

Avaliação do método da similaridade de perfis na estimação do volume de árvores

Evaluation of the method of similarity of profiles in the estimation of tree volume

Leonidas Soares Murta Júnior¹, Marcio Leles Romarco de Oliveira²,
Gilciano Saraiva Nogueira², Hélio Garcia Leite³,
Renato Vinícius Oliveira Castro⁴ e Christovão Pereira Abrahão²**Resumo**

O objetivo deste trabalho foi avaliar o método da similaridade de perfis utilizando diferentes procedimentos para determinar o volume individual de árvores. Os dados utilizados foram de 3.620 árvores cubadas, divididas em 62 estratos. Os estratos com idades inferiores a quatro anos foram considerados como sem equação definida. As variáveis mensuradas foram *DAP*, altura total, e os diâmetros ao longo do fuste nas posições de 0,00; 0,50; 1,00; 1,50 e 2,00 m e, a partir daí, as seções foram medidas de 2,0 em 2,0 m, até a altura total. Ajustou-se o modelo volumétrico de Schumacher e Hall para cada estrato e o modelo de afilamento proposto por Kozak para cada árvore. A Distância Euclidiana foi utilizada para encontrar as árvores com parâmetros mais similares àqueles já estimados nos modelos de afilamento dos estratos sem equação definida. Para a estimação dos parâmetros do modelo de afilamento dos estratos sem equação definida foram testadas duas metodologias. A primeira consistiu no ajuste do modelo de afilamento com três árvores de cada estrato (uma pequena, uma média e uma grande) e na segunda utilizou-se os parâmetros da árvore mais próxima ao diâmetro médio. Para determinação da equação volumétrica foram testados três métodos (equação do estrato mais similar, equação das 30 árvores mais similares e equação gerada com o número de árvores referentes a 5 árvores por classe de diâmetro do estrato sem equação definida), que combinados configuraram os cinco procedimentos testados. As estatísticas utilizadas para verificar a qualidade das estimativas foram viés, raiz quadrada do erro médio, correlação e análise gráfica de resíduos. Os resultados indicaram que o método de estimação dos parâmetros do modelo de afilamento dos estratos sem equação definida utilizando três árvores (pequena, média e grande), combinado com o método de geração da equação volumétrica baseada nas 30 árvores mais similares, proporcionaram as melhores estimativas de volume para os estratos que não tinham uma equação definida.

Palavras-chave: Inventário florestal, equação volumétrica, Distância Euclidiana.

Abstract

The aim of this study was to evaluate the similarity profiles method using different procedures to determine individual tree volume. 3,620 trees were cubed and divided into 62 groups. The group with trees at least four years old was considered as the undefined equation group. The variables measured were DBH, total height, and diameter along the stem at positions of 0.00, 0.50, 1.00, 1.50 and 2.00 meters and, after this height, the sections were measured 2.0 at 2.0 meters up to the total height. The Schumacher and Hall model was fitted for each group and the taper model proposed by Kozak was adjusted to each tree. The Euclidean distance was used to select trees with parameters more similar to the estimated parameters of taper models of the group without a defined equation. To estimate the parameters of the taper model for the undefined equation group, two methodologies were tested. The first consisted in adjusting the taper model with three trees in each group (a small tree, an average tree and a large tree) and second used the parameters of a tree whose diameter was the nearest to the mean group diameter. To determine the volumetric equation three methods were tested (equation of the most similar group, equation of 30 more similar trees and equation generated from the number of trees referring to 5 trees per diameter class of the undefined equation group), which, when combined gave the five tested procedures. The statistics used to check the quality of the estimates were bias, root mean square error, correlation coefficient and residual

¹Doutorando em Ciências Florestais. UNB – Universidade de Brasília / Faculdade de Tecnologia. Campus Universitário Darcy Ribeiro, s/n - Asa Norte – CEP: 70910-900 - Brasília – DF. E-mail: murtaengflo@gmail.com.

²Professor do Departamento de Engenharia Florestal. UFVJM - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Faculdade de Ciências Agrárias. Campus II - Rodovia MG-367 - Km 583 - Alto da Jacuba – CEP: 39100-000 - Diamantina, MG. E-mail: marcioromarco@gmail.com; nogueirags@gmail.com; cabrahao@gmail.com.

³Professor do Departamento de Engenharia Florestal. UFV - Universidade Federal de Viçosa – Campus Universitário - CEP:36570-000 – Viçosa, MG. E-mail: hgleite@gmail.com.

⁴Professor Adjunto do Departamento de Ciências Agrárias. UFSJ - Universidade Federal De São João Del Rei. MG 424 KM 47 – CEP: 35701-970 – Sete Lagoas, MG. E-mail: castrovo@ymail.com.

graphic analysis. The results indicated that the method of parameters estimation of the taper model of the undefined equation group using three trees (a small tree, an average tree and a large tree), combined with the method of generating the volumetric equation based on 30 most similar trees provided the best estimates of volume to the group without a specific equation.

Keywords: Forest inventory, volumetric equation, Euclidean Distance.

INTRODUÇÃO

Para se estimar o volume de árvores individuais são empregadas equações de volume ou de afilamento de fuste (*taper*), que dependem de dados de cubagem para serem geradas. Em termos de amostragem para geração de equações volumétricas de florestas plantadas, Campos e Leite (2013) recomendam que deve ser feita preferencialmente por espécie, espaçamento, idade e regime de corte, sendo que a combinação entre esses fatores define os estratos de cubagem do povoamento, e as árvores-amostra devem abranger todas as classes de diâmetro, a partir de um diâmetro mínimo especificado, respeitando, preferencialmente uma mesma frequência por classe.

A diversidade de materiais genéticos plantados pelas empresas florestais, muitas vezes em espaçamentos diferentes, gera um grande número de estratos de cubagem, tornando o processo de estimação de equações volumétricas específicas para cada estrato oneroso, sendo necessário, por questões de minimização de custos, gerar equações específicas apenas dos estratos que contenham materiais de maior interesse, enquanto os menos expressivos são agrupados e nesses são utilizadas equações genéricas. Porém, independentemente do número de estratos e materiais genéticos, são necessárias estimativas exatas de volumes de todos os materiais genéticos (OLIVEIRA et al., 2009).

Oliveira et al. (2009) relatam que quanto maior o número de estratos, maior a precisão obtida, porém maior também será o custo do processo de amostragem. Metodologias tradicionais podem ser inviáveis para estimar volume de povoamentos em algumas situações como, por exemplo, quando se tem povoamentos plantados em pequenas áreas, ou para empresas que apresentam uma grande diversidade de materiais genéticos plantados, pois podem acarretar um elevado custo no processo de cubagem e geração de equações volumétricas.

Algumas metodologias foram desenvolvidas com o intuito de otimizar o processo de cubagem, como o método da altura relativa (LEITE; ANDRADE, 2004), a utilização das redes neurais artificiais (SILVA et al., 2009) e o método da

similaridade de perfis (OLIVEIRA et al., 2009). Esse último - desenvolvido para quantificar o volume de árvores individuais em plantios clonais de eucalipto - também pode ser utilizado para obter estimativas volumétricas em situações em que não necessariamente tem-se um novo material genético como, por exemplo, em casos de povoamentos plantados em áreas reduzidas.

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar o método da similaridade de perfis testando diferentes procedimentos para determinar o volume individual de árvores.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição dos dados

A base de dados empregada é oriunda de povoamentos de *Eucalyptus* sp., pertencentes a uma empresa localizada no Sul do estado da Bahia.

Foram utilizados dados de 3.620 árvores derubadas e cubadas. Além do *DAP* (diâmetro a 1,30 m) e da altura total (*Ht*), foram medidos os diâmetros ao longo do fuste nas posições de 0,00; 0,50; 1,00; 1,50 e 2,00 m, e a partir dessa, as seções foram medidas de 2,0 em 2,0 m, até a altura total da árvore. Os 62 estratos para fins de cubagem foram definidos pelos 29 projetos, 6 espaçamentos (3,00 x 3,00; 3,50 x 2,57; 3,50 x 2,90; 4,00 x 2,75; 4,00 x 3,00; 5,00 x 2,40) e 15 materiais genéticos (clone). As idades dos estratos variaram de 2,71 a 11,00 anos. Os estratos com menos de quatro anos foram considerados como sem equação volumétrica definida.

Equações volumétricas

O volume total observado com casca de cada árvore-amostra foi obtido pelo método de Smalian (HUSCH et al., 2003). De posse dos dados de volume, foi ajustado para cada estrato o modelo de Schumacher e Hall (1933), na forma:

$$\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln DAP + \beta_2 \ln Ht + \varepsilon$$

em que: \ln = logaritmo neperiano; V = volume com casca, em m^3 ; β_i = parâmetros do modelo, sendo $i = 0, 1$ e 2 ; DAP = diâmetro a 1,30 m de altura, em cm; Ht = altura total, em m; e ε = erro aleatório, sendo $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$.

Modelo de afilamento de fuste

Com os dados de cubagem, foi ajustado o modelo de Kozak (1969) para cada uma das 3620 árvores, a fim de se obter os parâmetros para o cálculo das distâncias. Esses ajustes foram realizados com o auxílio do *software R* (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011).

Outros modelos de afilamento de fuste tais como Garcia (CAMPOS; LEITE, 2013); Omerod (MÜLLER et al. 2005); e o Polinômio de Quinto Grau (ASSIS et al. 2002), também foram testados.

Critério de distância

O critério de distância foi utilizado para encontrar as árvores com parâmetros mais similares aos parâmetros estimados dos modelos de afilamento dos estratos com idade inferior a 4 anos. A distância foi calculada entre os parâmetros dos estratos sem equação definida e os parâmetros de cada árvore dos demais estratos.

O critério de distância utilizada neste trabalho foi a Distância Euclidiana, na forma (HAIR JR. et al. 2009):

$$d_{ii'} = \sqrt{\sum_{j=1}^p (X_{ij} - X_{i'j})^2}$$

em que: $d_{ii'}$ = Distância Euclidiana entre parâmetros da árvore i e i' ; X_{ij} e $X_{i'j}$ = observação na i -ésima árvore ($i = 1, 2, \dots, n$) em referência ao j -ésimo parâmetro ($j = 1, 2, \dots, p$); p = número de termos envolvidos no somatório.

Outros critérios de distância (Distância Euclidiana Média, Distância Euclidiana Quadrática e Distância Euclidiana Ponderada, em que o fator de ponderação foi o inverso do valor p de significância de cada parâmetro do modelo de afilamento) também foram testadas.

Estimação dos parâmetros e determinação das equações volumétricas

A combinação dos métodos de estimação dos parâmetros para cada modelo de afilamento e os métodos de geração das equações de volume configuraram os cinco procedimentos realizados neste trabalho, conforme Tabela 1.

Estatísticas utilizadas para verificar a qualidade das estimativas

As estatísticas utilizadas para a verificação da qualidade das estimativas volumétricas foram viés (m^3), raiz quadrada do erro médio (%), coeficiente de correção de Pearson (r) e análise gráfica de resíduos (dispersão e histograma de resíduos) cujas relações funcionais, conforme Özelik et al., (2010), são:

· Viés (B):

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})}{n}$$

· Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM):

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

Coeficiente de Correlação de Pearson (r):

$$r_{Y\hat{Y}} = \frac{cov(Y, \hat{Y})}{\sqrt{s^2(Y) * s^2(\hat{Y})}}$$

Resíduo (Res):

$$Res(\%) = \frac{\hat{Y} - Y}{Y} * 100$$

em que: n = número de observações; Y = volume observado, em m^3 ; \hat{Y} = volume estimado, em m^3 ; \bar{Y} = média dos volumes observados, em m^3 ; cov = covariância; s^2 = variância.

Tabela 1. Descrição dos cinco procedimentos para estimação dos parâmetros dos modelos de afilamento e determinação das equações de volume.

Table 1. Description of the five procedures for estimating the parameters of the taper models and determination of volume equations.

Procedimento	Parâmetros do modelo de afilamento para comparação	Equação volumétrica
1	Ajustado com as 3 árvores (pequena, média e grande).	Equação do estrato ao qual pertence a árvore mais similar.
2	Ajustado com as 3 árvores (pequena, média e grande).	Equação ajustada com as 30 árvores mais similares, independentemente do estrato a qual pertencem.
3	Ajustado com as 3 árvores (pequena, média e grande).	Equação ajustada com o número de árvores que totalizam 5 árvores por classe de DAP do estrato sem equação definida, independentemente do estrato ao qual essas árvores pertencem.
4	Parâmetros da árvore mais próxima ao diâmetro médio do estrato.	Equação do estrato ao qual pertence a árvore mais similar.
5	Parâmetros da árvore mais próxima ao diâmetro médio do estrato.	Equação ajustada com as 30 árvores mais similares, independentemente do estrato a qual pertencem.

Validação do procedimento

A validação foi realizada com dados independentes dos utilizados na verificação, com o objetivo de avaliar a aplicabilidade do procedimento. Foram utilizados dados de *Eucalyptus* sp. de uma empresa localizada no Vale do Jequitinhonha no estado de Minas Gerais, distribuídos em 4 projetos, 13 clones e 6 espaçamentos (3,0 x 3,0; 3,0 x 2,0; 3,0 x 2,5; 3,0 x 1,7; 3,0 x 2,85; 3,0 x 1,5), totalizando 34 estratos, sendo que foram considerados quatro estratos sem equação volumétrica por terem menos de quatro anos de idade e a validação foi feita em nível de talhão por ser a unidade de manejo.

Para comparar os volumes estimados por talhão com os correspondentes volumes observados, foi utilizado o teste *F* proposto por Graybill (1976), a 95% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estratificação dos dados resultou em 62 estratos, sendo que desses, 17 foram considerados sem equação definida por apresentarem árvores com menos de quatro anos de idade. A variação observada do *DAP* (diâmetro a 1,30 m de altura) foi de 6,05 cm a 32,47 cm, e em altura de 8,78 m a 43,80 m (Tabela 2).

As equações volumétricas obtidas para cada estrato apresentaram altos valores de coeficiente de determinação (R^2), acima de 0,9813, e baixos valores de erro-padrão residual (S_{yx}), abaixo de 5,75%. Os valores dos parâmetros, do coeficiente de determinação e do erro padrão encontrados nesses ajustes foram semelhantes aos encontrados por Guimarães e Leite (1996), Silva et al., (2008), Azevedo et al., (2011) e Soares et al., (2011).

Os ajustes do modelo de Kozak apresentaram valores dos parâmetros coerentes com os encontrados na literatura, conforme os trabalhos de Müller et al., (2005), Vanderschaaf (2008) e Miguel et al., (2011).

Os demais modelos de afilamento de fuste descritos na metodologia não apresentaram resultados satisfatórios, com exceção do Polinômio de Quinto Grau, que embora tenha sido eficiente, é um modelo que exige cautela na sua utilização, pois ao aumentar o grau de um polinômio tem-se melhorias no ajuste sob o ponto de vista estatístico, mas pode-se incorrer em perda da consistência biológica do modelo matemático. Kvalseth (1985) comenta que o co-

eficiente de determinação, que expressa a quantidade da variação total explicada pela regressão no ajuste de um modelo, é sempre crescente à medida que se inclui uma nova variável ao modelo de regressão, mas sem haver melhoria nas estimativas.

Os critérios de distância: Distância Euclidiana Média, Distância Euclidiana Quadrática e Distância Euclidiana Ponderada apresentaram resultados equivalentes aos obtidos com a Distância Euclidiana, com exceção da Distância Euclidiana Ponderada. Ainda assim não houve ganho nas estimativas volumétricas.

Estimativas volumétricas

Os resultados da qualidade das estimativas dos cinco procedimentos realizados para o modelo de Kozak, de maneira geral, foram satisfatórios. Os valores negativos encontrados para as médias da estatística viés (m^3) por procedimento indicam uma tendência de superestimação dos volumes para os estratos sem equação definida. Em termos médios, os erros (*RQEM*) se situaram entre 7,91% a 8,70%, sendo que os procedimentos que apresentaram as menores e maiores médias foram o procedimento 1 e o procedimento 5, respectivamente. Os valores médios de correlação de Pearson entre os volumes observados e volumes estimados foram superiores a 0,995 para todos os procedimentos.

A diferença observada para os estratos mais próximos entre os procedimentos 1 e 4, é explicada devido ao método de obtenção dos parâmetros utilizados no cálculo da Distância Euclidiana em cada procedimento, sendo que no procedimento 1 os parâmetros foram obtidos do ajuste do modelo de afilamento com base nas três árvores (pequena, média e grande) enquanto que no procedimento 4 os parâmetros utilizados foram os da árvore de diâmetro médio de cada estrato. Na Tabela 3 está apresentada a qualidade das estimativas de volume por estrato para o modelo de Kozak na íntegra.

A análise gráfica dos resíduos mostrou que os procedimentos apresentaram, em sua maioria, boas estimativas para os 17 estratos sem equação definida. Os gráficos de dispersão dos resíduos apresentaram-se livres de tendências, os histogramas de resíduos apresentaram maior frequência na classe de 0% e a distribuição da frequência dos erros tendeu à curva normal. Na Figura 1 os gráficos do estrato 2 exemplificam essas observações.

Tabela 2. Número de árvores-amostra (N), amplitude e dispersão dos valores de diâmetros (DAP) e das alturas totais (Ht) das árvores por estrato.

Table 2. Number of sample trees (N), amplitude and dispersion values of diameters (DBH) and height (Ht) of trees for each group.

Estrato	Idade (anos)	N	DAP (cm)				Ht (m)			
			Mínimo	Médio	Máximo	S	Mínimo	Médio	Máximo	S
1*	3,50	35	6,84	11,21	15,60	2,74	13,26	17,40	20,47	2,02
2*	3,50	49	6,68	13,06	18,46	3,80	12,80	19,60	23,47	2,84
3	6,88	15	11,14	18,23	24,19	4,52	21,45	29,36	34,00	5,07
4	7,32	63	6,21	15,10	23,55	5,16	10,73	24,46	31,64	6,16
5*	3,03	42	6,37	12,03	17,19	3,44	13,68	18,46	21,46	2,17
6*	2,87	42	6,37	12,00	16,55	3,29	12,76	17,40	20,02	1,91
7*	3,58	49	6,21	12,96	20,05	4,00	12,35	21,97	27,08	4,44
8*	3,58	49	6,05	12,90	19,89	4,08	12,60	21,66	25,97	3,91
9*	2,71	42	6,21	12,10	16,87	3,32	12,07	18,02	21,02	2,18
10*	3,72	35	10,19	15,15	20,05	2,93	19,40	24,62	27,89	2,04
11*	3,15	49	6,84	13,21	19,10	3,84	13,99	20,64	24,07	3,12
12	10,69	77	8,28	19,09	29,92	6,40	15,98	31,27	40,80	8,53
13	10,66	77	8,59	19,10	29,92	6,28	15,29	29,30	39,08	6,71
14	10,66	77	6,21	17,06	27,69	6,50	11,57	25,57	35,23	7,59
15	10,67	77	6,05	17,13	28,01	6,36	10,50	26,62	36,47	7,42
16	10,35	76	6,68	17,22	28,01	6,31	11,76	28,25	38,66	7,35
17	4,78	63	7,00	15,13	23,24	5,02	13,40	24,73	30,12	5,06
18	6,08	63	7,16	15,20	23,87	5,03	12,57	24,15	32,77	6,44
19	4,82	63	7,00	15,13	23,24	5,02	13,40	24,73	30,12	5,06
20	4,43	65	6,37	15,37	24,35	5,28	11,08	24,22	39,97	6,52
21	7,01	53	12,41	19,70	27,37	4,39	19,40	30,86	36,10	4,88
22	6,99	50	12,25	19,09	26,10	3,96	22,63	27,67	31,25	2,42
23	7,02	59	10,19	18,47	26,58	4,80	13,98	29,73	37,79	6,92
24	5,68	70	7,00	16,05	24,51	5,57	11,44	26,02	32,64	6,28
25	5,93	56	8,28	16,18	23,87	4,65	13,56	25,53	33,98	6,62
26*	3,52	42	6,37	12,24	17,51	3,33	11,98	20,62	26,15	4,17
27	6,24	77	6,53	17,15	28,33	6,44	13,56	26,34	36,03	7,04
28	6,44	55	12,10	19,92	27,37	4,48	18,25	28,07	33,87	4,69
29	4,63	51	8,28	15,43	22,28	4,26	15,72	25,36	30,39	4,87
30	4,63	56	8,28	15,98	23,87	4,74	15,45	25,18	31,12	4,41
31	5,06	60	8,59	16,68	24,67	4,91	13,34	24,81	29,35	4,14
32	4,99	63	6,53	15,14	23,87	5,04	13,03	24,83	31,82	6,07
33	6,41	70	7,00	16,19	25,46	5,66	11,60	25,13	32,28	6,26
34	5,20	58	6,37	15,79	22,76	4,77	11,11	25,43	31,18	5,58
35	5,10	63	6,21	15,12	23,87	5,23	12,44	25,69	34,77	7,53
36	5,46	63	6,05	14,98	23,87	5,12	11,20	24,16	31,80	6,59
37	5,37	58	9,55	17,78	24,99	4,63	17,25	29,33	36,67	6,39
38*	3,27	49	6,21	13,19	20,05	3,97	12,40	20,85	24,80	3,47
39*	3,27	42	6,05	12,14	16,87	3,39	12,60	19,94	23,61	3,16
40*	3,27	40	6,68	12,18	17,03	3,28	13,90	19,69	22,95	2,85
41*	3,26	49	6,53	13,00	18,62	3,85	13,60	20,34	23,60	3,16
42	4,94	56	6,68	14,05	21,33	4,47	14,79	23,74	29,24	4,94
43*	3,27	49	6,53	13,08	18,78	3,81	11,36	19,65	22,60	2,73
44	6,20	68	6,37	16,24	25,62	5,63	11,96	25,84	33,60	6,27
45	5,52	70	6,53	16,13	25,15	5,71	12,75	26,28	33,20	5,95
46	5,80	49	10,19	17,04	23,87	4,04	18,17	27,10	32,82	4,53
47	6,80	72	6,37	16,38	26,74	5,85	8,78	23,56	31,50	6,85
48	5,83	63	6,37	15,20	23,87	5,23	12,29	25,31	35,59	7,39
49	6,37	49	10,35	17,18	23,55	4,15	17,19	29,10	35,45	5,43
50	5,39	56	8,59	16,12	23,24	4,63	14,32	23,78	29,11	4,68
51	8,60	70	8,28	17,99	28,01	5,76	12,65	28,79	37,05	6,85
52	9,81	63	7,00	15,27	23,87	5,19	14,82	25,88	31,97	5,45
53	8,02	77	6,05	17,02	26,74	6,34	11,35	26,44	34,83	6,29
54	6,68	70	6,05	16,15	25,78	5,77	11,04	25,46	31,52	5,51
55	6,72	56	6,05	13,91	21,49	4,60	11,42	25,09	34,83	6,97
56	6,10	63	8,28	17,07	25,15	5,00	15,50	27,24	33,98	5,53
57	7,09	70	6,37	16,03	25,78	5,82	12,12	23,75	31,89	6,47
58*	3,15	40	6,68	12,33	16,87	3,26	13,45	20,30	24,58	3,43
59*	2,71	42	6,37	12,17	17,51	3,59	10,70	19,53	24,20	3,93
60	11,00	91	6,05	19,24	32,47	7,58	11,08	32,38	43,80	9,50
61	9,11	77	8,59	19,15	29,60	6,15	16,53	30,76	40,42	7,38
62	8,16	77	6,68	17,06	27,37	6,30	10,58	27,25	36,85	7,86

em que: * são os estratos considerados como sem equação definida e s é o desvio padrão.

in which: * groups considered as "without equation" and s is the standard deviation.

Tabela 3. Qualidade das estimativas de volume por estrato para o modelo de Kozak de acordo com os procedimentos realizados.**Table 3.** Quality of volume estimates by group for Kozak's model in accordance with the performed procedures.

Estrato	Procedimento											
	1				2				3			
	E.P.	Viés	RQEM	r	Viés	RQEM	r	N	Viés	RQEM	r	
1	37	-0,0005	3,77	0,998	-0,0005	5,08	0,998	25	-0,0007	5,27	0,998	
2	49	0,0000	4,28	0,997	-0,0051	6,72	0,998	33	-0,0049	6,72	0,998	
5	16	-0,0100	12,17	0,997	-0,0055	10,15	0,996	30	-0,0055	10,15	0,996	
6	52	-0,0076	13,40	0,995	-0,0045	8,94	0,996	30	-0,0045	8,94	0,996	
7	18	-0,0015	6,87	0,996	-0,0065	9,34	0,996	35	-0,0061	9,28	0,996	
8	20	-0,0048	4,49	0,999	-0,0036	6,40	0,998	35	-0,0040	6,72	0,998	
9	44	-0,0006	7,17	0,994	-0,0036	8,04	0,995	30	-0,0036	8,04	0,995	
10	51	-0,0146	10,29	0,991	-0,0099	10,07	0,990	25	-0,0097	9,92	0,990	
11	07	0,0050	5,32	0,998	-0,0096	11,24	0,997	34	-0,0093	10,84	0,997	
26	07	0,0086	7,60	0,998	-0,0027	7,35	0,997	30	-0,0027	7,35	0,997	
38	50	-0,0020	4,19	0,998	-0,0058	9,57	0,997	35	-0,0056	9,35	0,997	
39	29	-0,0031	6,73	0,995	-0,0019	6,49	0,995	30	-0,0019	6,49	0,995	
40	38	0,0091	8,79	0,998	0,0016	4,62	0,997	30	0,0016	4,62	0,997	
41	57	-0,0015	6,83	0,994	-0,0004	7,62	0,994	35	-0,0013	7,99	0,994	
43	09	-0,0105	9,39	0,998	-0,0011	5,97	0,997	30	-0,0011	5,97	0,997	
58	53	0,0009	8,91	0,987	-0,0010	9,56	0,986	28	-0,0006	9,43	0,986	
59	38	-0,0125	14,22	0,991	-0,0040	9,28	0,991	29	-0,0041	9,32	0,991	

Estrato	Procedimento							
	4				5			
	E. P.	Viés	RQEM	r	Viés	RQEM	r	
1	61	-0,0052	8,75	0,998	-0,0012	3,63	0,998	
2	21	-0,0142	13,32	0,998	0,0003	5,03	0,997	
5	49	0,0047	6,29	0,997	-0,0007	5,71	0,996	
6	29	-0,0045	7,71	0,997	-0,0020	7,75	0,996	
7	18	-0,0015	6,87	0,996	-0,0085	11,44	0,996	
8	37	-0,0021	4,62	0,999	-0,0106	12,01	0,998	
9	32	-0,0048	7,61	0,996	-0,0096	14,33	0,994	
10	47	-0,0087	8,18	0,991	-0,0005	7,00	0,991	
11	24	-0,0067	7,79	0,998	-0,0050	8,47	0,997	
26	01	0,0080	7,91	0,998	-0,0042	8,04	0,997	
38	24	-0,0041	6,31	0,998	-0,0006	6,75	0,998	
39	34	0,0009	5,65	0,995	0,0057	7,36	0,995	
40	56	0,0099	9,68	0,998	-0,0058	8,32	0,997	
41	05	0,0033	6,33	0,995	-0,0017	8,03	0,994	
43	28	-0,0029	7,21	0,997	-0,0055	8,52	0,997	
58	59	0,0103	12,80	0,987	0,0070	11,13	0,987	
59	10	-0,0038	8,31	0,991	-0,0106	14,35	0,991	

em que: E.P significa Estrato Próximo; Viés em m³; RQEM é a raiz quadrada do erro médio, em porcentagem; r é a correlação de Pearson, N é o número de árvores envolvidas no ajuste da equação volumétrica para o procedimento 3.

in which: E.P means Neighbor Stratum; Bias in m³; RQEM is the root mean square error, in percentage, r is the Pearson correlation, N is the number of trees involved in adjusting the volumetric equation for the procedure 3.

Em algumas situações, como para o estrato 6, os gráficos de dispersão e histogramas de resíduos, apresentaram tendência de subestimação do volume para árvores menores e superestimação para árvores maiores. Segundo Campos e Leite (2013), esse comportamento pode indicar que os erros estão correlacionados e, em consequência há a necessidade de mudança do modelo, por estar violando a pressuposição de independência dos erros da análise de regressão.

Com relação aos procedimentos de estimação dos parâmetros para cálculo da distância e determinação da equação volumétrica, pode-se notar que o procedimento 2 (em que a equação volumétrica é ajustada a partir de 30 árvores semelhantes) e o procedimento 3 (em que a equação volumétrica é ajustada com base no número de árvores mais similares que totalizam 5 árvores por classe diamétrica) foram superiores em relação aos demais (Tabela 4). A semelhança nos resul-

tados desses procedimentos, pode ser devida ao fato de que, ao se considerar o número de árvores equivalentes a 5 por classe de diâmetro em cada estrato sem equação definida, o número final de árvores mais semelhantes envolvidas no ajuste das equações volumétricas do procedimento 3 foi próximo ao número de árvores semelhantes do procedimento 2, o que resultou na proximidade dos resultados obtidos por esses procedimentos. É provável que, aumentando o número de árvores semelhantes na geração da equação volumétrica, aumente-se a qualidade das estimativas, sendo que o número ideal de árvores para cada estrato dependerá da variação na forma das árvores ali contidas. Este trabalho mostra que equações volumétricas geradas com 30 árvores semelhantes apresentam estimativas satisfatórias para os estratos sem equação definida.

A superioridade dos procedimentos 2 e 3, em relação aos demais, pode ser explicada devido ao método de geração da equação de volume, pois nesses procedimentos, a equação é gerada pelas árvores com a forma do fuste mais parecida com os parâmetros utilizados para o cálculo da distância. HUSCH et al., (2003) comenta que, além

do DAP e da altura total, a forma da árvore é fundamental no processo de quantificação volumétrica, e que árvores com mesmo diâmetro e mesma altura podem apresentar volumes diferentes, se as formas dos troncos não forem iguais.

Os procedimentos 4 e 5 apresentaram estimativas inferiores em algumas situações. Este resultado pode ser devido à influência do diâmetro médio na estimação dos parâmetros do modelo de afilamento dos estratos sem equação definida. Ao se utilizar o diâmetro médio, as equações dos procedimentos 4 e 5 tendem a estimar com mais exatidão o volume das árvores de dimensões próximas ao diâmetro médio do povoamento, e proporcionar estimativas errôneas dos volumes de árvores pequenas e grandes.

Assim, optou-se por utilizar no processo de validação, o procedimento 2, que utiliza 3 árvores na estimação dos parâmetros do modelo de afilamento e a equação volumétrica é ajustada com base nas 30 árvores mais similares, independentemente do estrato ao qual pertençam. Na validação também foi realizado o procedimento 1, por ser a metodologia original proposta por Oliveira et al., (2009).

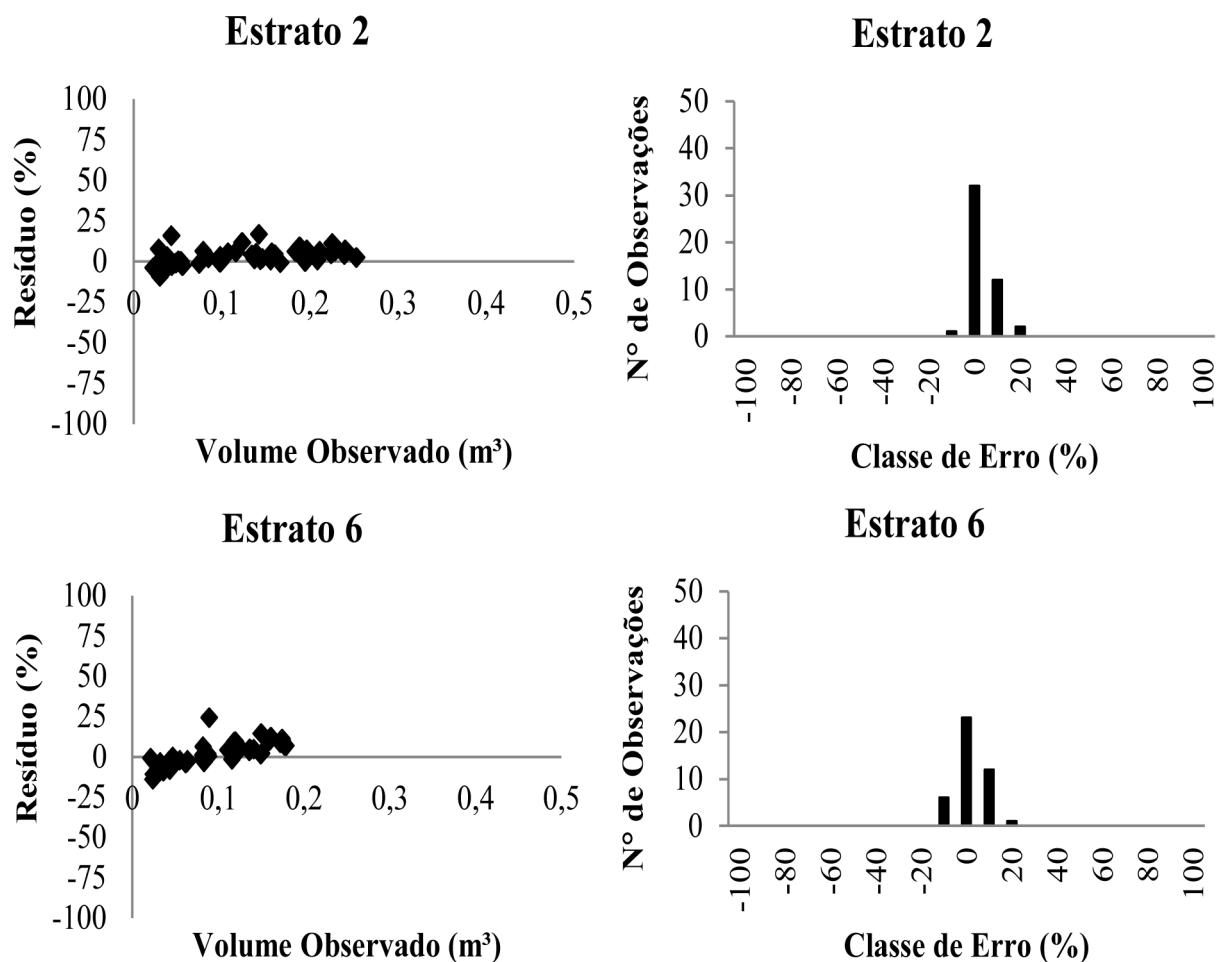


Figura 1. Gráficos de dispersão e histograma dos resíduos para dois estratos sem equação definida, estimados pelo procedimento 2.

Figure 1. Scatter plots and residual histogram for two groups without defined equation, estimated by procedure 2.

Validação do procedimento

Os dados dos estratos utilizados na validação apresentaram *DAP* variando de 5,00 a 28,50 cm, altura total, variando de 6,70 a 33,30 m e volume total variando de 0,0042 a 0,8760 m³.

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados dos volumes (em m³.ha⁻¹) estimados, usando: i) a equação de volume do próprio estrato; ii) a equação de volume do estrato da árvore mais similar (metodologia de Oliveira et al., (2009) e; iii) a equação de volume baseada nas 30 árvores mais similares para os quatro estratos que apresentaram idades inferiores a quatro anos de idade. Os

resultados mostram que tanto o procedimento desenvolvido por Oliveira et al., (2009), quanto o procedimento desenvolvido neste trabalho apresentaram bons resultados, sendo que a diferença média nas estimativas foi de cerca de -7,0 e -0,6% respectivamente, e ambos os procedimentos ora subestimaram, ora superestimaram os volumes observados dos talhões. Em termos de estrato, o volume estimado pela equação do estrato semelhante variou de 1,19 a por volta de 18%. Para as estimativas efetuadas com as equações geradas a partir de 30 árvores, a variação observada no valor do erro foi de 0 a 5% aproximadamente.

Tabela 4. Estimativa dos volumes dos talhões (m³.ha⁻¹), utilizando a equação de Schumacher e Hall própria, a equação do estrato da árvore mais similar e a equação baseada nas 30 árvores mais similares.

Table 4. Estimates of stands volumes (m³.ha⁻¹), using the stand specific equation of Schumacher and Hall, the group equation of the most similar tree and the equation based on the most similar 30 trees.

Estrato	Talhão	Área (ha)	Volume (m ³ .ha ⁻¹)			Diferença (%)	
			Equação			1	2
			Própria	Estrato semelhante	Equação das 30 árvores		
1	1	21,00	129,65	126,32	130,32	-2,57	0,52
1	2	11,62	95,64	92,04	95,38	-3,76	-0,27
Subtotal		32,62	225,29	218,36	225,7	-3,08	0,18
2	1	49,43	173,63	163,39	165,82	-5,90	-4,50
2	2	51,88	124,59	120,00	120,92	-3,68	-2,95
2	3	29,34	207,20	189,63	193,66	-8,48	-6,53
2	4	46,50	204,11	188,81	192,66	-7,50	-5,61
2	5	21,91	219,11	202,78	207,27	-7,45	-5,40
2	6	9,04	184,67	172,80	175,38	-6,43	-5,03
2	7	27,15	150,23	142,77	143,44	-4,97	-4,52
2	8	30,40	139,81	132,56	134,39	-5,19	-3,88
2	9	45,36	208,09	192,36	197,14	-7,56	-5,26
Subtotal		311,01	1611,44	1505,10	1530,68	-6,60	-5,01
3	1	49,13	153,96	154,32	158,71	0,23	3,09
3	2	19,52	190,43	197,20	199,30	3,56	4,66
3	3	17,90	157,94	158,87	163,39	0,59	3,45
3	4	16,30	167,95	170,13	173,98	1,30	3,59
3	5	15,46	165,72	167,59	171,67	1,13	3,59
3	6	34,98	158,95	159,84	164,11	0,56	3,25
3	7	16,27	201,36	207,98	210,33	3,29	4,45
3	8	10,61	139,28	137,73	142,22	-1,11	2,11
3	9	39,30	150,28	149,86	154,37	-0,28	2,72
Subtotal		219,47	1485,87	1503,52	1538,08	1,19	3,51
4	1	47,17	150,81	125,79	149,85	-16,59	-0,64
4	2	52,12	133,16	111,20	132,62	-16,49	-0,41
4	3	3,26	179,75	145,07	180,53	-19,29	0,43
4	4	45,50	189,91	153,27	190,27	-19,29	0,19
4	5	29,60	159,47	130,54	159,56	-18,14	0,06
4	6	31,58	123,63	104,88	122,99	-15,17	-0,52
4	7	16,45	201,82	161,82	202,93	-19,82	0,55
4	8	51,11	135,57	113,39	135,39	-16,36	-0,13
Subtotal		276,79	1274,12	1045,96	1274,14	-17,91	0,00
Total		839,89	4596,72	4272,94	4568,60	-7,04	-0,61

em que: 1 é a diferença percentual entre o volume pela equação própria e a equação semelhante;

2 é a diferença percentual entre o volume pela equação própria e a equação das 30 árvores.

in which: 1 is the percentage difference between the volume by the stand-specific equation and similar equation;

2 is the percentage difference between the volume by the stand-specific equation and the equation of 30 trees.

Em termos de comparação dos métodos, pode-se constatar que embora ambos tenham apresentado boas estimativas, o procedimento envolvendo as 30 árvores proporcionou estimativas de volume mais próximas dos volumes observados, conforme resultados do Teste *F* de Graybill (1976), mostrado na Tabela 5.

Tabela 5. Comparação pelo Teste *F* de Graybill entre os volumes observados e os volumes estimados pela equação do estrato semelhante e pela equação das 30 árvores por talhão.

Table 5. Comparison by *F* Graybill Test between the observed volume and the volumes estimated by the similar group equation and the equation of 30 trees per stand.

	Equação semelhante	Equação 30 árvores
Equação própria	11,43 *	1,58 ^{ns}
Equação semelhante	-	11,90 *

* significativo a 95% de probabilidade pelo Teste *F* de Graybill.

^{ns} não significativo a 95% de probabilidade pelo Teste *F* de Graybill.

* significant at 95% probability by *F* Graybill Test.

^{ns} not significant at 95% probability by *F* Graybill Test.

Os resultados apresentados mostram que o método da similaridade de perfis consiste em um eficiente método alternativo para determinação de volume de árvores, principalmente em situações em que as metodologias tradicionais são inviáveis. Pela redução de custos no processo de cubagem e pela exatidão obtida nas estimativas, este método pode ser utilizado para estimar o volume de estratos que apresentam idades superiores a quatro anos.

É conveniente ressaltar a importância da coleta dos dados, que deve ser conduzida de maneira rigorosa e representativa do povoamento, para que as estimativas geradas pelo método sejam livres de viés e não comprometam a quantificação de volume dos povoamentos.

A metodologia proposta por Oliveira et al., (2009) permitiu obter resultados satisfatórios, mas foi aparentemente inferior quando comparada com as estimativas geradas com a equação das 30 árvores. Deve-se ressaltar, que para um erro admitido de até 10%, tanto a metodologia elaborada por Oliveira et al., (2009), quanto a apresentada neste trabalho mostram-se bastante eficientes. Em termos de facilidade de aplicação, o método de Oliveira et al., (2009) apresenta a vantagem de se ajustar menos equações volumétricas, além de não haver a necessidade de se determinar as 30 árvores mais similares para geração da nova equação volumétrica, porém é menos exato que as estimativas geradas pela equação das 30 árvores, cabendo ao manejador florestal optar pelo método que lhe seja mais conveniente.

CONCLUSÕES

O método da similaridade de perfis, utilizado para determinação do volume individual de árvores proporcionou boas estimativas volumétricas;

O procedimento de geração da equação volumétrica com base nas 30 árvores mais semelhantes foi o que resultou nas melhores estimativas de volume, sendo, porém, de execução mais trabalhosa.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), Universidade de Brasília (UNB) e à Fundação de Ampara à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo auxílio a pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSIS, A. L.; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, A. D. Avaliação de Modelos polinomiais não segmentados na estimativa de diâmetros e volumes comerciais de *Pinus taeda*. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 89-107, 2002.
- AZEVEDO, G. B.; SOUSA, G. T. O.; BARRETO, P. A. B.; CONCEIÇÃO JR., V. Estimativas volumétricas em povoamentos de eucalipto sob regime de alto fuste e talhadia no sudoeste da Bahia. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v. 31, n. 68, p. 309-318, 2011.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. *Mensuração florestal: perguntas e respostas*. 4.ed. Viçosa: Editora UFV, 2013. 605 p.
- GRAYBILL, F. A. *Theory and application of the linear model*. Massachusetts: Ouxburg Press, 1976. 704 p.
- GUIMARÃES, D. P.; LEITE, H. G. Influência do número de árvores na determinação de equações volumétricas para *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n. 50, p. 37- 42, 1996.
- HAIR JR., J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E. *Multivariate Data Analysis*. 7.ed. Prentice Hall, 2009. 816 p.
- HUSCH, B.; BEERS, T. W.; KERSHAW JR., J. A. *Forest mensuration*. 4.ed. Malabar: Krieger Publishing Company, 2003. 443 p.

- KOZAK, A.; MUNRO, D. D.; SMITH, J. G. H. Taper functions and their applications in forest inventory. *Forest Chronicle*, Quebec, v. 45, n. 4, p. 278-283, 1969.
- KVALSETH, T. O. Cautionary note about R^2 . *The American Statistician*, Alexandria, v. 39, n. 4, p. 279-285, 1985.
- 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.
- MIGUEL, E. P.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E. Modelos polinomiais para representar o perfil e o volume do fuste de *Eucalyptus urophylla* na região norte do estado de Goiás. *Floresta*, Curitiba, v. 41, n. 2, p. 355-368, 2011.
- MÜLLER, I.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. Formas de tronco e sortimento da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, na região Sudeste do Estado Rio Grande do Sul. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 15, n. 3, p. 293-305, 2005.
- OLIVEIRA, M. L. R.; LEITE, H. G.; GARCIA, S. L. R.; CAMPOS, J. C. C.; SOARES, C. P. B.; SANTANA, R. C. Estimação do Volume de Árvores de Clones de Eucalipto Pelo Método da Similaridade de Perfis. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 133-141, 2009.
- ÖZELIK, R.; DIAMANTOPOULOU, M. J.; BROOKS, J. R.; WIANT, H. V. J. Estimating tree bole volume using artificial neural network models for four species in Turkey. *Journal of Environmental Management*. New York, v. 91 n. 3, p. 742-753, 2010.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R foundation for Statistical Computing, 2011. Disponível em < <http://www.r-project.org> > . Acesso em: 17 nov. 2011.
- SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber volume. *Journal of Agricultural Research*, Washington, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933.
- SILVA, M. L. M.; BINOTI, D. H. B.; GLERIANI, J. M.; LEITE, H. G. Ajuste do modelo de Schumacher e Hall e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de Eucalipto. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1133-1139, 2009.
- SILVA, R. F.; SOARES, C. P. B.; JACOVINE, L. A. G.; SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; SILVA, G. F. Projeção do Estoque de carbono e análise da geração de créditos em povoamentos de eucalipto. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 979-992, 2008.
- SOARES, F. A. A. M. N.; FLÔRES, E. L.; CABACINHA, C. D.; CARRIJO, G. A.; VEIGA, A. C. P. Recursive diameter prediction and volume calculation of eucalyptus trees using Multilayer Perceptron Networks. *Computers and Electronics in Agriculture*. v. 78, n. 1, p. 19-27, 2011.
- VANDERSCHAAF, C. Compatible stem taper and total tree volume equations for loblolly pine plantations in Southeastern Arkansas. *Journal of the Arkansas Academy of Science*, Little Rock, v. 62, p. 103-106, 2008.

Recebido em 21/05/2014
Aceito para publicação em 11/02/2015