

ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL DE *Pinus taeda* L.: ESTIMADOR POR RAZÃO VERSUS MODELO DE SCHUMACHER- HALL

STEM VOLUME PREDICTION FOR *Pinus taeda* L.: RATIO ESTIMATES VS. SCHUMACHER- HALL MODEL

Lorena Stolle¹, Ana Paula Dalla Corte¹, Carlos Roberto Sanquetta¹, Alexandre Behling¹

¹Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, lorenastolle@yahoo.com.br,
anapaulacorte@gmail.com, carlossanquetta@gmail.com, alexandre.behling@yahoo.com.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar se o desempenho da estimativa do volume individual para *Pinus taeda* L. por um estimador por razão apresenta melhores resultados em comparação com a estimativa obtida pelo modelo volumétrico de Schumacher-Hall. Foram utilizados dados de cubagem de 200 árvores, com idades que variaram de 5 a 18 anos, com diâmetros de 6,3 a 38,9 cm e altura total de 6,4 a 25,5 m. As estimativas do volume individual foram avaliadas e comparadas entre si por meio da análise gráfica dos resíduos, viés, erro médio absoluto, erro quadrático médio, raiz quadrada do erro quadrático médio, raiz quadrada do erro quadrático médio em porcentagem e pseudo-coeficiente de determinação. O método do estimador por razão apresentou RMSE de 10,7% e um viés de -0,002. O modelo de Schumacher-Hall apresentou RMSE de 10,0% e um viés de 0,001. A análise gráfica dos resíduos mostrou que os dois métodos tiveram comportamentos semelhantes, com resíduos bem distribuídos, porém com tendência em subestimar as árvores de maior volume. Com o conjunto de dados utilizados neste trabalho, os dois métodos avaliados para a estimativa do volume individual de *Pinus taeda* obtiveram resultados satisfatórios. No entanto, o modelo de Schumacher-Hall apresentou um desempenho ligeiramente superior.

PALAVRAS-CHAVE: **Fator de forma, Modelos de volume, Volumetria.**

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate and compare the performance of the individual volume estimate for *Pinus taeda* L. by a ratio estimator and by the Schumacher-Hall model. Log scaling data from 200 trees were used with ages ranging from 5 to 18 years, diameters from 6.3 to 38.9 cm and total height from 6.4 to 25.5 m. Statistics (bias, mean absolute error, mean square error, root mean squared error, root mean squared error in percentage, pseudo-determination coefficient) and residual analysis were used to judge estimation methods. The ratio estimate presented a RMSE of 10.7% and a bias of -0.002. The Schumacher-Hall model presented a RMSE of 10.0% and a bias of 0.001. The residual graph analysis showed that the two methods had similar behaviors with well-distributed residuals, but with a tendency to underestimate the trees of greater volume. Estimating the individual volume by the ratio estimate and the Schumacher-Hall model was satisfactory. However, the Schumacher-Hall model performed slightly better.

KEYWORDS: **Form fator, volume model, volumetry.**

INTRODUÇÃO

As florestas plantadas são uma alternativa sustentável para suprir a demanda de produtos madeireiros (NEPAL et al., 2019), contribuindo para a conservação dos recursos naturais e na mitigação das mudanças climáticas (BUONGIORNO & ZHU, 2014; GOGOI et al., 2021). Os dados mais atuais mencionam que as plantações florestais ocupam cerca de 294 milhões de hectares no mundo (FAO, 2020) e mais de 9 milhões de hectares produtivos no Brasil (IBÁ, 2020).

No sul do Brasil, as plantações de pinus são formadas por extensas áreas, manejadas por empresas florestais (COUTINHO MENEGUZZI et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2018), as quais necessitam de informações confiáveis da sua produção para o planejamento operacional de suas atividades (GREEN et al., 2020).

O volume de uma população florestal não pode ser obtido por medições diretas, mas pode ser estimado por inferência estatística (amostragem) e análise de regressão (AVERY & BURKHART, 2015).

A estimativa do volume individual de *Pinus taeda* tem sido estudada por muitos pesquisadores. No sul do Brasil, um dos primeiros trabalhos foi realizado com o ajuste de modelos volumétricos para a construção de tabelas de volume para idades de 5 a 18 anos (MACHADO, 1979). Os métodos de estimativa mais utilizados são por modelos de afilamento (FIGUEIREDO-FILHO et al., 1996; KOHLER et al., 2016; SANTOS et al., 2019), modelos volumétricos e fator de forma (PERTILLE et al., 2018; SANQUETTA et al., 2017; SANTOS et al., 2019).

Destaca-se que, quando avaliado, o método de estimativa pelo modelo de Schumacher-Hall obteve os melhores resultados para a maioria dos trabalhos (KOHLER et al., 2016; MÔRA et al., 2014; PERTILLE et al., 2018; SANTOS et al., 2019).

Do mesmo modo, estimativas realizadas com fator de forma também apresentaram resultados satisfatórios (KOHLER, 2017; SANQUETTA et al., 2017). O fator de forma pode ser considerado como um estimador por razão, pois ele é obtido pelo quociente do volume da árvore e do volume do cilindro (PÉLLICO NETTO & BEHLING, 2019a). O fator de forma obtido pelo estimador por razão deve resultar na melhor resposta ao volume da árvore, pois a sua forma está associada a uma variável (diâmetro a altura do peito) com alta correlação com o fator de forma e com o volume (PÉLLICO NETTO & BEHLING, 2019a).

Os resultados da aplicação de estimadores por razão para a estimativa do volume individual da acácia negra mostraram melhor acurácia, quando comparado ao

modelo de Schumacher-Hall (PÉLLICO NETTO & BEHLING, 2019a). Pesquisas atuais mostraram a melhor performance ao se utilizar estimadores por razão na estimativa da biomassa de florestas nativas no sul do Brasil (TRAUTENMÜLLER, 2019; TRAUTENMÜLLER, 2023), da biomassa de *Pinus* spp. (NHADUCO, 2019), da biomassa da acácia negra (PÉLLICO NETTO & BEHLING, 2019b) e do volume comercial em espécies da Floresta Amazônica (CIARNOSCHI, 2020).

O objetivo deste trabalho foi avaliar se o desempenho da estimativa do volume individual para *Pinus taeda* por um estimador por razão apresenta melhores resultados em comparação com a estimativa obtida pelo modelo volumétrico de Schumacher-Hall.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo foram utilizados dados de cubagem obtidos em plantações de *Pinus taeda* L., localizadas em Telêmaco Borba – PR, Brasil. Esta região encontra-se aproximadamente a 797 m de altitude, em região de clima Cfb, caracterizado como clima subtropical úmido, sem estação seca definida, com uma temperatura média anual de 18°C e precipitação anual de 1.440 mm (ALVARES et al., 2013).

Foram cubadas 200 árvores com idades que variaram de 5 a 18 anos, com diâmetros de 6,3 a 38,9 cm e altura total de 6,4 a 25,5 m (Tabela 1).

Tabela 1. Resumo estatístico das árvores cubadas para a modelagem volumétrica de *Pinus taeda* na região de Telêmaco Borba-PR.

Variáveis	n	min.	máx.	média	Desv. padrão
d	200	6,3	38,9	23,5	5,10
h	200	6,4	25,5	15,6	3,58
v	200	0,0106	1,3242	0,3325	0,2027

d: diâmetro a 1,30 m de altura (cm), h: altura total (m), v: volume (m³), n: número de árvores cubadas, min.: valor mínimo, máx.: valor máximo.

Os gráficos box-plot (Figura 1) das variáveis d (diâmetro a 1,30m de altura), h (altura total) e v (volume) mostraram uma distribuição mais simétrica para a variável d e uma leve assimetria a esquerda para a variável v, indicando uma maior concentração dos dados em árvores com menores volumes.

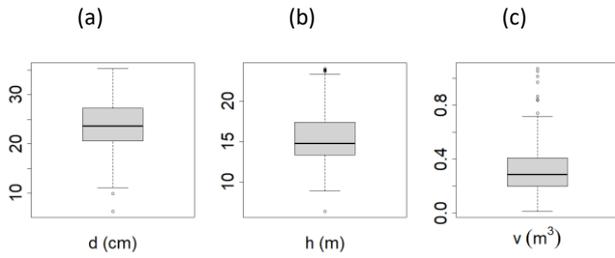


Figura 1. Box-plot das variáveis d (a), h (b) e v (c) das árvores cubadas de *Pinus taeda* na região de Telêmaco Borba-PR.

O método de cubagem utilizado foi o de Smalian, no qual foram tomadas medidas nas alturas: 0,0 m; 0,7 m; 1,30 m e a cada 2 metros até chegar na altura total. O volume de cada seção foi calculado na Equação (1), onde v = volume da seção (m^3), \bar{d} = diâmetro médio (m) tomados nas extremidades das seções e L = comprimento da seção (m). O volume da última seção foi calculado pela fórmula do cone. O volume total da árvore foi obtido pela soma dos volumes de todas as seções.

$$v = \frac{\pi}{4} \bar{d}^2 L \quad (1)$$

As estimativas do volume individual foram avaliadas e comparadas entre si por dois métodos: fator de forma pelo estimador por razão e, pelo modelo de Schumacher-Hall.

No método pelo estimador por razão (COCHRAN, 1977; PÉLLICO NETTO & BEHLING, 2019a) o volume individual (\hat{y}) foi estimado em função do produto do volume do cilindro por um fator de forma (2), sendo este fator de forma ($f = \hat{R}$) determinado pela razão da média do volume observado (árvores cubadas) e da média do volume do cilindro das respectivas árvores (3). Onde: \hat{y} = volume individual estimado (m^3); x_i = volume do cilindro (m^3) das i -ésimas árvores cubadas; $\hat{R} = f$ = fator de forma pelo estimador por razão; \bar{y}_i = média dos volumes individuais das i -ésimas árvores cubadas (m^3); \bar{x}_i = média dos volumes dos cilindros correspondentes as i -ésimas árvores cubadas (m^3).

$$\hat{y} = \frac{\pi}{4} d^2 h f = x_i \hat{R} \quad (2)$$

$$f = \hat{R} = \frac{\bar{y}_i}{\bar{x}_i} \quad (3)$$

A vantagem de se utilizar este método incide sobre o fato de que a alta correlação entre as duas variáveis (Y_i e X_i) proporcionam um estimador com elevada precisão, pois a razão Y_i/X_i é praticamente a mesma em todas as unidades amostrais e os valores Y_i/X_i variam muito pouco

de uma amostra para outra (COCHRAN, 1977).

As estimativas da variância (4; 8), erro padrão (5; 9), intervalo de confiança (6; 10) e o erro relativo de amostragem (7; 11) do fator de forma, representado pelo estimador de razão (\hat{R}), e do volume individual estimado (\hat{y}) foram calculados de acordo com Cochran (1977) e Péllico Netto & Behling (2019b). Onde: n = número de árvores cubadas, t = valor t de Student, \hat{R} = estimador de razão, x_i = volume do cilindro das i -ésimas árvores cubadas (m^3), y_i = volume individual das i -ésimas árvores cubadas (m^3), \bar{x} = média dos volumes dos cilindros das árvores cubadas (m^3), \hat{y} = média do volume individual estimado (m^3).

$$S_{\hat{R}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{R}x_i)^2}{(n-1)} \quad (4)$$

$$S_{\hat{R}} = \frac{1}{\sqrt{n\bar{x}}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - 2\hat{R} \sum_{i=1}^n y_i x_i + \hat{R}^2 \sum_{i=1}^n x_i^2}{(n-1)}} \quad (5)$$

$$IC \left[\hat{R} \pm t \sqrt{S_{\hat{R}}^2} \right] \quad (6)$$

$$E_{\hat{R}} = \frac{t S_{\hat{R}}}{\hat{R}} 100 \quad (7)$$

$$S_{\hat{y}}^2 = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{R}x_i)^2 \quad (8)$$

$$S_{\hat{y}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n y_i^2 - 2\hat{R} \sum_{i=1}^n y_i x_i + \hat{R}^2 \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (9)$$

$$IC \left[\hat{y} \pm t \sqrt{S_{\hat{y}}^2} \right] \quad (10)$$

$$E_{\hat{y}} = \frac{t S_{\hat{y}}}{\hat{y}} 100 \quad (11)$$

Os volumes estimados pelo modelo de Schumacher-Hall (12) foram corrigidos pelo fator de correção de Meyer (13) devido à discrepância logarítmica. O teste t -Student ($\alpha = 0,05$) foi utilizado para avaliar a significância dos coeficientes da regressão, e o teste F ($\alpha = 0,05$) da análise de variância foi utilizado para verificar a existência de relação (regressão) entre o volume e as variáveis independentes do modelo.

$$v = e^{(\beta_0 + \beta_1 \ln(d) + \beta_2 \ln(h))} + \varepsilon \quad (12)$$

$$FCM = e^{0,5s_y x^2} \quad (13)$$

Onde: $e = 2,718281828$; d = diâmetro (cm) a 1,30 m de

altura; h = altura total (m); β_0 , β_1 e β_2 são os coeficientes do modelo; ε o erro aleatório proveniente do método de estimativa; $syx = \frac{\sum(v-\hat{v})^2}{n-p}$, v = volume observado (m³); \hat{v} = volume estimado (m³); n = número de árvores; p = número de coeficientes do modelo.

Os resíduos da regressão linear foram avaliados quanto às pressuposições (DRAPER & SMITH, 1998) de normalidade (Shapiro-Wilk, $\alpha=0,05$), autocorrelação (Durbin Watson, $\alpha=0,05$) e homocedasticidade (Breusch-Pagan, $\alpha=0,05$). Os testes foram realizados no ambiente estatístico R, versão 4.0.2., com as respectivas funções e pacotes: shapiro.test (stats), durbinWatsonTest (car) e bptest (lmtest) descritos em Souza et al. (2018).

A presença de multicolinearidade foi analisada por meio do fator de inflação da variância (VIF - variance inflation factor), onde utilizou-se a função vif() do pacote faraway (SOUZA et al., 2018) no ambiente estatístico R, versão 4.0.2. Já o ajuste do modelo e os cálculos das estatísticas de ajuste foram realizadas no software Excel.

Os resultados do ajuste dos dois métodos foram avaliados e comparados entre si por meio da análise gráfica dos resíduos (14), viés (15), erro médio absoluto (MAE) (16), erro quadrático médio (MSE) (17), raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) (18), raiz quadrada do erro quadrático médio em porcentagem (RMSE%) (19) e pseudo-coeficiente de determinação, o qual é dado pelo quadrado do coeficiente de correlação linear de Pearson (20) entre os valores observados e estimados. Onde: v = volume observado (m³); \hat{v} = volume estimado (m³); n = número de árvores e \bar{v} = volume observado médio (m³).

$$res\acute{u}duos (\%) = \frac{(v-\hat{v})}{v} 100 \quad (14)$$

$$Vi\acute{e}s = \frac{\sum(v-\hat{v})}{n} \quad (15)$$

$$MAE = \frac{\sum(|v-\hat{v}|)}{n} \quad (16)$$

$$MSE = \frac{\sum(v-\hat{v})^2}{n} \quad (17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(v-\hat{v})^2}{n}} \quad (18)$$

$$RMSE (\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum(v-\hat{v})^2}{n}}}{\bar{v}} \quad (19)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum((v-\bar{v})(\hat{v}-\bar{\hat{v}}))}{\sqrt{(\sum(v-\bar{v})^2 \sum(\hat{v}-\bar{\hat{v}})^2)}} \right)^2 \quad (20)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O fator de forma obtido pelo estimador por razão foi de 0,455 ($\pm 0,093$) conferindo um volume médio individual estimado de 0,3325 m³ ($\pm 0,00655$) e um erro de amostragem relativo de 1,97%.

Os resultados foram próximos aos citados na literatura, tais como um fator de forma de 0,47 para plantações de *Pinus taeda* com idades que variaram de 5 a 15 anos (KOHLE et al., 2016; SANQUETTA et al., 2017), e um volume médio individual de 0,327 m³, para árvores com diâmetro médio de 24 cm e altura média de 16 m, nesta mesma região de estudo (MACHADO, 1979).

A correlação entre as variáveis d, h, v, d²h e f são apresentadas na Tabela 2. A correlação significativa mais forte foi da variável volume com d²h e a mais fraca foi com a variável fator de forma (f).

Tabela 2. Matriz de correlação entre as variáveis d, h, v, d²h e f para árvores de *P. taeda* na região de Telêmaco Borba.

Variáveis	d	h	v	d ² h
h	0,49			
v	0,84*	0,78		
d ² h	0,89*	0,76	0,98*	
f	-0,16*	0,23	0,20*	0,04*

*significativo através do teste t-Student ao nível de 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$).

A alta correlação linear significativa do volume com a variável d²h evidencia a vantagem do estimador de razão, uma vez que no modelo adotado neste estudo, o volume é estimado em função desta variável.

No ajuste do modelo de Schumacher-Hall todos os coeficientes foram significativos (p-value < 0,01), o valor de F calculado foi maior que o F crítico e a significância do valor de F (<0,01) indicaram a existência de regressão entre as variáveis dependente e independentes (Tabela 3).

Tabela 3. Resultados estatísticos e coeficientes de ajuste do modelo de Schumacher-Hall para árvores de *P. taeda* na região de Telêmaco Borba.

Coefficientes	valor p	F	Sig. F
$\beta_0 =$	2,71E-188		
-10,2346**			
$\beta_1 =$	5,66E-139	5.905,4	1,51E-1
1,867250**			
$\beta_2 =$	5,48E-93		
1,141948**			

**significativo através do teste t-Student ao nível de 1% de probabilidade ($p \leq 0,01$). F crítico = 3,04

A análise dos resíduos da regressão (Figura 2) atendeu a todas as suas suposições fundamentais, ou seja, apresentaram distribuição normal (p-value >0,05) no teste de Shapiro-Wilk e o teste Breusch-Pagan ($\alpha = 0,05$) apontou homocedasticidade das variâncias (p-value >0,05).

O teste Durbin-Watson ($\alpha = 0,05$) mostrou que não há indícios de autocorrelação dos resíduos (Levine et al., 2005), com p-value > 0,05 (D-W Statistic = 1,9246; p-value = 0,526).

A falta de ajuste de um modelo, expressos pelos resíduos da regressão, pode ocasionar em estimativas enviesadas ou inconsistentes (GARCÍA-ESPINOZA et al., 2018), pois quando o modelo proposto é correto, a média dos quadrados dos resíduos é um estimador sem viés da verdadeira variância (AMADOR et al., 2011).

A multicolinearidade foi analisada por meio da estatística *Variance Inflation Factor* – (VIF), onde um VIF > 10 é utilizado como critério para afirmar a existência de multicolinearidade no modelo de regressão linear múltipla (SOUZA et al., 2018). Neste estudo não foi detectado indícios de multicolinearidade entre as variáveis do modelo que apresentou VIF = 1,3489.

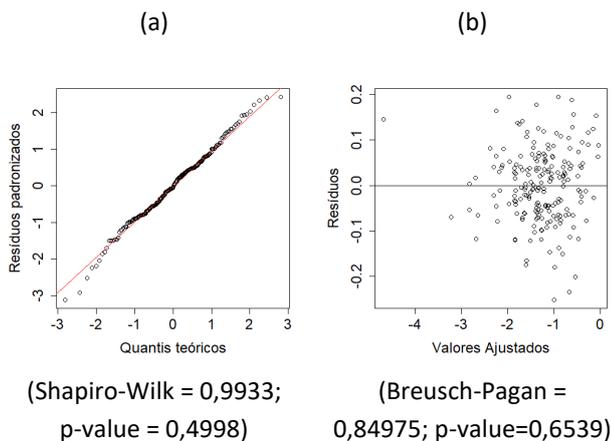


Figura 2. Gráficos dos resíduos da regressão (escala logarítmica): a) Quantil-quantil e b) Resíduos versus valores ajustados para árvores de *P. taeda* na região de Telêmaco Borba-PR.

As estatísticas de precisão mostraram que, quanto à diferença entre os valores observados e estimados, os dois métodos se mostraram similares, com RMSE muito próximos entre si, e uma ligeira superioridade do modelo de Schumacher-Hall com RMSE% de 10,0% (Tabela 4).

Tabela 4. Estatísticas de precisão do volume individual estimado pelo método do estimador por razão e pelo modelo de Schumacher-Hall para árvores de *P. taeda* na região de Telêmaco Borba-PR.

Estatísticas	Estimador por razão	Schumacher-Hall
Viés (m ³)	-0,002	0,001
MAE (m ³)	0,024	0,022
MSE (m ³)	0,00126	0,00109
RMSE (m ³)	0,036	0,033
RMSE (%)	10,7	10,0
R ²	0,97	0,97

Onde: MAE = erro médio absoluto, MSE = erro quadrático médio, RMSE = raiz quadrada do erro quadrático médio, RMSE (%) = raiz quadrada do erro quadrático médio em porcentagem e R² = pseudo-coeficiente de determinação.

Dentre os modelos matemáticos testados para estimativa do volume individual, o modelo de Schumacher-Hall é um dos modelos de dupla entrada mais utilizados (COSENZA et al., 2018; KOHLER, 2017; PERTILLE et al., 2018; RODRIGUES et al., 2017; SANTOS et al., 2019), normalmente com boa performance de estimativa (RMSE entre 9 e 12%).

Em relação ao estimador por razão, os resultados estatísticos da estimativa do volume para acácia negra (PÉLLICO NETTO & BEHLING, 2019a) também apresentaram valores de RMSE próximos - quando comparados ao modelo de Schumacher-Hall. Porém o estimador de razão obteve menor viés para as idades de até 1,83 anos e o modelo de Schumacher-Hall para as idades acima de dois anos (PÉLLICO NETTO & BEHLING, 2019a).

Os mesmos autores puderam concluir que o estimador por razão é um modelo simples, resultando em estimativas não enviesadas dos resíduos, e é tão bom ou até melhor do que os modelos ajustados por análise de regressão.

Uma das vantagens apontadas ao se utilizar o fator de forma, é que ele é um método simples e robusto, sendo o seu uso muito indicado (SANQUETTA et al., 2016; SANQUETTA et al., 2017).

Neste trabalho, o método do estimador por razão apresentou viés negativo, indicando em média uma superestimativa do volume individual, e o modelo de Schumacher-Hall apresentou um viés positivo. Resultados semelhantes foram encontrados na literatura quando o modelo de regressão de Schumacher-Hall foi comparado à estimativa dos volumes individuais de *P. taeda* pelo fator forma (KOHLER, 2017; PERTILLE et al., 2018).

A análise gráfica dos resíduos (Figura 3) mostrou que os dois métodos tiveram comportamentos semelhantes, com

resíduos bem distribuídos, porém com tendência em subestimar as árvores de maior volume, tais como observados por (KÖHLER, 2017).

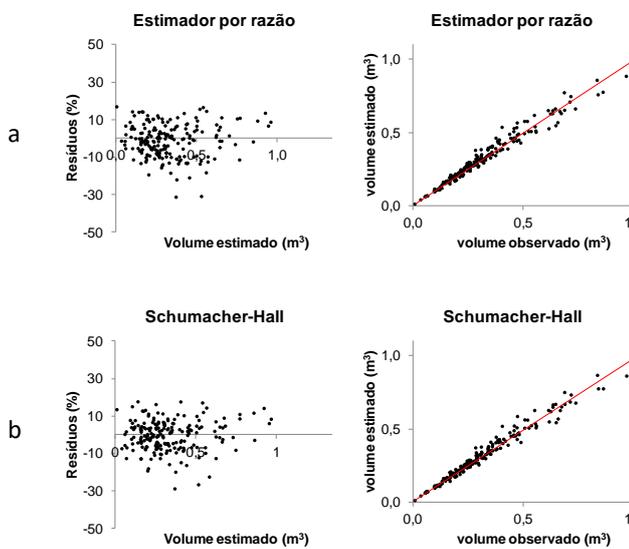


Figura 3. Dispersão gráfica dos resíduos x volume estimado e volume observado x volume predito para os métodos de estimador por razão (a) e pelo modelo de Schumacher-Hall (b).

Em outro estudo, os resíduos da estimativa pelo modelo de Schumacher-Hall mostraram tendência em subestimar o volume comercial em espécies da Amazônia, enquanto que o estimador de razão não apresentou tendência (CIARNOSCHI, 2020).

De modo geral, em comparação com os demais trabalhos de modelagem do volume, observou-se que os métodos que utilizaram fator de forma e o modelo de Schumacher-Hall apresentaram as melhores estatísticas de ajuste e de distribuição dos resíduos (BONAZZA et al., 2019; FERRARI et al., 2017; MÓRA et al., 2014; PERTILLE et al., 2018; RODRIGUES et al., 2017; SANQUETTA et al., 2017; SOUZA et al., 2020; STEPKA et al., 2017).

Assim, é importante destacar que, dependendo do conjunto de dados utilizado nos ajustes, os resultados podem variar entre um ou outro método. A escolha do melhor método fica a critério de cada pesquisador dado os resultados estatísticos de ajuste, bem como das vantagens e desvantagens de cada um.

CONCLUSÕES

Os dois métodos avaliados para a estimativa do volume individual de *Pinus taeda* são satisfatórios. No entanto, o modelo de Schumacher-Hall apresenta um desempenho

ligeiramente superior.

AGRADECIMENTOS

À empresa Klabin pela disponibilização dos dados e apoio ao longo da pesquisa, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 pela bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C.A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMADOR, J.P. et al. Análise das pressuposições e adequação dos resíduos em modelo de regressão linear para valores individuais, ponderados e não ponderados, utilizando procedimentos do SAS®. *Ciência e Natura*, v.33, n.2, p.7-22, 2011.
- AVERY, T.E.; BURKHART, H.E. *Forest Measurements*. 5.ed.cNew York: Waveland Press, 2015.
- BONAZZA, M. et al. Métodos para estimativas volumétricas de *Pinus patula*. *Advances in Forestry Science*, v.6, n.2, p.673-679, 2019.
- BUONGIORNO, J.; ZHU, S. Assessing the impact of planted forests on the global forest economy. *New Zealand Journal of Forestry Science*, v.44, n.1, p.1-9, 2014.
- CIARNOSCHI, L.D. *Estimadores biométricos para avaliação e manejo sustentável no sudoeste da Amazônia*. 2020. 143p. (Tese de doutorado).
- COCHRAN, W. G. *Sampling Techniques*. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 1977.
- COSENZA, D.N. et al. Airborne laser scanning applied to eucalyptus stand inventory at individual tree level. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.53, n.12, p.1373-1382, 2018.
- COUTINHO MENEGUZZI, C. et al. Routing model applied to forest inventory vehicles planning. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.175, n.6, p.1-7, 2020.
- DRAPER, N.R.; SMITH, H. *Applied Regression Analysis*. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2020). Global Forest Resources Assessment 2020: **Main report**. Recuperado em 30 de abril de 2021, de <http://www.fao.org/3/ca9825en/ca9825en.pdf>. <http://dx.doi.org/10.4060/ca9825en>.
- FERRARI, L.S. et al. Equações de volume para condução da regeneração natural de *Pinus elliottii* Engelm. *Espacios*, v.38, n.42, p.19-31, 2017.
- FIGUEIREDO FILHO, A. et al. Taper equations for *Pinus taeda* plantations in Southern Brazil. *Forest Ecology and Management*, v.83, n.1, p.39-46, 1996.

GARCÍA-ESPINOZA, G.G. et al. Taper and volume systems based on ratio equations for *Pinus pseudostrobus* Lindl in Mexico. **Forests**, v.9, n.6, p.1–14, 2018.

GOGOI, A. et al. Plant biodiversity and carbon sequestration potential of the planted forest in Brahmaputra flood plains. **Journal of Environmental Management**, v.280, n.5, p.1-8, 2021.

GREEN, P.C. et. A novel application of small area estimation in loblolly pine forest inventory. **Forestry**, v.93, n.3, p.444-457, 2020.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. (2020). **Relatório 2019**. Recuperado em 30 de abril de 2021, de <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>

KOHLER, S. V. (2017). **Erros amostrais e não amostrais em inventários de florestas plantadas**. 2017. 173 p. (Tese de doutorado).

KOHLER, S. V. et al. Evolution of tree stem taper in *Pinus taeda* stands. **Ciência Rural**, v.46, n.7, p.1185-1191, 2016.

LEVINE, D.M., Stephan, D.F., Szabat, K.A. **Estatística - teoria e aplicações usando o Microsoft Excel em português**. 3. ed. Rio de Janeiro: ITC, 2005.

MACHADO, S.A. (1979). Tabela de volume para *Pinus taeda* na região de Telêmaco Borba-PR. **Revista Floresta**, v.10, n.1, p.29–35, 1979.

MÔRA, R. et al. Modelos para estimativas volumétricas de fustes de *Pinus taeda* L. **Enciclopédia Biosfera**, v.10, n.19, p.1320–1332, 2014.

NEPAL, P. et.al. Projecting global planted forest area developments and the associated impacts on global forest product markets. **Journal of Environmental Management**, v.24, n.11, p.421–430, 2019.

NHADUCO, O.P E. **Sistema de equações aditivas e estimadores por razão de biomassa de Pinus spp no sul do Brasil**. 2019. 102p. (Dissertação de mestrado).

OLIVEIRA, R.K. et al. Emery-based sustainability assessment of a loblolly pine (*Pinus taeda*) production system in southern Brazil. **Ecological Indicators**, v.93, n.4, p.481–489, 2018.

PÉLLICO NETTO, S.; BEHLING, A. Rational volumetric models: Tested in forest stands of *Acacia mearnsii* de wild in Southern Brazil. **Cerne**, v.25, n.4, p.491–505, 2019a.

PÉLLICO NETTO, S.; BEHLING, A. Additivity of tree biomass components using ratio estimate. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.91, n.3, p.1–31, 2019b.

PERTILLE, C.T. et al. Volume prediction through form factor and regression models by age class for *Pinus taeda* L. **Advances in Forestry Science**, v.5, n.3, p.431-436, 2018.

RODRIGUES, C.K. et al. (2017). Identidade de modelos hipsométricos e volumétricos de povoamentos de pinus com

diferentes idades submetidos ao desbaste mecanizado. **BIOFIX Scientific Journal**, v.2, n.1, p.54-59, 2017.

SANQUETTA, C.R. et al. Form factors vs regression models in volume estimation of *Pinus taeda* L stem. **Científica**, v.45, n.2, p.175-181, 2017.

SANQUETTA, C.R. et al. Estimación de volumes de *Araucaria angustifolia* (Bertol) O Kuntze por fatores de forma em classes diamétricas e modelos de regressão. **Enciclopédia Biosfera**, v.13, n.23, p.588-597, 2016.

SANTOS, R.M. et al. Modelos de volume e afilamento para florestas de *Pinus taeda* L. **BIOFIX Scientific Journal**, v.4, n.1, p.35-42, 2019.

SOUZA, D.V. et al. K-nearest neighbor and linear regression in the prediction of the artificial form factor. **Floresta**, v.50, n.3, p.1669-1678, 2020.

SOUZA, D.V. et al. **Introdução ao R: Aplicações Florestais**. Curitiba: Edição dos autores, 2018.

STEPKA, T.F.G.A. et al. Modelos volumétricos e funções de afilamento para *Pinus taeda* L na região dos Campos Gerais, Paraná, Brasil. **Espacios**, v.38, n.21, p.26-35, 2017.

TRAUTENMÜLLER, J.W. **Correlações e estimadores de biomassa acima do solo em florestas no sul do Brasil**. 2019. 109p. (Tese de doutorado).

TRAUTENMÜLLER, J.W. et al. Ratio estimators for aboveground biomass and its parts in subtropical forests of Brazil, Paraná, Brasil. **Ecological Indicators**, v.154, n.21, p.1-15, 2023.