283,4924
III	CR	242,1847	7,6564	6,89	225,5015	258,8679
	IP2	250,4216	6,7612	5,88	243,6604	265,1544
	IP1	252,9576	6,7171	5,79	246,2405	267,5943

Em que: CR = Cubagem Rigorosa; IP2 = Método geométrico usando o índice da parábola com dois diâmetros de apoio; IP1 = Método geométrico usando o índice da parábola com um diâmetro de apoio; \bar{V}/ha = Volume médio por hectare; $S\bar{v}$ (m^3/ha) = Desvio padrão da média; E% = Erro de amostragem ($t=2,179$ para $\alpha=0,05$ e 12 graus de liberdade).

CONCLUSÃO

As abordagens propostas para o método geométrico utilizando o índice da parábola com dois e um diâmetros de apoio, substituindo o coeficiente angular da reta, na geração de equações *taper* para estimar o volume, mostraram eficiência e acuracidade em tais estimativas quando comparadas com o volume real obtido pela cubagem rigorosa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, V. C. L. et al. Análise de algumas alternativas para obter o coeficiente angular da reta no método da altura relativa. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 3, p. 303-317, jul./set. 2006.
- 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.
- 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.
- CUNHA, U. S. et al. Predição da estrutura diamétrica de espécies comerciais de terra firme da Amazônia por meio de matriz de transição. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 109-122, jan./mar. 2002.
- GOLFARI, L. et al. **Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil**. Belo Horizonte: Centro de Pesquisa Florestal da Região do Cerrado, 1978. 66 p.
- GOMES, A. M. A. **Medição dos arboredos**. Lisboa: Livraria Sá da Costa, 1957. 413 p.
- LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 321-328, maio/jun. 2002.
- LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. Uso do método da altura relativa em inventário florestal de um povoamento de *Pinus*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 865-873, nov./dez. 2004.
- PÉLLICO NETTO, S. Equivalência volumétrica: uma nova metodologia para estimativa do volume de árvores. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais**, Curitiba, v. 2, n.1, p. 17-30, jan./mar. 2004.
- SCOLFORO, J. R. S. THIERSCH, C. R. **Biometria**

florestal: medição, volumetria e gravimetria. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004. 285 p
SILVA, et al. **Economia Florestal**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2005. 178 p.

THIERSCH, C. R. et al. Acurácia dos métodos para estimativa do volume comercial de clones de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 167-181, abr./jun. 2006.