



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

**INTENSIDADE AMOSTRAL DE ÁRVORES CUBADAS E SUA RELAÇÃO COM
MODELO VOLUMÉTRICO**

DALILA ARAÚJO LOPES

Prof. Dr. MARCO ANTONIO MONTE
Orientador

SEROPÉDICA-RJ
JUNHO-2016



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

**INTENSIDADE AMOSTRAL DE ÁRVORES CUBADAS E SUA RELAÇÃO COM
MODELO VOLUMÉTRICO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

DALILA ARAÚJO LOPES

Prof. Dr. MARCO ANTONIO MONTE
Orientador

SEROPÉDICA-RJ
JUNHO-2016

**INTENSIDADE AMOSTRAL DE ÁRVORES CUBADAS E SUA RELAÇÃO COM
MODELO VOLUMÉTRICO**

DALILA ARAÚJO LOPES

Monografia aprovada em 07 de Junho de 2016.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marco Antonio Monte – UFRRJ
Orientador

Prof. Dr. Emanuel José Gomes de Araújo – UFRRJ
Membro

Prof. Dr. Francisco José de Barros Cavalcanti – UFRRJ
Membro

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Judite, dedico.

AGRADECIMENTOS

À Oxalá, aos Orixás, mestres e guias espirituais, que me fortalecem, orientam e me protegem. Por toda a luz, força, sabedoria, por me iluminar e abençoar minha trajetória.

À minha mãe, por todos os ensinamentos, dedicação, amor, carinho, apoio, incentivo e por tudo que já fez por mim.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e ao Instituto de Florestas, pela experiência e oportunidades ao longo da graduação.

Ao Professor Marco Monte, pela orientação, atenção, conhecimento transmitido e paciência. Obrigada por aceitar o convite de me auxiliar neste trabalho.

Aos membros da banca, Professor Emanuel Araújo e Francisco Cavalcanti, pela contribuição dada nesse trabalho.

Ao Professor Alexandre Monteiro e aos amigos do PET-Floresta, pela oportunidade de aprendizado e experiências.

Aos amigos da Engenharia Florestal, em especial Dayanne e Juliana, obrigada pela amizade, conselhos e paciência. E ao grande amigo Marcondes, pelo carinho, o companheirismo de anos, dias de estudos e conselhos.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo determinar a intensidade amostral da cubagem rigorosa, considerando a precisão da equação volumétrica. O povoamento foi estabelecido sob espaçamento inicial de 3,0 x 3,0 m. Foram cubadas 453 árvores de clones de *Eucalyptus sp.*, com aproximadamente sete anos, distribuídas em oito classes de diâmetro, com amplitude de 2,5 cm. O volume da seção foi obtido pelo método de Smalian. Foram realizadas simulações de cubagem, variando a intensidade amostral de 1 a 10 árvores, por classe de diâmetro. Em cada intensidade amostral foram realizadas 30 simulações, utilizando sorteio com reposição. À medida que se adicionou mais uma árvore, foram mantidas aquelas sorteadas anteriormente. O modelo volumétrico utilizado foi o de Schumacher e Hall. A definição da intensidade amostral adequada foi obtida por meio dos seguintes critérios: erro padrão da estimativa (S_{yx}), coeficiente de variação ($CV\%$), análise gráfica dos resíduos, bias (B) e raiz quadrada do erro médio ($RQEM\%$). Os valores de S_{yx} , $CV\%$, B e $RQEM\%$ apresentaram maiores dispersões para as menores intensidades amostrais, na classe de diâmetro; isso indica que não é recomendado realizar a cubagem utilizando poucas árvores por classe de diâmetro. Embora as estatísticas de qualidade de ajuste (S_{yx} e $CV\%$) apresentaram valores satisfatórios, verificou-se por meio da análise dos resíduos, que as estimativas foram tendenciosas, devido à ocorrência de heterocedasticidade. Contudo, as estatísticas B e $RQEM\%$ possibilitaram indicar que devem ser utilizadas, no mínimo, seis árvores por classe de diâmetro, para que se obtenham estimativas não tendenciosas de volume individual, considerando o modelo de Schumacher e Hall.

PALAVRAS-CHAVE: Ajuste; Classes de diâmetro; Schumacher & Hall.

ABSTRACT

The present study aimed to determine the sampling intensity of cubing strict, considering the accuracy of the volumetric equation. The population was established under initial spacing of 3.0 x 3.0 m. Were cubed 453 trees the clones of *Eucalyptus* sp., with approximately seven years, distributed in eight diameter classes, with an amplitude of 2.5 cm. The volume of the section was obtained by Smalian method. Were performed cubing simulations, varying the sampling intensity of 1 to 10 trees, by diameter class. At each sampling intensity were conducted 30 simulations, using raffle with replacement. As was added a tree, were kept those drawn previously. The volumetric model used was Schumacher and Hall. The definition of proper sampling intensity was obtained through the following criteria: standard error of estimate (S_{yx}), coefficient of variation ($CV\%$), graphical analysis of waste, bias (B) and root square of the mean error ($RQEM\%$). The values of S_{yx} , $CV\%$, B and $RQEM\%$ had higher dispersions for smaller sample intensities in diameter class; this indicates that it is not recommended to perform cubing few trees by diameter class. Although the setting of quality statistics (S_{yx} and $CV\%$), had satisfactory values, it was found through the analysis of residues that the estimates were biased due to the occurrence of heteroscedasticity. However, B and $RQEM\%$ statistics indicate possible to be used, at least six trees per diameter class, in order to obtain unbiased estimates of individual volume, considering the model of Schumacher and Hall.

Key-words: Adjustment; Diameter classes; Schumacher & Hall.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 Cubagem Rigorosa.....	2
2.2 Modelos Volumétricos	3
2.3 Teorema do Limite Central	4
3. MATERIAIS E MÉTODOS	5
3.1 Caracterização da área.....	5
3.2 Cubagem Rigorosa.....	5
3.3 Procedimento do estudo	6
3.3.1 Simulações da amostragem	6
3.3.2 Ajuste e avaliação das equações.....	6
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	7
5. CONCLUSÃO	13
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Número de árvores cubadas por classe de diâmetro, em povoamento de eucalipto, no espaçamento de 3,0 x 3,0 m, em Minas Gerais.....5
- Figura 2:** Posições de medições dos diâmetros das seções em porcentagens relativas à altura total da árvore para a cubagem rigorosa.....5
- Figura 3:** Erro padrão da estimativa (a) e coeficiente de variação (b) de estimativas de volume individual para diferentes intensidades amostrais por classe de *dap*, em povoamento de eucalipto, com espaçamento inicial de 3,0 x 3,0 m, em Minas Gerais..... 7
- Figura 4:** Resíduos absolutos em função do diâmetro a 1,30 m (*dap*), em povoamento de eucalipto, com espaçamento inicial de 3,0 x 3,0 m, em Minas Gerais. (N = intensidade amostral por classe de diâmetro).....9
- Figura 5:** Resíduos absolutos em função da altura total, em povoamento de eucalipto, com espaçamento inicial de 3,0 x 3,0 m, em Minas Gerais. (N = intensidade amostral por classe de diâmetro).....10
- Figura 6:** Histogramas dos resíduos absolutos considerando o menor coeficiente de variação (*CV%*), em povoamento de eucalipto, com espaçamento inicial de 3,0 x 3,0 m. (N = intensidade amostral por classe de diâmetro).....11
- Figura 7:** Histogramas dos resíduos absolutos considerando o maior coeficiente de variação (*CV%*), em povoamento de eucalipto, com espaçamento inicial de 3,0 x 3,0 m. (N = intensidade amostral por classe de diâmetro).....12
- Figura 8:** Bias (a) e raiz quadrada do erro médio (RQEM%) (b) de estimativas de volume para diferentes intensidades amostrais por classe de *dap*, em povoamento de eucalipto, com espaçamento inicial de 3,0 x 3,0 m, em Minas Gerais.....13

1. INTRODUÇÃO

O volume é uma variável importante no planejamento florestal. Frequentemente, as decisões são baseadas no estoque de colheita, levando em conta o volume por unidade de área. Contudo, as ferramentas analíticas tradicionais, requer antes disso, que seja estimado o volume individual de cada indivíduo na unidade de amostra. Leal *et al.* (2015) ressaltam a importância das estimativas de volume no planejamento e no monitoramento do crescimento e da produtividade de plantios comerciais. A determinação do volume tem sido feita por meio de técnicas de cubagem rigorosa; o volume, nesse caso, consistirá a variável dependente nos modelos volumétricos.

Apesar da consolidação das técnicas de cubagem, questões referentes ao planejamento, como o número ótimo de árvores necessárias a serem cubadas, ainda carecem de informações. Números elevados de árvores tornam o procedimento inviável operacionalmente e financeiramente, por outro lado, poucas árvores amostradas resultam em equações pouco precisas na estimativa (GUIMARÃES e LEITE, 1996). Para floresta equiânea Scolforo e Thiersch (2004) indicam um número mínimo de árvores a serem cubadas, de acordo com a amplitude das classes diamétrica; são recomendadas de 4 a 5 árvores, caso seja utilizada amplitude de classe de 2,0 cm, 5 a 7 árvores, se a amplitude for de 3,0 cm e 8 a 10 árvores, por classe de diâmetro, se a amplitude for 5,0 cm.

Contudo, nem sempre este número de árvore garante confiabilidade das estimativas de volume, sendo necessário identificar o número ótimo de árvores cubadas, por classe de diâmetro, que possibilite estimativas precisas de volume. Mesmo sendo as estimativas de ajustes bons indicadores para a escolha do melhor modelo, considera-se indispensável para a escolha em questão, a análise gráfica de resíduos (MACHADO *et al.*, 2005). PEREZ (2001) afirma que o coeficiente de determinação ajustado e o erro padrão dos resíduos não devem ser utilizados isoladamente para o julgamento da precisão do modelo, pois podem fornecer informações enganosas sobre o ajuste, sendo recomendado completá-las por meio da análise dos resíduos. Esta análise é decisiva na avaliação da qualidade das estimativas, pois permite detectar se há ou não tendenciosidade na estimativa da variável dependente ao longo de toda a linha de regressão.

Em todo processo de amostragem, a precisão e o custo são duas variáveis que apresentam uma relação estreita, na qual a alteração em uma resulta automaticamente em uma resposta da outra (PÉLLICO NETTO e BRENA, 1997). Normalmente, os custos aumentam com o grau de detalhamento, precisão requerida, eficiência na obtenção das variáveis, entre outras informações (DRUSZCZ *et al.*, 2012). Portanto, a redução da intensidade amostral para procedimentos de cubagem sem que esta comprometa o ajuste de equações volumétricas pode propiciar significativa redução de custos para as empresas. Desta forma, torna-se importante avaliar a qualidade das equações ajustadas considerando diferentes intensidades amostrais por classe de diâmetro, a fim de definir aquela que garanta precisão na estimativa do volume e ao mesmo tempo não aumente os custos.

Deste modo, as hipóteses a serem avaliadas foram:

H₀₁: A precisão da equação volumétrica está associada à intensidade amostral da cubagem rigorosa.

H₀₂: As distribuições dos resíduos das estimativas de volume dependem da intensidade amostral da cubagem rigorosa.

O objetivo deste estudo consistiu-se em determinar o número de árvores a serem cubadas por classe de diâmetro, a fim de garantir melhor precisão da equação volumétrica.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cubagem Rigorosa

O tronco de uma árvore se assemelha a determinados sólidos geométricos; a base se assemelha a um neilóide, a porção intermediária a uma parabolóide e a extremidade final, a um cone (AVERY e BURKHART, 1997; SCOLFORO e FIGUEIREDO FILHO, 1993). Em consequência à dificuldade da definição exata de onde inicia e onde termina na árvore a porção de madeira semelhante ao sólido geométrico, foram desenvolvidas metodologias para a realização da cubagem rigorosa das árvores (SCOLFORO e THIERSCH, 2004).

A cubagem rigorosa consiste na divisão do fuste em seções menores, na qual são medidos os diâmetros em várias posições do fuste; o volume total é obtido a partir da soma do volume de cada seção. O comprimento das seções pode ser obtido de forma absoluta ou relativa à altura total da árvore. Os métodos absolutos são aqueles em que o comprimento da seção não tem vínculo com o comprimento total da árvore; nos métodos relativos, o comprimento da seção representa um percentual do comprimento total da árvore, permitindo a comparação dos volumes individuais de árvores de tamanhos diferentes, porém com a mesma forma (CABACINHA, 2003).

Nos métodos absolutos as principais fórmulas empregadas na obtenção do volume individual são a de Smalian, a de Huber e a de Newton, considerando que estas são válidas quando as seções assemelham-se a um tronco de parabolóide de revolução (THIERSCH, 2002). Machado e Figueiredo Filho (2009) também apontam estes três métodos como os que têm sido empregados no setor florestal, de um modo geral, principalmente pela facilidade de uso que os mesmos apresentam.

A cubagem rigorosa pelo método de Smalian consiste na medição dos diâmetros nas extremidades de cada seção do tronco, em Huber a medição é feita na metade da seção da tora e em Newton, os diâmetros ou circunferências devem ser medidos em três posições ao longo de cada seção da tora, nas extremidades inferior e superior, e no meio da seção, resultando em volume mais exato (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2009). Desse modo, estes métodos se diferem em relação à posição em que se efetuam as medições dos diâmetros das seções ao longo do fuste para o cálculo do volume de cada seção.

O método de Newton se destaca pela precisão proporcionada na determinação volumétrica, uma vez que se exige um maior número de medições de diâmetros numa determinada seção do tronco (CAMPOS *et al.*, 1985). MIRANDA *et al.* (2013) afirmam que, do ponto de vista prático, o método de Huber é o mais rápido para mensuração, pois necessita de apenas uma mensuração no meio da tora, aumentando desta forma o rendimento do trabalho e reduzindo os custos gastos com a mensuração. Porém, de acordo com estes mesmos autores, se as toras estiverem empilhadas, o método de Huber se torna mais trabalhoso e muitas vezes impraticável, sendo nestes casos, o método mais indicado o de Smalian, com mensurações apenas nas extremidades das toras.

A fórmula de Newton é exata para todas as formas consideradas, enquanto Smalian e Huber apresentam desempenho satisfatório quando a seção é um parabolóide (HUSCH *et al.*, 2003). Estudos como o de Schreuder *et al.* (1993) demonstram que a fórmula de Huber deveria realmente ser usada em qualquer circunstância o que acarretaria uma redução no esforço de amostragem e conseqüentemente em um menor custo. Entretanto, Machado e Figueiredo Filho (2009) afirmam que a fórmula de Smalian tem sido tradicionalmente mais usada nos levantamentos florestais, normalmente empregando-se seções curtas até 2 metros

de altura e seções de 1 ou 2 metros no restante do tronco, mais pela praticidade de emprego que por questões de acuracidade.

Como métodos relativos, Scolforo e Thiersch (2004) citaram o de Hohenadl e o da FAO (Food and Agriculture Organization). O método de Hohenadl é caracterizado pela divisão do tronco em cinco, dez ou mais seções de iguais comprimentos, que são estabelecidos em função da altura (h), sendo o volume calculado por apenas uma medida de diâmetro e circunferência no centro de cada seção como em Huber (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2009). O método da FAO surgiu mediante a necessidade de amostrar melhor a porção basal do fuste onde a variação de forma é maior, ao se aplicar o método de Hohenadl. Assim são medidas mais duas seções na base, nas alturas de 1/6 e 5/6 da primeira seção (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2009).

Independente do método a se aplicar, antes de definir o número de árvores que serão cubadas, é necessário ter informações acerca da distribuição diamétrica da população considerada (SCOLFORO e THIERSCH, 2004), uma vez que para garantir melhor precisão da equação volumétrica, deve-se amostrar indivíduos em cada classe diamétrica. A divisão em classes de diâmetros teve a finalidade de agrupar árvores com as mesmas características de fuste, em se tratando de diâmetro, visando diminuir a amplitude volumétrica das classes, a fim de obter coeficientes de melhor precisão com a mesma quantidade de dados coletados (LOUREIRO *et al.*, 2012).

O número de árvores amostradas em cada classe de diâmetro dependerá da amplitude das mesmas, assim, quanto maior a variabilidade do diâmetro ou quanto maior a amplitude entre o maior e o menor diâmetro, maior deve ser o número de árvores cubadas rigorosamente (SCOLFORO e THIERSCH, 2004). Contudo, é necessário identificar um número ótimo de árvores cubadas, por classe de diâmetro, que possibilite estimativas precisas de volume. Deve-se ressaltar que número elevado de árvores torna o procedimento inviável operacionalmente e financeiramente, por outro lado, poucas árvores amostradas resultam em equações pouco precisas na estimativa (GUIMARÃES e LEITE, 1996).

O tamanho da amostra na cubagem irá afetar diretamente nos custos operacionais das empresas, sendo mais caros quanto maior a unidade amostral. Binoti *et al.* (2013) apresentam custo médio de, aproximadamente R\$ 24,00 referentes à coleta de dados para cubagem de povoamentos de clone de eucalipto, com idade entre 21 a 114 meses, diâmetro a 1,30 m (dap) entre 5,1 a 28,3 cm e altura total (ht) entre 7,7 m e 36 m, localizado no Sul da Bahia.

2.2 Modelos Volumétricos

A análise de dados de volume é fundamental em manejo florestal, sendo a variável mais utilizada na comercialização de madeira. Por meio do volume é possível conhecer todo potencial madeireiro disponível em um povoamento florestal, haja vista que o volume individual fornece subsídios para a avaliação do estoque de madeira e análise do potencial produtivo da floresta (THOMAS *et al.*, 2006).

A partir do volume individual das árvores, advindo do processo de cubagem rigorosa, é possível, então, ajustar modelos volumétricos que relacionam a variável dependente volume (v) com as variáveis independentes DAP e HT . Estes modelos podem ser classificados em locais ou regionais. Os modelos locais ou de simples entrada são aqueles que relacionam o volume somente em função do dap . Por sua vez, os modelos regionais ou de dupla entrada, relacionam o volume em função das variáveis DAP e HT . Estes são aplicados para povoamentos em que há maior heterogeneidade no desenvolvimento da altura das árvores com mesmo diâmetro (SCOLFORO, 1988).

Entre os vários modelos existentes para expressar o volume de madeira em função do diâmetro e da altura, o modelo de Schumacher e Hall (1933) na forma logarítmica é um dos mais difundidos na área florestal, devido às suas propriedades estatísticas, uma vez que resulta em estimativas quase sempre não tendenciosas (CAMPOS e LEITE, 2013). Como pode ser visto nos trabalhos de Azevedo *et al.* (2011a); Santos *et al.* (2010); Colpini *et al.* (2009); Rolim *et al.* (2006); Silva *et al.* (1997), na qual a equação de Schumacher & Hall apresentou a melhor eficiência e precisão para estimar o volume em função do diâmetro e da altura total das árvores.

O emprego de modelos volumétricos constitui o procedimento mais eficiente para a quantificação de volume de um povoamento florestal (GUIMARÃES e LEITE, 1996). No entanto, apesar da eficiência de alguns modelos, estes nem sempre se ajustam a todas as espécies e condições específicas dos locais de cultivo, sendo recomendável testá-los por meio das estatísticas de ajuste e precisão adequada e identificar o melhor para cada peculiaridade (SILVESTRE *et al.*, 2014). Portanto, para seleção do melhor modelo devem ser observados critérios estatísticos como Coeficiente de determinação ajustado (\bar{R}^2), Erro padrão residual (S_{yx}), Coeficiente de variação (CV%), análise gráfica dos resíduos, Bias (tendências) e raiz quadrada do erro médio (RQEM%).

O \bar{R}^2 indica o quanto a variação da variável dependente é explicada pela regressão, com seu valor variando de 0 a 100% e quanto mais próximo de 100% mais eficiente é a equação ajustada. O S_{yx} expressa o quanto, em termos médios, os valores observados variam em relação aos estimados, ou seja, mede os desvios da regressão. O CV% representa a variabilidade dos dados em relação à média, varia entre 0 e 100% e quanto maior o tamanho da amostra, menor seu valor, melhor o ajuste.

A análise gráfica dos resíduos é decisiva na avaliação da qualidade das estimativas, pois permite detectar se há ou não tendenciosidade na estimativa da variável dependente ao longo de toda a linha de regressão, permitindo a tomada de decisão quanto à utilização ou não do modelo (RUFINI *et al.*, 2010). Gaziri (2014) afirma que ainda que as estimativas de ajuste de precisão apresentem valores aceitáveis a análise gráfica dos resíduos em um ajuste de regressão é determinante como critério de escolha de um modelo.

O índice BIAS expressa o desvio médio dos valores estimados em relação aos valores observados, indicando assim a tendência do modelo em superestimar ou subestimar os valores estimados e, portanto, quanto mais próximo de zero essa estatística, menor é a magnitude do erro sistemático do modelo (LEITE e ANDRADE, 2002) e quanto menores as estimativas de Bias mais confiável é o modelo ajustado (CAMPOS e LEITE, 2013).

Portanto, como afirmam Campos *et al.* (1985), a importância da análise e da seleção das equações de volume é ressaltada, principalmente, pela observação de qualquer erro de tendência, na estimativa do volume por árvore, que irá refletir na estimativa da população, causando uma sub ou superestimativa da produção, deste modo, essa análise deve ser uma das primeiras tarefas a serem realizadas no que se refere à seleção de equações que forneçam estimativas precisas e sem tendências.

2.3 Teorema do Limite Central

Um problema frequente em muitos estudos é a intensidade amostral, mais precisamente no ponto de suficiência amostral. Para suprir a falha, diversas soluções são encontradas, dentre elas a de captar a estimativa da suficiência amostral pelo método da regressão linear, auxiliada pelo teorema do limite central (GOMIDE *et al.*, 2005).

O Teorema do Limite Central garante que a distribuição da média amostral tende para uma distribuição normal à medida que o tamanho da amostra tende para o infinito, ou seja, quando o tamanho da amostra é suficientemente grande ($n \geq 30$) (CARBONARI *et al.*, 2007).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização dos dados

Os dados utilizados, no presente estudo, foram fornecidos por uma empresa do setor florestal do estado de Minas Gerais, a partir de povoamento de clones de *Eucalyptus*, com idade de aproximadamente sete anos, estabelecidos sob espaçamento inicial de 3,0 x 3,0 m, e conduzidos sob o regime de alto fuste. Os dados foram obtidos por meio da cubagem rigorosa de 453 árvores, distribuídas em oito classes diamétricas, com amplitude de 2,5 cm (Figura 1).

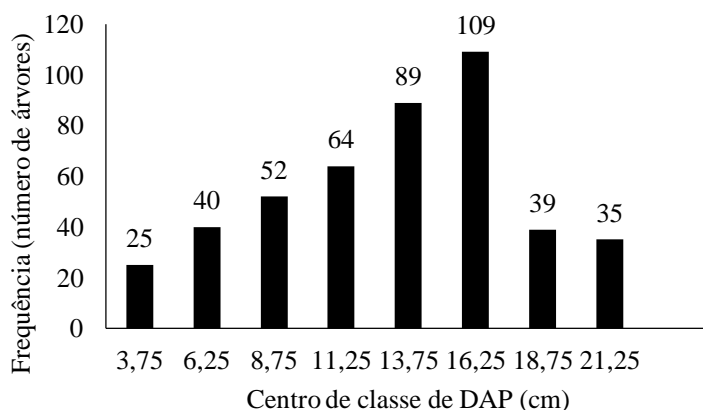


Figura 1: Número de árvores cubadas por classe de diâmetro, em povoamento de eucalipto, no espaçamento de 3,0 x 3,0 m, em Minas Gerais.

3.2 Cubagem Rigorosa

A cubagem rigorosa foi realizada a partir de medições no fuste considerando as posições relativas à altura total (Figura 1). O volume das seções foi obtido por meio do método de Smalian (REIS, 2015).

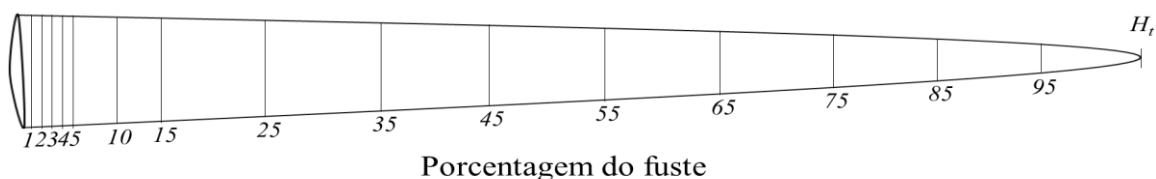


Figura 2: Posições de medições dos diâmetros das seções em porcentagens relativas à altura total da árvore para a cubagem rigorosa.

3.3 Procedimento do estudo

3.3.1 Simulações da amostragem

Foi utilizada intensidade amostral (N) variando de 1 a 10 árvores, por classe de diâmetro a 1,30 m (dap). Em cada N realizaram-se 30 simulações, levando em conta o teorema do limite central. O sorteio das árvores foi realizado por meio da amostragem com reposição, mas ao aumentar N a(s) árvore (s) sorteada (s) anteriormente era (m) mantida (s) no ajuste do modelo volumétrico.

3.3.2 Ajuste e avaliação das equações

Para analisar se a precisão da equação volumétrica está associada à intensidade amostral da cubagem rigorosa, para cada N e cada simulação, foi ajustado o modelo de Schumacher e Hall (1933) linearizado (1).

$$\ln V_i = \beta_0 + \beta_1 \ln dap_i + \beta_2 \ln ht_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

Em que:

- \ln = logaritmo neperiano;
- V_i = volume estimado (m^3);
- dap_i = diâmetro à altura de 1,30 m observado (cm);
- ht_i = altura total observada (m);
- β_i = parâmetros a serem estimados;
- ε_i = erro da estimativa.

A definição da intensidade amostral (N) adequada para a cubagem rigorosa foi realizada por meio dos seguintes critérios estatísticos:

- a) Erro padrão da estimativa (S_{yx}):

$$S_{yx} = \pm \sqrt{QM_{Residuo}}$$

- b) Coeficiente de variação ($CV\%$):

$$CV\% = \pm \frac{S_{yx}}{\bar{y}} \cdot 100$$

- c) Análise gráfica dos resíduos absolutos ($e_i = \hat{y}_i - y_i$):

Realizada por meio dos gráficos de dispersão, em função do dap e ht , e histograma, para verificação dos pressupostos da regressão, como a homogeneidade da variância e a distribuição normal. Como para cada N foram realizadas 30 simulações, em cada N , agrupou-se os resíduos de todas as simulações em um único gráfico.

d) Bias (B):

$$B = n^{-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)$$

e) Raiz quadrada do erro médio ($RQEM\%$):

$$RQEM\% = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}}{\bar{y}} * 100$$

Em que:

$QM_{Residuo}$ = quadrado médio do resíduo.

y_i = volume observado (m^3).

\bar{y} = média dos volumes observados.

\hat{y}_i = volume estimado pelo modelo (m^3).

n = número de observações.

Todas essas estatísticas foram obtidas para as 30 simulações em cada intensidade amostral e a partir das melhores estatísticas determinou-se a intensidade amostral adequada. As análises foram realizadas utilizando o Microsoft Excel[®].

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O erro padrão da estimativa (S_{yx}) e o coeficiente de variação (CV) para as estimativas de volume ($m^3 \text{ árvore}^{-1}$), em função do número de árvores por classe de diâmetro (dap), estão indicados na Figura 2. O S_{yx} e o CV apresentaram o mesmo comportamento em função da intensidade amostral; houve maior dispersão desses valores para as menores intensidades amostrais.

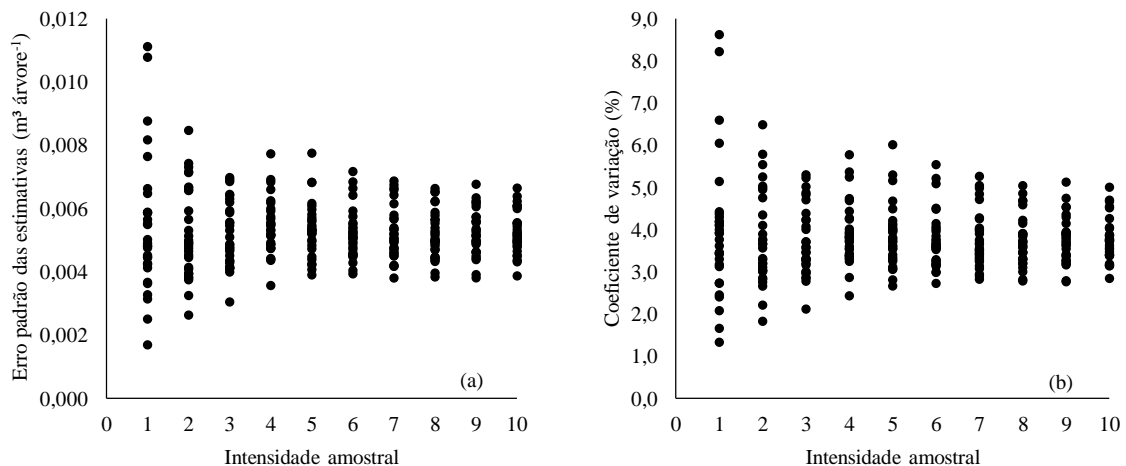


Figura 3: Erro padrão da estimativa (a) e coeficiente de variação (b) de estimativas de volume individual para diferentes intensidades amostrais por classe de dap , em povoamento de eucalipto, com espaçamento inicial de 3,0 x 3,0 m, em Minas Gerais.

As maiores variações das estimativas de volume da população, para o modelo volumétrico, encontram-se quando se considera uma árvore por classe de diâmetro, com *CV* variando entre 1,32 a 8,62%. Isso demonstra que poucas árvores cubadas, por classe de diâmetro, apresentam grande variabilidade na qualidade de ajuste, não sendo indicadas para estimativa de volume individual.

O coeficiente de variação tem sido indicador frequentemente utilizado na definição da intensidade amostral ótima, quando considerado tamanho e forma das unidades amostrais. Estudos que visam definir a intensidade amostral da cubagem rigorosa utilizando *CV* são mais restritos. Para estes destaca-se o trabalho de Leal *et al.* (2015), na qual obtiveram *CV* de 3,8%, utilizando oito árvores por classe de diâmetro. No entanto, no presente estudo, a partir de seis árvores por classe de diâmetro a média de *CV* foi 3,75%, indicando assim uma redução de no mínimo duas árvores cubadas, por classe de diâmetro e conseqüentemente uma redução de custos dessa operação.

O procedimento da cubagem rigorosa por classe diamétrica indica melhor representatividade das árvores cubadas, o que pode reduzir o coeficiente de variação. Neste estudo, em todas as simulações o *CV* foi inferior a 10%, mesmo para menor intensidade amostral (Figura 2b). Resultados semelhantes ao deste trabalho foram encontrados por Loureiro *et al.* (2012) e Azevedo *et al.* (2011), que ao ajustarem diferentes modelos volumétricos por classe diamétrica para povoamento de *Eucalyptus*, encontram valores de *CV* menor ou igual a 10% para o modelo de Schumacher e Hall

As análises das medidas de precisão de forma isolada não garantem uma conclusão satisfatória sobre o desempenho do modelo, assim fez-se necessária para uma melhor avaliação da qualidade deste, a análise de outros parâmetros, como a análise gráfica da dispersão dos resíduos, que permite verificar graficamente pressupostos da regressão, como a homogeneidade da variância e a distribuição normal.

As dispersões gráficas dos resíduos em função do *dap* e da altura total (*ht*) estão representadas na figura 4 e 5. Verificou-se que em todas as intensidades amostrais, os resíduos aumentam à medida que os valores de *dap* (Figura 4) e *ht* (Figura 5) aumentam, indicando nesses casos, a ocorrência da heterocedasticidade. Campos e Leite (2013) destacam que em casos de heterocedasticidade é necessário realizar medidas corretivas, como a troca de modelo ou a transformação logarítmica da variável dependente.

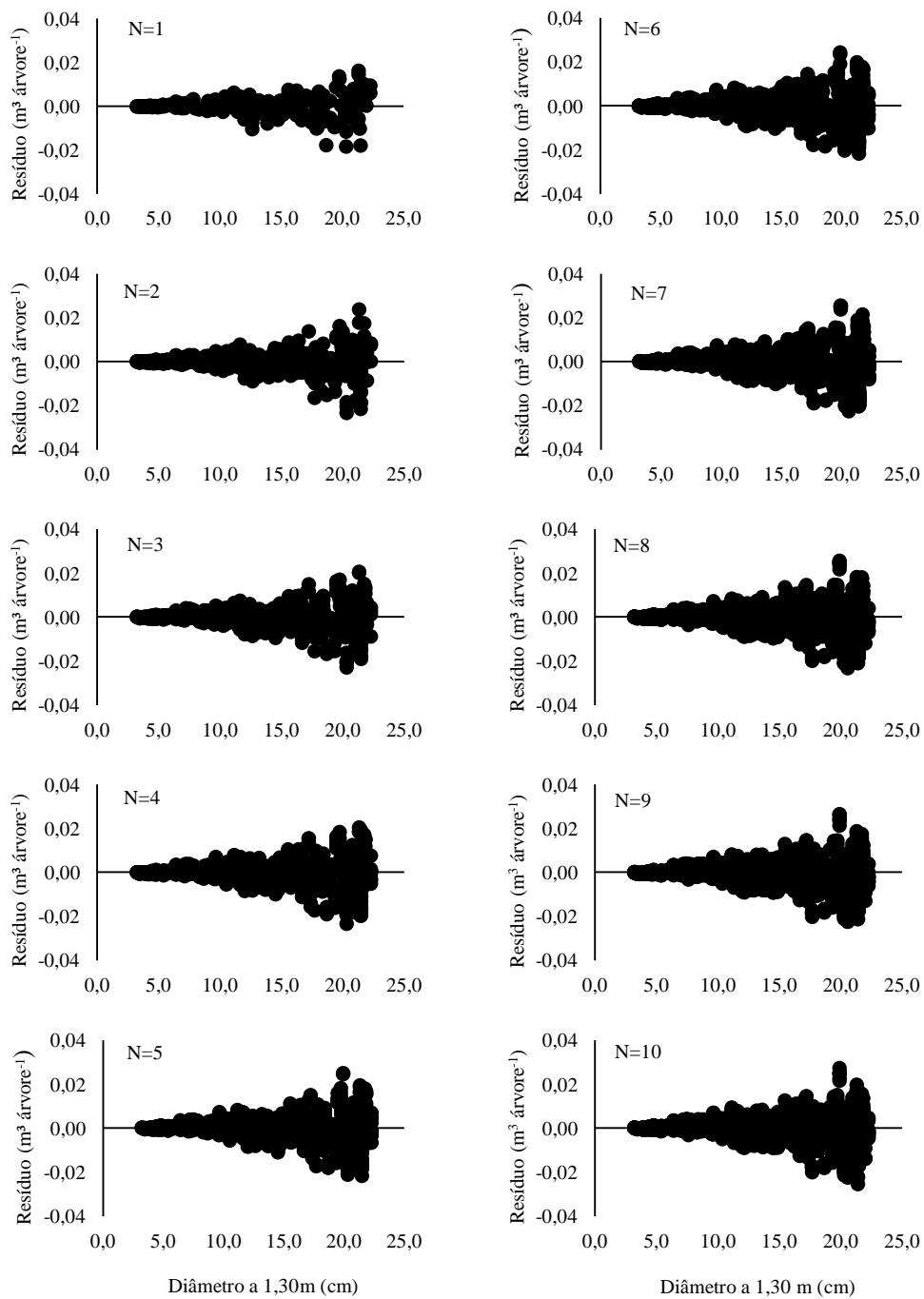


Figura 4: Resíduos absolutos em função do diâmetro a 1,30 m (*dap*), em povoamento de eucalipto, com espaçamento inicial de 3,0 x 3,0 m, em Minas Gerais. (N = intensidade amostral por classe de diâmetro).

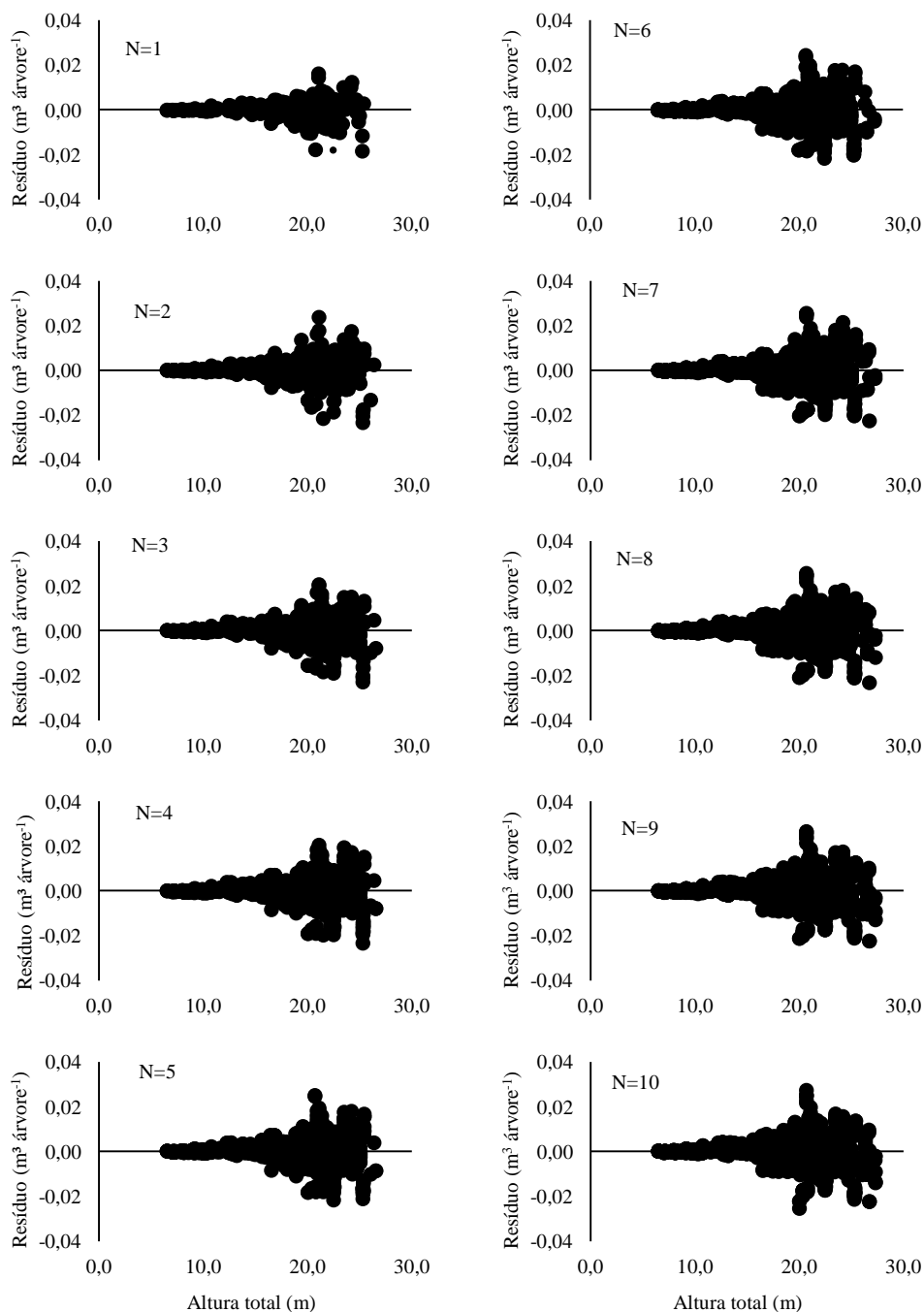


Figura 5: Resíduos absolutos em função da altura total, em povoamento de eucalipto, com espaçamento inicial de 3,0 x 3,0 m, em Minas Gerais. (N = intensidade amostral por classe de diâmetro).

A pressuposição de normalidade foi verificada através do histograma de frequência dos resíduos absolutos (Figura 6 e 7), considerando para cada intensidade amostral, o menor (Figura 6) e o maior (Figura 7) coeficiente de variação. Para os menores coeficientes de variação os histogramas tiveram distribuições mais próximas de zero, distribuição normal,

enquanto que as maiores probabilidades proporcionam distribuições mais dispersas, com curtose diferente da normal.

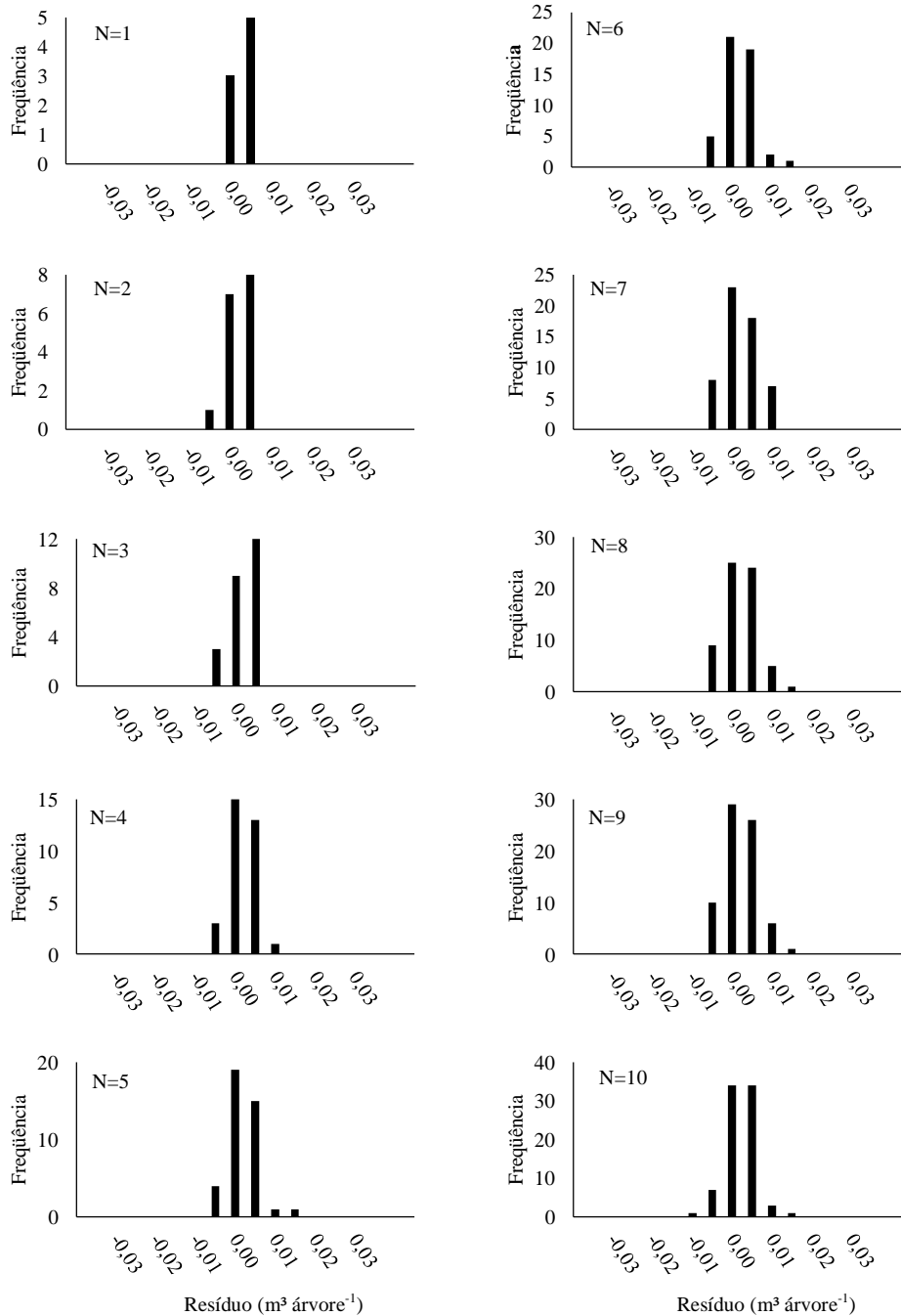


Figura 6: Histogramas dos resíduos absolutos considerando o menor coeficiente de variação ($CV\%$), em um povoamento de eucalipto, com espaçamento inicial de 3,0 x 3,0 m. (N = intensidade amostral por classe de diâmetro).

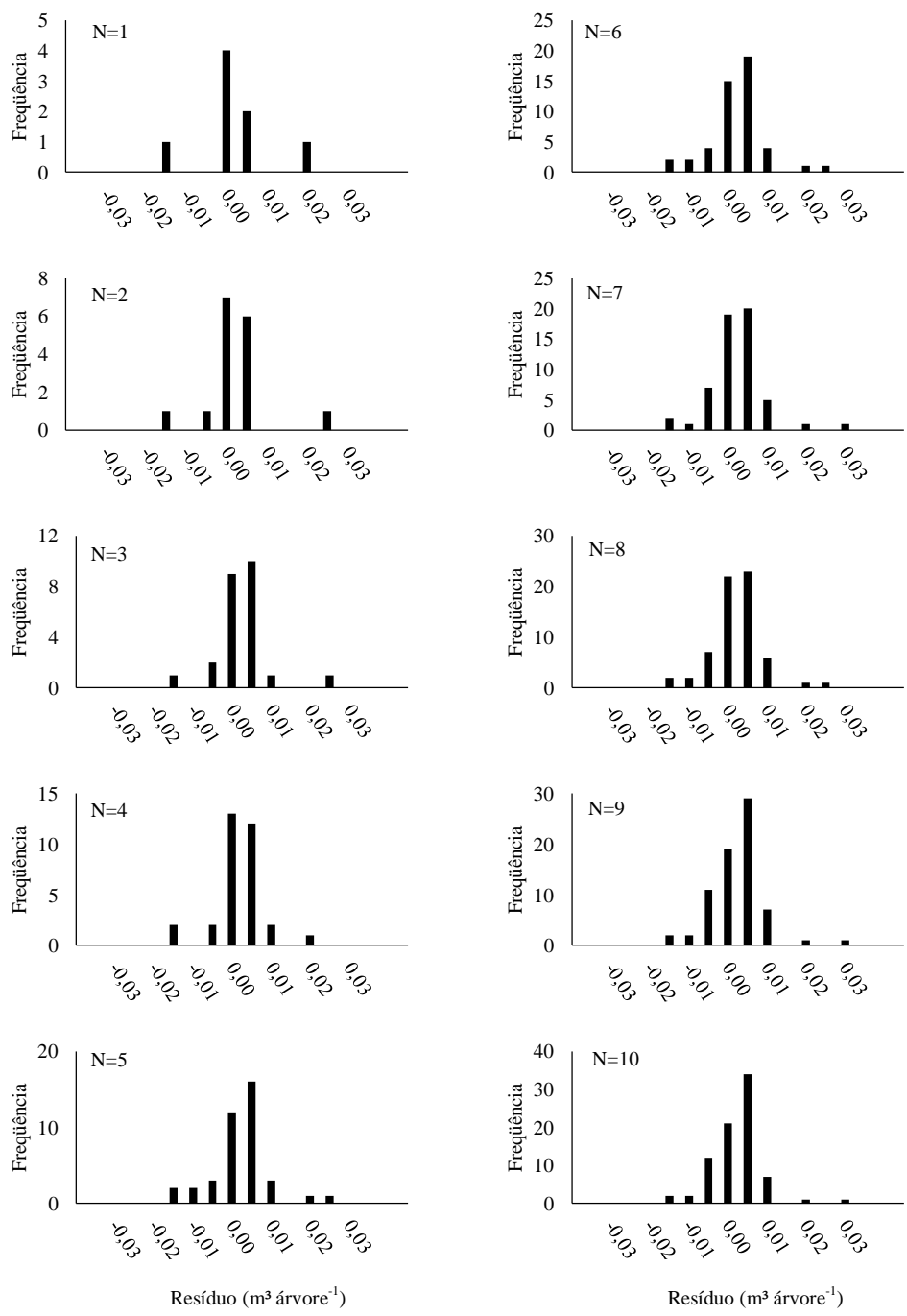


Figura 7: Histogramas dos resíduos absolutos considerando o maior coeficiente de variação ($CV\%$), em povoamento de eucalipto, com espaçamento inicial de 3,0 x 3,0 m. (N = intensidade amostral por classe de diâmetro).

Para complementar a análise gráfica de resíduos foram obtidas as estatísticas *bias* (Figura 8a) e raiz quadrada do erro médio ($RQEM\%$) (Figura 8b). As estimativas para *Bias* e $RQEM\%$ seguiram o mesmo comportamento que o erro padrão da estimativa e o coeficiente de variação, apresentando as maiores variações nas estimativas de volume quando se utilizam

menos árvores por classe de *dap* para o ajuste do modelo volumétrico e menor variação a partir de seis árvores por classe de diâmetro.

Scolforo e Thiersch (2004) recomendam, para floresta equiânea, a cubagem rigorosa de 4 a 5 árvores por classe de *dap*, para classes com amplitude de 2,0 cm, e a cubagem de 5 a 7 árvores por classe de *dap* para amplitude de 3,0 cm. Porém, de acordo com o presente estudo, a fim de garantir melhor precisão do ajuste da equação volumétrica, considerando o modelo de Schumacher e Hall e amplitude de classes de 2,5 cm, recomenda-se a utilização de seis árvores por classe de *dap*.

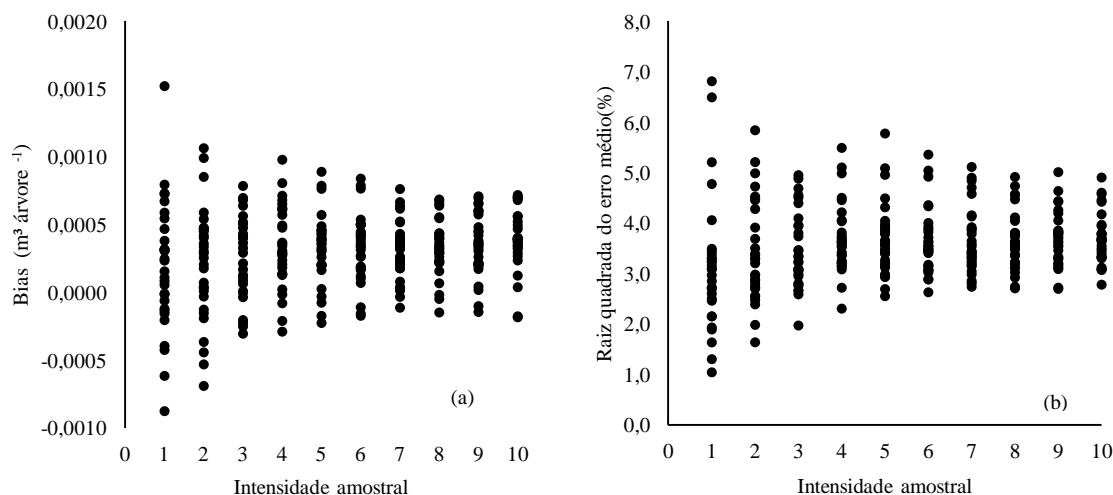


Figura 8: Biais (a) e raiz quadrada do erro médio (RQEM%) (b) de estimativas de volume para diferentes intensidades amostrais por classe de *dap*, em povoamento de eucalipto, com espaçamento inicial de 3,0 x 3,0 m, em Minas Gerais.

5. CONCLUSÃO

A precisão da equação volumétrica está associada à intensidade amostral da cubagem rigorosa. Desta forma, para que se obtenham estimativas precisas de volume, considerando o modelo de Schumacher e Hall, um povoamento de *Eucalyptus*, com espaçamento inicial de 3,0 x 3,0 m e amplitude de classes de diâmetro de 2,5 cm, indica-se, no mínimo, a cubagem de seis árvores por classe de diâmetro.

As distribuições dos resíduos das estimativas de volume dependem da intensidade amostral da cubagem rigorosa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. **Forest measurements**. 4.ed. New York: McGrawHill, 1997. 408 p. (McGraw-Hill series in forest resources).

AZEVEDO, T. L.; MELLO, A. A.; FERREIRA, R. A.; SANQUETTA, C. R.; NAKAJIMA, N. Y. Equações hipsométricas e volumétricas para um povoamento de *Eucalyptus* sp. localizado na FLONA do Ibura, Sergipe. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 6, p. 105-112, 2011.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G.; SILVA, A. Redução dos custos em inventário de povoamentos equiâneos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 8, n. 1, p. 125-129, 2013.

CABACINHA, C. D. **Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a cubagem rigorosa**. 2003. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2013. 605 p.

CAMPOS, J. C. C.; TREVIZOL JUNIOR, T. L.; PAULA NETO, F. Ainda, sobre a seleção de equações de volume. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 9, n. 2, p. 115-126, 1985.

COLPINI, C.; TRAVAGIN, D. P.; SOARES, T. S.; SILVA, V. S. M. Determinação do volume, do fator de forma e da porcentagem de casca de árvores individuais em uma Floresta Ombrófila Aberta na região noroeste de Mato Grosso. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 39, n. 1, p. 97-104, 2009.

CARBONARI, M. E. E.; JUNIOR, B. B.; FERREIRA, L. R. R.; VENDRAMINI, C. M. M. Auto avaliação de IES- Base estatística para índices de desempenho. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, v. 2, n. 2, p. 13-20, 2007.

DRUSZCZ, J. P.; NAKAJIMA, N. Y.; PÉLLICO NETTO, S.; MACHADO, S. A. Custos de inventário florestal com amostragem de Bitterlich (PNA) e conglomerado em cruz (CC) em plantação de *Pinus taeda* L. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 94, p. 231-239, 2012.

GAZIRI, M. S. S. **Modelos alométricos e de produção para plantações de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina, Brasil**. 2014. 182 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

GOMIDE, L. R.; SCOLFORO, J. R. S.; THIERSCH, C. R.; OLIVEIRA, A. D. Uma nova abordagem para definição da suficiência amostral em fragmentos florestais nativos. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 4, p. 376-388, 2005.

GUIMARÃES, D. P.; LEITE, H. G. Influência do número de árvores na determinação de equação volumétrica para *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 50, p. 37-42, 1996.

HUSCH, B.; BEERS, T.W.; KERSHAW, JR. J. A. **Forest Mensuration**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003. 456 p.

LEAL, F. A.; CABACINHA, C. D.; CASTRO, R. V. O.; MATRICARDI, E. A. T. Amostragem de árvores de *Eucalyptus* na cubagem rigorosa para a estimativa de modelos volumétricos. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v. 33, n. 1, p. 91-103, 2015.

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, p. 321-328, 2002.

LOUREIRO, G. H., CURTO, R. D. A., ROSOT, N. C., MARANGON, G. P., VARGAS, J. F. Ajuste de modelos volumétricos por classe diamétrica e para todas as classes em *Eucalyptus grandis Hill ex Maiden*. In: CONGRESSO FLORESTAL PARANAENSE, 2012, Curitiba. **Anais...**Curitiba, 2012.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava: Unicentro, 2009. 316 p.

MACHADO, S. A.; URBANO, E.; CONCEIÇÃO, M. B. Comparação de métodos de estimativa de volume para *Pinus oocarpa* em diferentes idades e diferentes regimes de desbastes. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 50, p. 91-98, 2005.

MIRANDA, D. L. C.; AZEVEDO, F. F.; SANTOS, J. P. Determinação do volume de toras da espécie *Mezilaurus itauba* (Meissn.) Taub. **Scientia Plena**, Sergipe, v. 9, n. 8, 2013.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário Florestal**. Curitiba: UFPR, 1997. v. 1, 316 p.

PEREZ, J. F. M. **Sistema de manejo para a candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish)**. 2001. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

REIS, M. **CrITÉrios de estratificação para o planejamento da cubagem rigorosa**. 2015. 39 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.

ROLIM, S. G.; COUTO, H. T. Z.; JESUS, R. M. FRANÇA, J. T. Modelos volumétricos para a Floresta Nacional do Tapirapé-Aquirí, Serra dos Carajás (PA). **Acta Amazonica**, Manaus, v. 36, p. 107-114, 2006.

RUFINI, A. L.; SCOLFORO, J. R.; OLIVEIRA, A. D.; MELLO, J. M. Equações volumétricas para o cerrado *Sensu Stricto*, em Minas Gerais. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 1, p. 1-11, 2010.

SANTOS, C. S. A.; SILVA, J. A. A.; CORDEIRO, G. M.; GOUVEIA, J. F.; SILVA, A. O. Modelos simétricos transformados não lineares com aplicação na estimativa volumétrica em Híbrido de *Eucalyptus tereticornis* no Pólo Gesseiro do Araripe – PE. SINAPE – In:

SIMPÓSIO NACIONAL DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA, 19, Águas de São Pedro. **Anais...** Águas de São Pedro, 2010, p. 7.

SCOLFORO, J. R. S.; THIERSCH, R. **Biometria Florestal: Medição, Volumetria e Gravimetria**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004. 285 p.

SCOLFORO, J. R. S.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Mensuração florestal 2: volumetria**. Lavras: ESAL/FAEPE, 1993. 126 p.

SCOLFORO, J. R. S.; MACHADO, S.A. Curvas de índice de sítio, para plantações de *Pinus elliottii* nos estados do Paraná e Santa Catarina. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 18, n. 112, p. 140-158, 1988.

SCHREUDER, H. T.; GREGOIRE, T. G; e WOOD, G. B. **Sampling methods for multire source forest inventory**. Jonh Wiley & Sons, Inc. New York, 1993. 446 p.

SILVA, G. F.; CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L. Uso de métodos estatísticos para comparar alternativas de estimação do volume comercial. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 21, n. 1, p. 99-111, 1997.

SILVESTRE, R.; BONAZZA, M.; STANG, M.; LIMA, G. C. P.; KOEPEL, D. A.; MARCO, F. T.; CIARNOSCHI, L. D.; MORES, D. F. Equações volumétricas em povoamentos de *Pinus taeda* no município de Lages-SC. **Nativa**, Sinop, v. 2, n. 1, p. 1-5, 2014.

THIERSCH, C. R. **Modelagem da densidade básica, do volume e do peso seco para plantios de clones de *Eucalyptus spp.*** 2002. 197 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, MG.

THOMAS, C.; ANDRADE, C. M.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Comparação de equações volumétricas ajustadas com dados de cubagem e análise do tronco. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 3, p. 319-327, 2006.