

Métodos para estimativas volumétricas de *Pinus patula*

Marcelo Bonazza¹ Marcos Felipe Nicoletti^{2*} Gírlene da Silva Cruz³ Nilton Sergio Novack Junior² Jean Alberto Sampietro² Pedro Henrique Belavenutti Martins da Silva⁴ Vinicius Costa Cysneiros⁴

¹ Universidade Federal de Santa Catarina, campus Curitibanos, Rodovia Ulysses Gaboardi, 3000, Curitibanos - SC, 89520-000

² Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Av. Luiz de Camões, 2090 - Conta Dinheiro, Lages - SC, 88520-000

³ Universidade Federal do Oeste do Pará, Rua Vera Paz, s/n, Salé, Santarém-PA, 68040-255

⁴ Universidade Federal do Paraná, Av. Prefeito Lothário Meissner, 632 - Jardim Botânico, Curitiba - PR, 80210-170

*Author for correspondence: marcos.nicoletti@udesc.br

Received: February 2019 / Accepted: June 2019 / Published: June 2019

Resumo

O objetivo do presente estudo foi comparar diferentes métodos de estimativa volumétrica para a espécie *Pinus patula*. Os métodos estudados foram: fator de forma artificial, modelos volumétricos clássicos, polinômio de 5º grau e método dos dois diâmetros. As estimativas foram avaliadas por meio de: coeficiente de determinação ajustado, erro padrão da estimativa relativo e análise gráfica dos resíduos, e adicionalmente, comparadas por análise de variância ao nível de 5% de probabilidade. Essa análise demonstrou não haver diferenças significativas nas estimativas obtidas pelos métodos testados em relação aos valores paramétricos advindos da cubagem rigorosa. O método dos dois diâmetros com a utilização dos diâmetros do fuste à 1,3 m e 2 m, bem como, o modelo Schumacher & Hall tiveram os menores erros padrões da estimativa relativos e melhor desempenho na análise gráfica de resíduos, mostrando-se mais precisos que os demais estudados. Entretanto, apesar da superioridade desses dois métodos, conclui-se que todos os métodos estudados mostraram desempenho satisfatório para estimativas volumétricas em *Pinus patula* com 9 anos de idade.

Palavras-chave: volumetria, método dos dois diâmetros, cubagem rigorosa.

Abstract

The aim of this study was to compare different volumetric estimation methods for *Pinus patula*. The methods studied were: artificial form factor, classic volumetric models, 5th degree polynomial and two diameters method. The estimates were evaluated by: adjusted coefficient of determination, relative standard error of the estimate and residual analysis, and additionally, compared by analysis of variance at 5% probability level. This analysis showed that there were no significant differences in the estimates obtained by the methods tested in relation to the parametric values. The two diameters method with use of the stem diameter at 1.3 m and 2.0 m, as well as, Schumacher & Hall model had the lowest relative standard error of the estimate and better performance in the residual analysis, being more accurate than others studied. However, although the superiority of these two methods, we concluded that all the studied methods showed satisfactory performance for volumetric estimates in 9-years-old *Pinus patula*.

Keywords: volumetry, two diameters method, measurement of tree volume.

Introdução

O Sul do Brasil é detentor das maiores áreas com cultivo de *Pinus* no país, sendo esse um dos gêneros mais importantes em aspectos silviculturais e econômicos da região (IBÁ 2017). A espécie mais cultivada é o *Pinus*

taeda L., seguida do *Pinus elliotii* Engelm, entretanto, algumas empresas que possuem plantios dessas espécies têm se deparado com ataques de macaco-prego (*Sapajus nigritus*), o qual pode provocar elevados danos ao crescimento e sobrevivência dessas espécies (Liebsch e Mikich 2017).

Desta forma, a implantação de povoamentos de *Pinus patula* Schlecht. & Cham. surge como alternativa, considerando que essa espécie é menos suscetível aos ataques desses animais (Liebsch e Mikich 2017). Além disso, a espécie apresenta algumas características desejáveis como taxa de crescimento semelhante ao do *Pinus taeda*, boa forma do seu tronco e aptidão a indústria de polpa celulósica (Dvorak et al. 2000). Segundo Valera e Kageyama (1991), quando plantada em solos profundos e férteis, essa espécie pode atingir um crescimento de 35 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. Outra característica dessa espécie é o bom crescimento em áreas de altitude elevada, como é o caso do Planalto Serrano Catarinense (Aguar et al. 2011).

Tendo em vista o potencial da espécie, a quantificação volumétrica é imprescindível para a determinação do estoque de madeira nesses povoamentos florestais, pois, essa informação dá subsídios ao planejamento florestal, permitindo a aplicação adequada de intervenções silviculturais e de colheita, sob o ponto de vista técnico e econômico. Além disso, serve como base para a determinação da ordenação da produção florestal.

As estimativas de volume podem ser realizadas pela aplicação de um fator de forma médio, de equações de simples ou dupla entrada e por meio da integração de funções de afilamento, obtidos a partir de um conjunto de árvores cubadas (Prodan 1997; Sanquetta et al. 2015). Outras formas alternativas para a obtenção de estimativas volumétricas são citadas na literatura, como é o caso do método dos dois diâmetros (Thiersch et al. 2006).

Contudo, a utilização de diferentes metodologias para a determinação de volumes de árvores individuais em inventários florestais deve preconizar simplicidade e rapidez, contemplando estimativas com grau de precisão satisfatório e visando a minimização dos custos (Silva e Paula Neto 1997). Nesse contexto, o método dos dois diâmetros surge como opção de praticidade para a determinação do volume individual de árvores, uma vez que independe da medição da altura das árvores (Sanquetta et al. 2015). Essa técnica apresentada por Silva e Borders (1993), procura avaliar qual porção do tronco possui volume com maior correlação em relação ao volume total ou comercial de uma árvore. Para maior facilidade de aplicação do método, os diâmetros que definem a porção a ser considerada não devem ser obtidos abaixo da altura de corte usada e a alturas não atingíveis pelo medidor.

Alguns autores têm comparado métodos para estimar volumes de diferentes espécies florestais no Brasil

(Cabacinha 2003; Thiersch et al. 2006; Schröder et al. 2013; Sanquetta et al. 2015). No entanto, há carência de pesquisas relacionadas à volumetria de *Pinus patula* no país. Sendo assim, o presente estudo tem como objetivo comparar a precisão de diferentes métodos para estimativas volumétricas dessa espécie.

Material e métodos

Área de estudo

O povoamento de *Pinus patula* era localizado na cidade de Ponte Alta do Norte, estado de Santa Catarina, tendo as coordenadas geográficas: 27° 09' 30" sul e 50° 27' 52" oeste e, altitude média de 960 m acima do nível do mar. O povoamento possui aproximadamente 20 ha, com espaçamento inicial de 2,5 x 2,5 m (1.600 ind.ha⁻¹), sendo submetido ao primeiro desbaste misto (seletivo + sistemático) aos 8 anos de idade, onde foi retirado aproximadamente 40% da densidade inicial. No período do estudo a densidade era de aproximadamente 930 ind.ha⁻¹, aos 9 anos de idade.

Coleta dos dados

As árvores selecionadas para a cubagem representam a distribuição diamétrica da floresta, por meio da metodologia de Sturges (Ferreira 2005), abrangendo todas as classes de tamanho (Figura 1). Os dados para o ajuste das equações foram obtidos através de cubagem de 33 árvores pelo método de Smalian. Os diâmetros foram medidos com auxílio de fita diamétrica nas posições do fuste: 0,1 m; 0,3 m; 0,5 m; 0,9 m; 1,3 m; 2 m; depois a cada 1 metro sucessivamente até a última seção, que tinha comprimento inferior à 1 m e foi considerada cone.

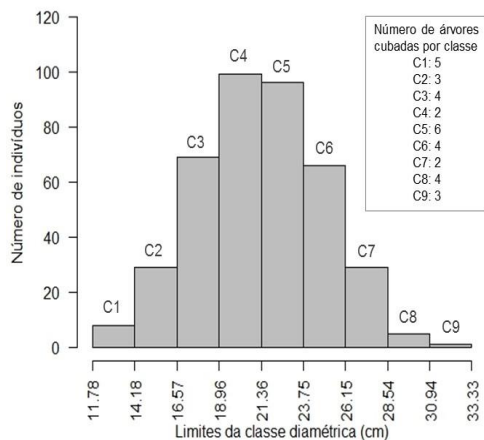


Figura 1. Distribuição absoluta e número de árvores amostradas por classe diamétrica.

Fator de forma artificial

Uma das formas de estimativa volumétrica utilizadas para a comparação foi o fator de forma artificial (Expressão 1).

$$f_{1,3} = \frac{vol\ arv}{vol\ cil} \quad (1)$$

Em que: $f_{1,3}$ = fator de forma artificial; vol arv = volume cubado da árvore (m³); vol cil = volume do cilindro com área transversal correspondente ao diâmetro à 1,30 metro do solo.

Após o cálculo do fator de forma artificial para cada árvore, foi calculada a média aritmética dos mesmos para posterior estimativa do volume total individual (Expressão 2).

$$v = g.h.\bar{f}_{1,3} \quad (2)$$

Em que: v = volume total da árvore (m³); h = altura total (m); $f_{1,3}$ = fator de forma artificial médio; g = área transversal (m²), onde $g = \frac{d^2\pi}{40000}$, sendo: d = diâmetro à altura do peito (cm);

Equações de volume

A partir dos dados obtidos pelas cubagens foram ajustados seis modelos estatísticos amplamente difundidos na ciência florestal (Tabela 1). Para a seleção dos modelos foram considerados o erro padrão da estimativa percentual ($Sy\%$) e o Índice de Ajuste de Schlaegel (IA) (Expressão 3), recalculados quando necessário, para possibilitar a comparação de equações com variáveis e número de coeficientes distintos, conforme sugerido por Silva et al. (2011). Os valores estimados por equações logarítmicas foram corrigidos pelo Fator de Correção de Meyer (FCM) (Expressão 4), visando corrigir a discrepância logarítmica gerada pela transformação da variável independente.

$$IA = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \cdot \left(\frac{SQRes}{SQTot} \right) \quad (3)$$

$$FCM = e^{0,5 \cdot (Sy\%)^2} \quad (4)$$

Em que: n = número de valores observados; p = número de coeficientes do modelo; $Sq\ res.$ = soma dos quadrados dos resíduos; $SQTot.$ = soma dos quadrados totais; $Sy\%$ = erro padrão da estimativa absoluto.

Tabela 1. Modelos estatísticos testados para o ajuste de equação de volume individual para *Pinus patula*.

Eq.	Modelo matemático	Autores
	$\ln(v) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(DAP) + \varepsilon_i$	Husch
	$v = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP^2 \cdot h + \varepsilon_i$	Spurr
	$v = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP^2 + \varepsilon_i$	Kopezk
	$\ln(v) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(DAP) + \beta_2 \cdot \ln(h) + \varepsilon_i$	y - Gehrart
	$v = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP + \beta_2 \cdot DAP^2 + \beta_3 \cdot DAP \cdot h + \beta_4 \cdot DAP^2 \cdot h + \beta_5 \cdot h + \varepsilon_i$	Schuma cher & Hall
	$v = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP + \beta_2 \cdot DAP^2 + \varepsilon_i$	Meyer
	$v = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP + \beta_2 \cdot DAP^2 + \varepsilon_i$	Hohenal d & Krenn

Em que: v = volume total da árvore (m³); β_i = coeficientes da equação ajustada; DAP = diâmetro à altura do peito (cm); h = altura total (m); \ln = logaritmo neperiano e; ε_i = erro associado.

Função de Afilamento

O ajuste do polinômio de 5° grau (Expressão 5) foi avaliado para as estimativas volumétricas, por ser uma das funções mais utilizadas para descrever o perfil do fuste de espécies do gênero *Pinus* no Brasil (Figueiredo Filho et al. 1996). As estatísticas de ajuste analisadas para a função de afilamento foram as mesmas descritas para os modelos volumétricos.

$$\frac{d_i}{DAP} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \left(\frac{h_i}{h}\right) + \beta_2 \cdot \left(\frac{h_i}{h}\right)^2 + \beta_3 \cdot \left(\frac{h_i}{h}\right)^3 + \beta_4 \cdot \left(\frac{h_i}{h}\right)^4 + \beta_5 \cdot \left(\frac{h_i}{h}\right)^5 + \varepsilon_i \quad (5)$$

Em que: DAP = diâmetro à altura do peito (cm); h = altura total com ponta (m); d_i = diâmetro à altura h_i do tronco (cm); h_i = altura até a seção i do tronco (m); $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ = coeficientes da equação; ε_i = erro associado.

Método dos dois diâmetros

O método consiste na verificação de qual seção do tronco compreendido entre dois diâmetros quaisquer apresenta volume mais correlacionado com o volume total. No presente trabalho, foram utilizadas as seções compreendidas entre os pares de diâmetros medidos nas seguintes alturas: 0,1 a 1,3 m; 0,3 a 1,3 m; 0,5 a 1,3 m; 0,9 a 1,3 m e entre 1,3 a 2,0 m. Em seguida foram ajustados os modelos lineares (Expressão 6) para todas as seções.

$$v = \beta_0 + \beta_1 * (d_1^2 + d_2^2) \quad (6)$$

Em que: v = volume total da árvore (m^3); β_0 e β_1 = parâmetros a serem estimados; d_1 e d_2 = diâmetros medidos (cm).

Os diâmetros a 0,1 m, 0,3 m, 0,5 m, 0,9 m e 2,0 m de altura, foram testados em pares com o diâmetro à 1,30 m do solo (DAP) como variáveis independentes no modelo, para verificar qual par de diâmetros gerou o melhor ajuste. Para a seleção da seção de maior correlação com o volume total foi aplicado análise de correlação de Pearson (r), em seguida foram avaliados o R^2_{aj} (Expressão 7) e $Sy_x\%$ (Expressão 8).

O coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) expressa o quanto da variável dependente é explicada pelas variáveis independentes. Esse coeficiente varia no intervalo de 0 a 1, sendo a variável dependente melhor explicada quanto mais próximo de 1 for o valor de R^2_{aj} . (Machado et al. 2002; Hiramatsu 2008).

$$R^2_{aj} = 1 - \left[(1 - R^2) \cdot \left(\frac{n - 1}{n - p - 1} \right) \right] \quad (7)$$

Em que: R^2 = coeficiente de determinação múltiplo; n = número de valores observados; p = número de coeficientes do modelo.

O erro padrão da estimativa (Sy_x) é uma estatística que mede a dispersão média entre os valores observados e estimados ao longo da linha de regressão, sendo que, quanto mais baixo for o valor do Sy_x , melhor terá sido o ajuste (Hiramatsu 2008).

$$Sy_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{n - p}} \quad (8)$$

$$Sy_x \% = \frac{Sy_x}{\bar{y}} \cdot 100$$

Em que: y_i = valor observado; \hat{y} = valor estimado; n = número de valores observados; p = número de coeficientes dos modelos; \bar{y} = média dos valores observados.

Comparação dos métodos de estimativa de volume

Para a seleção do melhor método de determinação do volume individual das árvores foram utilizados os indicadores estatísticos e de precisão, bem como, a análise gráfica dos resíduos, com objetivo de verificar se o ajuste foi bom ao longo de toda linha de regressão, se não há tendência aparente e se há problemas de heterocedasticidade da variância dos resíduos.

Adicionalmente, foi realizada análise de variância (ANOVA) ao nível de 5% de probabilidade, considerando-se delineamento inteiramente casualizado. Essa análise teve por objetivo verificar se houve diferenças significativas entre as estimativas obtidas pelos métodos propostos no estudo e os volumes considerados paramétricos originados pela cubagem rigorosa.

Resultados

Fator de forma artificial

O fator de forma artificial encontrado para o conjunto de dados do presente estudo foi igual a 0,4530.

Equações de volume

Os valores do erro padrão da estimativa percentual encontrados foram baixos, variando de 6,6 a 7,2 % (Tabela 2), evidenciando boa precisão na estimativa das equações volumétricas. Os modelos de Spurr (2) e Schumacher & Hall (4) apresentaram os menores erros e, portanto, a maior precisão nas estimativas.

Tabela 2. Parâmetros estatísticos de ajuste dos modelos testados para a estimativa do volume total com casca de *Pinus patula*.

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	IA	$Sy_x\%$	FM
-8,1997	2,2062	-	-	-	-	0,9853	7,2	1,0048
0,0197	0,000032	-	-	-	-	0,9874	6,6	-
-0,0207	0,0006	-	-	-	-	0,9858	7,1	-
-9,6129	1,8363	0,9492	-	-	-	0,9886	6,7	1,0036
-0,2671	0,0175	-0,000046	-0,001505	0,0000	0,0226	0,9885	6,8	-
0,0016	-0,0021	0,0006	-	-	-	0,9859	7,1	-

Funções de Afilamento

O modelo testado para estimar o volume por meio da avaliação do perfil do fuste apresentou $Sy_x\%$ de 10,8% e 7,1% para o volume e afilamento, respectivamente (Tabela 3).

Tabela 3. Parâmetros estatísticos de ajuste do polinômio de 5º grau para a estimativa do afilamento e volume total com casca de *Pinus patula*.

Modelo	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	R^2_{aj}	$Sy_x\%$
5º Grau (di)	1,230	-3,456	12,485	-24,917	21,504	-6,816	0,984	7,1
5º Grau (vi)	1,230	-3,456	12,485	-24,917	21,504	-6,816	0,984	10,8

Método dos dois diâmetros

Os coeficientes de correlação de Pearson ($p < 0,01$), as estatísticas de ajuste e os coeficientes, estão descritos na Tabela 4. A porção que possui maior correlação com o volume total foi a situada entre 1,3 e 2,0 m do solo. Esta mesma seção forneceu as estimativas mais precisas, com reduzido valor de $Sy_x\%$ (6,0%) e elevado valor de R^2_{aj} (0,9893).

Tabela 4. Coeficiente de correlação (r), estatísticas e parâmetros estimados dos modelos gerados pelo ajuste do método dos dois diâmetros.

Porção do Tronco	Volume					Ranking
	r	R^2_{aj}	$Sy_x\%$	b_0	b_1	
1,3 - 2,0	0,9948	0,9894	6,0	-0,01977	0,000304	1
0,9 - 1,3	0,9925	0,9847	7,2	-0,02150	0,000274	2
0,5 - 1,3	0,9908	0,9810	8,0	-0,02485	0,000262	3
0,3 - 1,3	0,9875	0,9744	9,3	-0,02449	0,000249	4
0,1 - 1,3	0,9861	0,9716	9,8	-0,04835	0,000254	5

Comparação dos métodos de estimativa de volume

Quando comparados os quatro métodos de estimativa do volume individual para *Pinus patula* (Tabela 5) foi possível observar que o polinômio de 5º grau ajustado apresentou o maior $Sy_x\%$ (10,8%), seguido das estimativas obtidas por meio do fator de forma (10,1%). Em contrapartida, o modelo de Schumacher & Hall e o método dos dois diâmetros proporcionaram menores valores para essa estatística (6,7% e 6,0%, respectivamente). Esses resultados inferem maior precisão das estimativas pelos dois últimos métodos citados.

Tabela 5. Estatística de comparação dos métodos de obtenção de volume para *Pinus patula*.

Método	Estatística de Ajuste		Volume médio individual (m ³ .árv ⁻¹)
	R ² aj	Syx %	
Fator de forma	-	10,1	0,3040
Schumacher & Hall	0,989	6,7	0,2845
Polinômio de 5º Grau	0,984	10,8	0,2898
Dois diâmetros (1,3 - 2,0)	0,989	6,0	0,2916

Em contrapartida, a ANOVA não evidenciou diferenças significativas entre as estimativas volumétricas obtidas pelos diferentes métodos e os valores paramétricos obtidos pela cubagem rigorosa das árvores ($p > 0,05$). Isso indica que todos os métodos testados poderiam ser utilizados para essa finalidade. A média do valor paramétrico foi de $0,2851 \text{ m}^3 \cdot \text{árv}^{-1}$, ao passo que as médias do método dos dois diâmetros, os volumes estimados pelo modelo Schumacher & Hall, fator de forma e polinômio

de 5º grau não obtiveram grandes diferenças quando comparados com os volumes reais. O maior desvio relativo em relação à média considerada paramétrica foi observado para o método que utiliza o fator de forma (6,6%), enquanto o menor adveio do modelo de Schumacher & Hall (0,2%).

Entretanto, a distribuição gráfica dos resíduos (Figura 2) evidenciou leve tendência e problemas de heterocedasticidade da variância dos resíduos na aplicação do polinômio de 5º grau e do fator de forma para as estimativas volumétricas (Figura 2D e 2B). Já o modelo de Schumacher & Hall ajustado e o método dos dois diâmetros, apresentaram resíduos distribuídos de forma homogênea ao longo da linha de regressão e menor tendenciosidade nas estimativas indicando assim um bom ajustamento desses dois métodos para a estimativa do volume (Figura 2A e 2C).

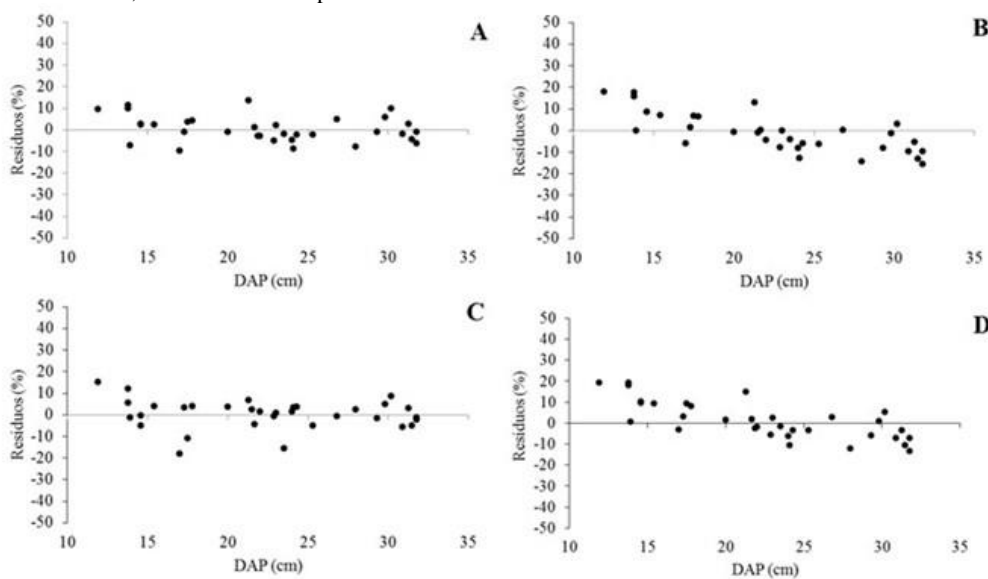


Figura 2. Gráficos de distribuição dos resíduos gerados pelo modelo de Schumacher & Hall (A), fator de forma (B), método dos dois diâmetros (C) e polinômio de 5º grau (D).

Discussão

Fator de forma

O fator de forma obtido nessa pesquisa (0,4530) é inferior ao reportado por Atanazio et al. (2018), que encontraram valor médio de 0,50 para o fator de forma artificial de *Pinus taeda* de 10 anos de idade com densidade inicial de plantio de $1.666 \text{ árv. ha}^{-1}$. Kohler (2013) reporta valores mais próximos aos do presente estudo ao determinar o fator de forma de *Pinus taeda* com 8 anos de idade em Santa Catarina e no Paraná, inferindo valores médios de 0,443 e 0,471 para os povoamentos estudados nesses estados, respectivamente.

Equações de volume

Nesse estudo, os valores do Índice de Ajuste de Schlaegel tiveram pequena variação entre os modelos (Tabela 2), não servindo assim como critério esclarecedor para a seleção do melhor modelo. Silva et al. (2011) também reportam baixa variação no Índice de Ajuste de Schlaegel ao avaliarem funções de afilamento para estimativas de volume total de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, com valores variando de 0,96 a 0,98. De acordo com esses autores, esses valores evidenciam que os modelos proporcionaram ajustes satisfatórios, o que também vale para o presente estudo.

Em estudo de povoamentos de *Pinus oocarpa* de diferentes idades, Machado et al. (2002), encontraram valores de coeficiente de determinação e erro padrão da estimativa relativo variando, respectivamente, entre 0,88 a 0,99 e 5,7% a 14,7%. Para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na região do Distrito Federal, Moraes Neto (2009), cita valores similares para o coeficiente de determinação, já para o erro padrão da estimativa relativo os valores foram inferiores, variando entre 3,4% e 5,7%. Os resultados encontrados no presente estudo são equivalentes aos encontrados na literatura, onde os povoamentos de idades distintas apresentam maior variação dos parâmetros de ajuste, quando comparados a povoamentos equiâneos.

O modelo de Schumacher & Hall foi selecionado por meio das estatísticas de ajuste e análise residual como o modelo mais eficaz para a estimativa volumétrica da espécie em questão, cabendo ressaltar a eficiência e bom desempenho do modelo de Spurr. Esses resultados são corroborados por Pertille et al. (2018), que obtiveram maiores coeficientes de determinação ajustado e erro padrão da estimativa para esses modelos, ao avaliarem o ajuste de diversos modelos para estimativas volumétricas de diferentes classes de idade de *Pinus taeda* no Paraná.

Machado et al. (2002) citam que o modelo de Schumacher & Hall apresenta eficiência ao estimar

volume para diversas espécies florestais. Esse modelo é citado por diversos autores na literatura florestal como responsável pela obtenção de resultados satisfatórios em estimativas volumétricas em: *Araucaria angustifolia* (Schneider e Finger 2000; Oliveira et al. 2011); *Mimosa scabrella* (Machado et al. 2008); *Eucalyptus urophylla* (Miguel 2009); e *Pinus taeda* (Pertille et al. 2018).

Modelos com duas variáveis independentes como Schumacher & Hall e Spurr são apontados na ciência florestal como mais eficientes, visto que resultam em estimativas mais precisas e não tendenciosas e em muitos casos estimam com precisão volumes de árvores com pequenos diâmetros (Guimarães e Leite 1996; Campos e Leite 2009; Pertille et al. 2018).

Para espécies do mesmo gênero, Moraes Neto (2009) cita o modelo de Meyer (3º no ranking do presente estudo) como o melhor para a estimativa do volume com e sem casca de *P. caribaea* var. *hondurensis*. O mesmo autor cita os modelos de Schumacher & Hall e de Spurr (1º e 2º respectivamente no presente estudo), como razoáveis para a estimativa do volume sem casca da espécie estudada por eles. Machado et al. (2002) para *P. oocarpa* também cita o modelo de Meyer como o melhor. Em seu estudo, o modelo de Spurr apresentou os melhores valores do coeficiente de determinação ajustado, perdendo posição no ranking quando computados os valores do erro padrão da estimativa relativo.

Funções de afilamento

Para Chichorro et al. (2003) os modelos de taper que geram melhores ajustes para afilamento e volume são obtidos para florestas onde existe maior regularidade no perfil do fuste e nas dimensões dos troncos. No trabalho de Santos et al. (2019), que avaliaram as estimativas volumétricas em povoamentos de *Pinus taeda* com idades de 7 a 10 anos em dois sítios florestais, o polinômio de 5º grau apresentou resultados satisfatórios com coeficiente de determinação ajustado e erro padrão da estimativa relativo variando de 0,989 a 0,990 e 6,11% a 6,47%, respectivamente.

Esses autores reportam vantagem na utilização de funções de afilamento quando os povoamentos são manejados para multiprodutos, devido à possibilidade de determinação do volume por sortimento, que é uma informação importante para o planejamento florestal. No entanto, apesar do polinômio do 5º grau representar bem o perfil da árvore, o mesmo não representa bem a porção inferior da árvore, uma vez que ocorrem maiores irregularidades na forma e sinuosidade na base da árvore (Machado et al. 2004).

Yoshitani Júnior et al. (2012) avaliando funções de afilamento para povoamentos desbastados de *Pinus taeda*, encontraram para o mesmo modelo, coeficiente de determinação ajustado de 0,973 e erro padrão da estimativa relativo igual a 8,1 na descrição do perfil do fuste. Para a estimativa do volume, esses autores encontraram valores de erro padrão da estimativa relativo superiores (11,8%), o qual pode ser considerado próximo ao do presente estudo. Cabe ressaltar que esse método, apesar de oferecer estatísticas de ajuste aceitáveis, apresenta maior complexidade no ajuste para obtenção das estimativas.

Método dos dois diâmetros

A análise de correlação permite diagnosticar que o efeito da forma da base da árvore reduziu a precisão das estimativas, sendo verificados os piores ajustes nas seções

mais próximas ao nível do solo, conforme foi constatado por Franco et al. (1997) que estudaram a aplicação do método para estimativas volumétricas em *Eucalyptus camaldulensis*. Corroborando aos resultados do presente estudo, Thiersch et al. (2006) inferiram que as melhores estimativas foram apresentadas quando o segundo diâmetro foi tomado nas porções superiores das árvores, em dois clones de *Eucalyptus* spp. Adicionalmente, Sanquetta et al. (2015) ao estudarem metodologias para determinação de estimativas volumétricas para *Tectona grandis*, atestam que o método dos dois diâmetros com o uso do DAP e do diâmetro do fuste aos 2m, produziu estimativas mais precisas quando comparados com os modelos clássicos usados em modelagem do volume, além disto, este método mostrou-se uma opção viável e precisa para estimação do volume individual de árvores.

Comparação dos métodos de estimativa de volume

Apesar do fator de forma ter apresentado desempenho satisfatório nesse trabalho, cabe ressaltar que estimativas obtidas por meio desse método podem gerar resultados imprecisos e viesados, conforme reportado por Pertille et al. (2018). No entanto, em situações em que não há grande necessidade de precisão das estimativas, o fator de forma artificial é um método de simples aplicação para estimativas volumétricas e que pode retornar resultados satisfatórios.

Stepka et al. (2017) inferem melhor desempenho dos modelos volumétricos em relação às funções de afilamento para estimativas do volume total em *Pinus taeda*, apesar de não fornecerem o volume por sortimento. Os resultados desses autores corroboram os do presente estudo, indicando superioridade do modelo Schumacher & Hall para essas estimativas.

Testando a metodologia dos dois diâmetros para estimativa do volume total e comercial, com e sem casca de *Eucalyptus camaldulensis*, Franco et al. (1997) verificaram que a mesma forneceu estimativas confiáveis. Esses autores ressaltam ainda, que o método é de fácil trabalhabilidade, porém, menos eficiente que as técnicas que se baseiam nas variáveis diâmetro e altura, como o modelo de Schumacher & Hall. Já Thiersch et al. (2006) avaliando a acurácia dos métodos para estimativa volumétrica de clones de *Eucalyptus* sp., mencionam que o método dos dois diâmetros não deve ser utilizado quando existe a necessidade de alta precisão nas estimativas.

A metodologia dos dois diâmetros se mostrou promissora para estimativas volumétricas para a espécie e idade estudada, surgindo como alternativa para tal finalidade, sem a medição das alturas das árvores. Segundo Sanquetta et al. (2014), a medição da altura encarece o inventário florestal, estando sujeita a erros, os quais podem ser propagados para as estimativas volumétricas. Entretanto, a popularização do uso de um procedimento metodológico não depende apenas da melhor performance estatística, mas de sua praticidade e simplicidade (Sanquetta et al. 2015). Portanto, considerando o potencial dessa metodologia, sugerem-se estudos que avaliem a operacionalidade (rendimentos e custos) do método à campo confrontando-as aos métodos tradicionalmente utilizados.

Conclusão

Todos os métodos estudados apresentam desempenho satisfatório para estimativas volumétricas em *Pinus patula* com 9 anos de idade. Cabe ressaltar, que o modelo Schumacher & Hall e o método dos dois diâmetros com o

uso dos diâmetros do fuste à 1,3 m e 2 m são mais precisos e menos tendenciosos em relação aos demais estudados para essa finalidade.

Referências

- Aguiar AV, Sousa VA, Shimizu JY (2011) Espécies de *Pinus* mais plantadas no Brasil. Embrapa florestas. Disponível em: https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducaolf6_1galceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-3&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=3715&p_r_p_-996514994_topicoId=3228. Acesso em: 05 mai. 2017.
- Atanzio KA, Vuaden E, Krefta SM, Klein DR, Schorr LPB, Cuchi T, Souza IA, Gorenstein MR, Pereira HML (2018) Fator de forma artificial para *Pinus taeda* L. em um povoamento localizado em Enéas Marques, PR. *Acta Biológica Catarinense* 5(1): 65-71.
- Cabacinha CD (2003) Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a cubagem rigorosa. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Lavras: UFLA. 136 p.
- Campos JCC, Leite HG (2009). Mensuração florestal: perguntas e respostas. 3 ed. Viçosa: Editora UFV, 542 p.
- Chichorro JF, Resende JLP, Leite HG (2003) Equações de volume e de taper para quantificar multiprodutos da madeira em floresta Atlântica. *Revista Árvore* 27 (6): 799-809.
- Dvorak WS, Gutiérrez EA, Garape WJ, Hodge GR, Osorio LF, Beser C (2000) *Pinus patula*. In: Conservation and testing of tropical and subtropical forest tree species by the CAMCORE Cooperative. *Annals... Raleigh: NCSU*. pp. 149-173.
- Ferreira DF (2005) Estatística Básica. Lavras: Editora UFLA. 664 p.
- Figueiredo Filho A, Borders BE, Hitch KL (1996) Taper equations for *Pinus taeda* in southern Brazil. *Forest Ecology and Management* 83(1-2): 39-46.
- Franco EJ, Scolforo JRS, Mello JM, Oliveira AD (1997) Eficiência dos métodos para estimativa volumétrica de *Eucalyptus camaldulensis*. *Cerne* 3(1): 82-116.
- Franco EJ, Scolforo JRS, Mello JM, Lima JT (1998) Eficiência na estimativa do peso seco para árvores individuais e definição do ponto ótimo de amostragem para determinação da densidade básica *Eucalyptus camaldulensis*. *Ciência Florestal* 8(1): 77-99.
- Guimarães DP, Leite HG (1996) Influência do número de árvores na determinação de equação volumétrica para *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis*, 50: 37-42.
- Hiramatsu NA (2008) Equações de volume comercial para espécies nativas na região do vale do Jari, Amazônia Oriental. Dissertação, Universidade Federal do Paraná, 107p.
- Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2017) Relatório 2017. Brasil: IBÁ. 80p. Disponível em: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf. Acesso em: 21 mar. 2018.
- Kohler SV (2013) Evolução do afilamento do tronco e do sortimento em plantios de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Curitiba: UFPR. 88 p.
- Liebsch, D, Mikich SB (2017) Damage caused by brown-capuchin monkeys to nine *Pinus* species and implications for forest management. *Floresta* 47(1): 37-42.
- Machado SA, Conceição MB, Figueiredo DJ (2002) Modelagem do volume individual para diferentes idades e regimes de desbaste em plantações de *Pinus oocarpa*. *Ciências Exatas e Naturais* 4(2): 185-196.
- Machado AS, Urbano E, Conceição MB, Figueiredo Filho A, Figueiredo DJ (2004) Comparação de modelos de afilamento do tronco para diferentes idades e regimes em plantações de *Pinus oocarpa* Schiede. *Boletim de Pesquisa Florestal*, 48: 41-64, jan./jun..
- Machado SA, Figura MA, Silva LCR, Téo SJ, Stolle L, Urbano E (2008) Modelagem volumétrica para bracatinga (*Mimosa scabrella*) em povoamentos da Região Metropolitana de Curitiba. *Pesquisa Florestal Brasileira* 56: 17-19.
- Miguel EP (2009) Desenvolvimento de equações hipsométricas e volumétrica para estimar o volume total e comercial de *Eucalyptus urophylla* na região norte do estado de Goiás. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Curitiba: UFPR. 161 p.
- Moraes Neto SP (2009) Estimativa de volume de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* no Cerrado do Distrito Federal, DF. Planaltina/DF: Embrapa Cerrados. 16 p. (Comunicado técnico).
- Oliveira MF, Mattos PP, Braz EM, Rosot MAD, Santos WC (2011) Equação de volume para um plantio de *Araucaria angustifolia* em Rio Negro, PR. Colombo: Embrapa. 4p. (Comunicado técnico, 275).
- Prodan M, Peters R, Cox F, Real P (1997) Mensura florestal. San José: GTZ-IICA.
- Pertille CT, Sanquetta CR, Nicoletti MF, Topanotti LR (2018) Volume prediction through form factor and regression models by age class for *Pinus taeda* L. *Advances in Forestry Science* 5(3): 431-436.
- Sanquetta MNI, Sanquetta CR, Corte APD, Mognon F, Behling A (2014) Incremento diamétrico e percentuais de cerne e de casca em povoamentos de *Tectona grandis* L.f. no sudeste do Pará. *Enciclopédia Biosfera* 10(18): 1946-1954.
- Sanquetta MNI, Sanquetta CR, Dalla Corte AP, Rodrigues AL, Maas GCB (2015) Contribuição de um segundo diâmetro na estimação de volume individual de plantios jovens de *Tectona grandis* L.f. *Revista Agro@mbiente On-Line* 9(4): 446-454.
- Schneider PR, Finger CAG (2000) Manejo sustentado de florestas ineqüiâneas heterogêneas. Santa Maria: UFSM. 195 p.
- Schröder T, Hoíço NAS, Zimmermann APL, Pereira LD, Rocha Júnior DS, Mever FA, Fleig FD (2013) Métodos de estimativa de volume comercial para *Eucalyptus grandis*: especificidades e recomendações. *Pesquisa Florestal Brasileira* 33(73): 1-7.

Santos RMM, Dias NA, Arce JE, Martarello V, Serpe EL, Stepka TF, Lisboa GS (2019) Modelos de volume e afilamento para florestas *Pinus taeda* L.. BIOFIZ Scientific Journal 4(1): 35-42.

Silva F, Dalla Corte AP, Sanquetta CR (2011) Equações de afilamento para descrever o volume total do fuste de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na região do Triângulo Mineiro. Scientia Forestalis 39(91): 367-376.

Silva JAA, Borders BE (1993) A tree volume equation based on two lower, stem diameters for Loblolly Pine in the Southeastern United States. Southern Journal of Applied Forestry 17(4): 160-162.

Silva JAA, Paula Neto F (1997) Princípios básicos de dendrometria. Recife: Imprensa Universitária da UFRPE. 185 p.

Stepka TF, Zenv Junior GA, Lisboa GS, Cerqueira CL, Pesck VA, Roik M (2017) Modelos volumétricos e funções de afilamento para *Pinus taeda* L. na região dos Campos Gerais, Paraná, Brasil. Espacios 38(21): 26-34.

Thiersch CR, Scolforo JRS, Oliveira AD, Maestri R, Dehon G (2006) Acurácia dos métodos para estimativa do volume comercial de clones de *Eucalyptus* sp. Cerne 12(2): 167-181.

Valera FP, Kageyama, PY (1991) *Pinus patula* Schiede & Deppe. Humlebaek, Denmark: Danida Forest Seed Centre. 36 p.

Yoshitani Júnior M; Nakajima NY; Arce JE; Machado SA; Druszcz JP; Hosokawa RT; Mello AA (2012). Funções de afilamento para plantios desbastados de *Pinus taeda*. Floresta 42(1): 169-176.