

AVALIAÇÃO DE MODELOS DE AFILAMENTO NA ESTIMATIVA DE DIÂMETROS E VOLUMES DE *Tectona grandis* L.f.

EVALUATION OF TAPERS MODELS FOR ESTIMATING DIAMETERS AND VOLUMES OF *Tectona grandis* L.f.

Ana Paula Cardoso Tavares¹, Edmilson Santos Cruz², Thelma Shirlen Soares³

^{1,2,3} Universidade Federal de Jataí, Jataí, Goiás, Brasil – ana_paula.tavares@discente.ufj.edu.br,
thelmasoares@ufj.edu.br, edmilson-santos_cruz@ufj.edu.br

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar a acuracidade de quatro modelos polinomiais não segmentados nas estimativas de diâmetros e de volume comercial e total de teca (*Tectona grandis* L.f.) com 96 meses de idade. Com base em dados de cubagem rigorosa de 78 árvores-amostras, foram avaliados os modelos de afilamento de Demaerschalk, Kozak et al., Ormerod e Schöpfer. A acuracidade dos modelos para estimar diâmetros ao longo do fuste e os volumes comercial e total foi avaliada por meio das estatísticas: coeficiente de determinação, erro padrão residual, análise gráfica dos resíduos, desvio médio em cada posição de medição ao longo do fuste, desvio-padrão das diferenças, soma de quadrados do resíduo relativo e resíduo percentual. Com base nas quatro últimas estatísticas, foi elaborado um ranking para detectar o modelo que propiciou estimativas mais acuradas de diâmetros e volumes em cada posição de medição do fuste. Em relação aos diâmetros estimados ao longo do fuste, as equações geradas pelos modelos de Ormerod, Demaerschalk e Kozak et al. não apresentaram boa acuracidade, com tendências nas estimativas. Para os volumes comercial e total foram observados desempenhos semelhantes nas estimativas obtidas pelas equações de Demaerschalk e de Kozak et al. O modelo de Ormerod foi o que apresentou o pior desempenho para as estimativas acuradas de diâmetros e de volumes comercial e total. Verificou-se que o modelo de Schöpfer produziu as equações mais acuradas na estimativa das variáveis estudadas.

PALAVRAS-CHAVE: Funções de taper. Forma do tronco. Teca.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the accuracy of four non-segmented polynomial models in diameter, commercial and total volume estimates of teak (*Tectona grandis* L.f.) at 96 months of age. Data used were obtained from rigorous cubing data of 78 sample trees. Demaerschalk, Kozak et al. and Ormerod and Schöpfer mathematical models were tested. The accuracy of the models in estimating diameters and commercial and total volumes was evaluated through the following statistics: coefficient of determination; residual standard error; graphical analysis of the residues, mean deviation at each measurement position along the stem, standard deviation of differences, sum of squares of the relative residue, and percentage of the residue. Starting from the last four statistics, it was elaborated a ranking to detect the more accurated model for each position along the stem. In relation to the diameters estimated along the stem, the equations generated by the models of Ormerod, Demaerschalk and Kozak et al. did not show good accuracy, with biases in the estimates. For the commercial and total volumes similar performance in the estimates obtained by the equations of Demaerschalk and Kozak et al. was observed. The Ormerod model was the one that presented the worst performance for accurate estimates of diameter and commercial and total volumes. The Schöpfer model was found to produce the most accurate equations for estimating the variables studied.

KEYWORDS: Taper functions. Stem shape. Teak.

INTRODUÇÃO

A teca (*Tectona grandis* L.f.) é uma espécie arbórea decídua pertencente à família Lamiaceae e de ocorrência natural na Índia, Laos, Myanmar e Tailândia (TEWARI, 1999; FURTADO et al., 2017). Juntamente com o mogno (*Swietenia* spp.) e o cedro (*Cedrela odorata*) é uma das madeiras tropicais de maior demanda mundial (KEOGH, 2009), cujo reflorestamento foi introduzido em regiões tropicais da América, África e Ásia. Estima-se que a área plantada com teca seja de 4,854 milhões de hectares e distribuída em 80 países (KOLLERT et al., 2024).

Entre os países da América Latina, o Brasil é o que apresenta a maior área plantada de teca sendo de 87.502 hectares, principalmente nos Estados de Mato Grosso, Pará, Rondônia, Acre, Goiás e Minas Gerais (COUTINHO, 2017).

A madeira da teca é popular no mercado internacional devido à sua excelente durabilidade, propriedades estéticas e resistência mecânica (MOYA & TENORIO, 2021). Devido à qualidade de sua madeira é considerada, de acordo com Midgley et al. (2015), a rainha das madeiras tropicais. Considerando o crescente desenvolvimento e o aumento da demanda de mercado por produtos madeiráveis, as empresas do setor florestal estão buscando ampliar as possibilidades de utilização da madeira e diversificar a sua produção. É considerada uma das espécies madeireiras tropicais mais valiosas (KOLLERT & KLEINE, 2017), sendo empregada na construção naval, laminados, esquadrias, painéis, móveis, portas e janelas e artefatos domésticos e de cozinha (THULASIDAS & BAILLÈRES (2017).

A crescente demanda por teca criou, na América Latina e na África, um mercado para toras de crescimento rápido e de pequeno diâmetro (KOLLERT et al., 2024). Uma das possibilidades para o melhor aproveitamento da madeira é a utilização de multiprodutos da tora, visando agregar valor à produção e otimização do lucro (CAMPOS et al., 2014). Tendo em vista as inúmeras vantagens advindas da conversão de árvores em multiprodutos, estudos têm sido realizados com o objetivo de estabelecer o melhor aproveitamento na conversão de troncos.

A obtenção dos volumes associados aos modelos de afilamento, também denominados taper, é a forma mais atual de determinar os volumes compatíveis com as diversas formas apresentadas ao longo dos troncos das árvores e seu total aproveitamento para os diversos subprodutos (FAVALESSA et al., 2012). Esses modelos, visam descrever o perfil ao longo do fuste das árvores, permitindo determinar o volume de madeira entre

quaisquer pontos ao longo do fuste, possibilitando melhor definição dos multiprodutos e, conseqüentemente, melhor aproveitamento (SILVA et al., 2011).

Dentre os modelos de taper, destacam-se os modelos polinomiais não segmentados, que representam em uma única equação, a base, a porção intermediária e o topo das árvores, permitindo realizar estimativas dos volumes das árvores e a quantificação de multiprodutos (ASSIS et al., 2001). Entre os modelos encontrados na literatura e que apresentaram resultados consistentes, podem-se citar os de Kozak et al. (1969), Schöpfer (1969), Demaerschalk (1972), Ormerod (1973), Goulding & Murray (1976), entre outros.

Conforme Scolforo et al. (1998), as características de afilamento podem apresentar diferenças de acordo com a espécie e seu estágio de desenvolvimento. Dessa forma, Lansanova (2019) ressalta que pesquisas relacionadas às técnicas de modelagem sobre povoamentos de teca são importantes nos processos produtivos, visto que os estudos que têm como foco analisar o perfil do tronco das árvores são voltados, principalmente, para povoamentos implantados com as espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. Entre os estudos de funções para descrever o afilamento do fuste de árvores de *Tectona grandis* L.f. desenvolvidos no Brasil citam-se: Leite et al. (2011), Favalessa et al. (2012) e Schmidt et al. (2017), Rosa et al. (2023), entre outros.

Neste contexto, o objetivo desse estudo foi avaliar a acuracidade de quatro modelos polinomiais não segmentados na estimativa de diâmetros e de volume comercial e total de fustes de teca.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

Foram utilizados dados obtidos de um plantio de teca (*Tectona grandis* L.f.), com idade de 96 meses, implantado no município de Alta Floresta, região Norte do Estado de Mato Grosso.

O município de Alta Floresta, segundo a classificação de Köppen, possui clima do tipo Aw, tropical chuvoso, com duas estações bem definidas, verão chuvoso e inverno seco. A temperatura da região é moderadamente uniforme, com média anual entre 20°C a 38°C. A precipitação pluviométrica anual, entre 2.500 mm e 2.750 mm, apresenta intensidade máxima de janeiro a março (FERREIRA, 2022). O solo predominante da região, segundo Oliveira et al. (2021), é o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico com a textura variando entre franco-arenosa a

franco-argila-arenosa.

Cubagem das árvores amostras

Foram cubadas rigorosamente, segundo o método de Smalian, 78 árvores-amostra em diferentes classes diamétricas com intervalo de classe de 3 cm. As árvores selecionadas foram derrubadas e medidas as circunferências do tronco nas alturas de 0,0 m, 1,3 m, 2,0 m e em intervalos regulares de 2,0 m até a base da copa.

Ajuste dos modelos de afilamento

Para descrever o afilamento dos fustes foram ajustados os seguintes modelos de taper: Demaerschalk (1972), Kozak et al. (1969), Ormerod (1973) e Schöpfer (1969). Para os ajustes, utilizou-se o software R, por meio do método de ajuste não linear (nls) pelo processo iterativo, utilizando a função nls implementada na base do próprio software com o algoritmo de Gauss-Newton, conforme *script* desenvolvido por Môra (2015).

Para as expressões matemáticas correspondentes a cada uma das funções de afilamento foram usadas as seguintes notações: d_i = diâmetro (cm) com casca a uma altura h_i ; dap = diâmetro a 1,30 m de altura do solo (cm); HT = altura total da árvore (m); h_i = altura (m) da base do fuste até o ponto onde se alcança o diâmetro d_i ; V = volume da árvore (m^3); h_1 e h_2 = limites da integração; β_n = parâmetros a serem estimados; ε_i = erro aleatório, $\varepsilon_i \sim NID(0, \sigma^2)$.

a) Demaerschalk (1972)

A relação funcional é dada por:

$$\left(\frac{d_i}{dap}\right)^2 = 10^{2\beta_0} dap^{2(\beta_1-2)} HT^{2\beta_2} (HT - h_i)^{2\beta_3} + \varepsilon_i \quad [1]$$

Isolando d_i em [1] obtém-se a função de afilamento:

$$d_i^2 = 10^{2\beta_0} dap^{2\beta_1} HT^{2\beta_2} (HT - h_i)^{2\beta_3} + \varepsilon_i \quad [2]$$

O volume total ou de qualquer porção da árvore (sortimento) é obtido por:

$$V = \frac{\pi}{40000} 10^{2\beta_0} dap^{2\beta_1} HT^{2\beta_2} \left[\frac{(HT-h_1)^{2\beta_3+1} - (HT-h_2)^{2\beta_3+1}}{2\beta_3+1} \right] + \varepsilon_i \quad [3]$$

b) Kozak et al. (1969)

A forma geral desse modelo é:

$$\left(\frac{d_i}{dap}\right)^2 = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{HT}\right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{HT}\right)^2 + \varepsilon_i \quad [4]$$

Isolando d_i em [4] obtém-se a função de afilamento:

$$d_i = dap \sqrt{\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{HT}\right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{HT}\right)^2} + \varepsilon_i \quad [5]$$

O volume total ou de qualquer sortimento da árvore pode ser obtido pela substituição de [4] em [5]. Após a resolução da integral, obtém-se como resultado:

$$V = \frac{\pi}{40.000} dap^2 \left[\beta_0 (h_2 - h_1) + \frac{\beta_1}{2HT} (h_2^2 - h_1^2) + \frac{\beta_2}{3HT^2} (h_2^3 - h_1^3) \right] + \varepsilon_i \quad [6]$$

c) Ormerod (1973)

A função de afilamento geral desse modelo é dada por:

$$\frac{d_i}{dap} = \left[\frac{(HT-h_i)}{HT-1,30} \right]^{\beta_1} + \varepsilon_i \quad [7]$$

Isolando d_i na equação [7], o diâmetro a várias alturas pode ser obtido por:

$$d_i = dap \left[\frac{(HT-h_i)}{HT-1,30} \right]^{\beta_1} + \varepsilon_i \quad [8]$$

Para obtenção do volume total, utiliza-se a equação [8] em [2] para resolver a integração de modo a resultar na equação:

$$V = \frac{\pi}{40.000} dap^2 \left[\frac{1,30-HT}{2\beta_1+1} \right] \left\{ \left[\frac{h_i-HT}{1,30-HT} \right]^{2\beta_1+1} - \left[\frac{h_i-HT}{1,30-HT} \right]^{2\beta_1+1} \right\} + \varepsilon_i \quad [9]$$

d) Schöpfer (1966)

A forma geral desse modelo, também denominado de polinômio de quinto grau é:

$$\frac{d_i}{dap} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{HT}\right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{HT}\right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h_i}{HT}\right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h_i}{HT}\right)^4 + \beta_5 \left(\frac{h_i}{HT}\right)^5 + \varepsilon_i \quad [10]$$

Para integrar a função e obter a expressão que permite a estimativa dos volumes, fez-se a seguinte simplificação: $c_0 = \beta_0$, $c_1 = \beta_1 \div HT$, $c_2 = \beta_2 \div HT^2$, $c_3 = \beta_3 \div HT^3$, $c_4 = \beta_4 \div HT^4$ e $c_5 = \beta_5 \div HT^5$. Feita a simplificação, a expressão a ser integrada assume a forma:

$$d_i = dap [c_0 + c_1 h_i + c_2 h_i^2 + c_3 h_i^3 + c_4 h_i^4 + c_5 h_i^5 + \varepsilon_i] \quad [11]$$

O volume da árvore é obtido pela integral do polinômio

$V = K \int_{h_1}^{h_2} d_i^2 \delta h$. Resolvendo a integral, tem-se:

$$V = \frac{\pi D^2}{40000} \left[c_0^2 h + 2c_0 c_1 \left(\frac{h^{p_1+1}}{p_1+1}\right) + 2c_0 c_2 \left(\frac{h^{p_2+1}}{p_2+1}\right) + 2c_0 c_{(n-1)} \left(\frac{h^{p_{(n-1)+1}}}{p_{(n-1)+1}}\right) + 2c_0 c_n \left(\frac{h^{p_n+1}}{p_n+1}\right) + 2c_1^2 \left(\frac{h^{2p_1+1}}{2p_1+1}\right) + 2c_1 c_2 \left(\frac{h^{p_1+p_2+1}}{p_1+p_2+1}\right) + 2c_1 c_{(n-1)} \left(\frac{h^{p_1+p_{(n-1)+1}}}{p_1+p_{(n-1)+1}}\right) + 2c_1 c_n \left(\frac{h^{p_1+p_n+1}}{p_1+p_n+1}\right) + c_2^2 \left(\frac{h^{2p_2+1}}{2p_2+1}\right) + 2c_2 c_{(n-1)} \left(\frac{h^{p_2+p_{(n-1)+1}}}{p_2+p_{(n-1)+1}}\right) + 2c_2 c_n \left(\frac{h^{p_2+p_n+1}}{p_2+p_n+1}\right) + c_{(n-1)}^2 \left(\frac{h^{2p_{(n-1)+1}}}{2p_{(n-1)+1}}\right) + 2c_{(n-1)} c_n \left(\frac{h^{p_{(n-1)+1}+p_n+1}}{p_{(n-1)+1}+p_n+1}\right) + c_n^2 \left(\frac{h^{2p_n+1}}{2p_n+1}\right) \right]_{h_1}^{h_2} + \varepsilon_i \quad [12]$$

Medidas de precisão e de acurácia dos modelos de afilamento

Foram obtidas as medidas de precisão dos modelos, por meio do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro padrão da estimativa percentual ($S_{yx}\%$) e análise gráfica dos resíduos.

Conforme Assis (2000), estas foram utilizadas apenas para verificar se os modelos apresentaram ajustes satisfatórios de uma maneira geral. Adicionalmente, foram calculadas as estatísticas desvio (D), desvio padrão das diferenças (SD), soma do quadrado do resíduo relativo (SSRR) e porcentagem dos resíduos (RP), conforme Parresol et al. (1987). Tais estatísticas, de acordo com Ferreira (2004), permitem uma análise mais detalhada do desempenho das estimativas ao longo de todo o fuste. As variáveis avaliadas foram os diâmetros estimados em cada posição de medição, os volumes comerciais (calculados até

a altura de 6 m) e os volumes totais. A Tabela 2 apresenta as estatísticas calculadas para verificar a acuracidade das estimativas de diâmetros e volumes.

Ressalta-se que devido ao fato da cubagem rigorosa ter sido realizada por um método absoluto (método de Smalian), optou-se por considerar os volumes comerciais até 6 m de altura do fuste uma vez que nessa altura seria possível estabelecer uma amostragem mais completa para as árvores que compuseram o banco de dados deste estudo. Autores como Assis (2000), Assis et al. (2001), Ferreira (2004), Souza (2007), Souza (2009) e Mõra (2015), também calcularam as estatísticas D, SD, SSRR e RP para volumes comerciais, porém estabeleceram os volumes em função das alturas relativas uma vez que realizaram a cubagem rigorosa das árvores por meio de métodos relativos.

Obtidas as estatísticas, foi elaborado um *ranking* para expressar, de forma sumarizada, o desempenho dos modelos de afilamento testados para estimar diâmetros ao longo do fuste e os volumes parciais e totais das árvores. Este *ranking* foi feito para as variáveis diâmetro e volume. Considerando os estimadores, foi atribuída nota 1 à equação que apresentou maior acuracidade (menores valores de D, SD, SSRR e RP) em cada posição relativa de medição, e assim sucessivamente, até a nota 4 para a equação menos acurada. No caso de mesmo valor em qualquer das estatísticas para diferentes equações, estas receberam a mesma nota. Finalmente, conforme Ferreira (2004), os valores foram somados, para todas as estatísticas, e a melhor equação, em cada posição, foi a que apresentou menor soma de notas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estatísticas dos modelos ajustados

Na Tabela 1 estão apresentados os parâmetros estatísticos para os quatro modelos de afilamento ajustados junto as duas respectivas medidas de precisão.

Tabela 1. Estatísticas das equações em sua forma original, obtidas para um povoamento de *Tectona grandis* em Alta Floresta, MT*.

| Modelo | Parâmetros estimados | | | | | R ² _{aj.} (%) | S _{yx} (%) |
|--------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------------|---------------------|
| | β ₀ | β ₁ | β ₂ | β ₃ | β ₄ | | |
| Demaerschalk | 0,257 | 0,973 | -1,373 | 1,257 | - | 72,0 | 1,40 |
| Kozak et al. | 1,487 | -3,701 | 2,646 | - | - | 73,4 | 1,38 |
| Ormerod | - | 1,208 | - | - | - | 72,9 | 1,68 |
| Schöepfer | 1,350 | -5,794 | 25,368 | -54,926 | 52,915 | -18,799 | 81,2 |

* Em que: R²_{aj.} = coeficiente de determinação ajustado (%); S_{yx} = erro-padrão da estimativa (%); β₀, β₁, β₂, β₃, β₄, β₅ = parâmetros estimados.

Os quatro modelos apresentaram coeficiente de determinação ajustado (R²_{aj.}) inferiores a 82,0% e erro-

padrão da estimativa (S_{yx}%) entre 0,42% a 1,68%. As estatísticas foram consideradas aceitáveis, uma vez que foram semelhantes às encontradas por Assis (2000), Oliveira (2014), Lustosa Júnior (2017) e Miranda et al. (2020), em estudos de afilamento do fuste empregando os mesmos modelos. Dessa forma, os modelos apresentaram precisão satisfatória, considerando-se o ajuste da função original.

Entretanto, conforme relata Souza (2007), essas medidas de precisão, embora indiquem bom desempenho das funções ajustadas, não garantem o mesmo desempenho quando as mesmas forem rearranjadas para estimar diâmetro e volume. Assis (2000) ressalta que essas estatísticas são médias que não fornecem nenhum indicativo do comportamento dos modelos ao longo do perfil, sendo necessário calcular estatísticas ao longo de todo o comprimento da árvore, o que permite uma análise mais detalhada a fim de escolher com segurança o modelo adequado.

Acuracidade nas estimativas dos diâmetros

Os valores das estatísticas desvio (D), soma de quadrados dos resíduos relativos (SQRR), desvio padrão das diferenças (SD) e resíduo percentual (RP), juntamente com as notas do ranking dos quatro modelos avaliados na estimativa dos diâmetros são apresentados na Tabela 2.

A partir dessas estatísticas, foi feita uma classificação do ranking, na qual o modelo testado que apresentou o menor valor no somatório foi o modelo mais acurado. Assim, entre os quatro modelos analisados o modelo de Schöepfer foi o que apresentou menor somatório para diâmetro e volumes. No caso do diâmetro, o modelo em questão apresentou melhor acurácia para todas as estatísticas D, SQRR e SD (nota 1) e RP (nota 2), totalizando 5 pontos. Os modelos de Kozak et al., Demaerschalk e Ormerod, por sua vez, foram ranqueados em segundo, terceiro e quarto lugares, respectivamente.

Tabela 2. Estatísticas e notas atribuídas para os modelos polinomiais não segmentados para estimativa dos diâmetros ao longo do fuste em um povoamento de *Tectona grandis* em Alta Floresta, MT.

| Modelo | Estatísticas Diâmetro* | | | | Nota |
|--------------|------------------------|---------|-------|--------|------|
| | D | SQRR | SD | RP | |
| Demaerschalk | 0,756 | 33,644 | 2,305 | 9,180 | 11 |
| Kozak et al. | -0,122 | 38,483 | 2,127 | -3,330 | 8 |
| Ormerod | 14,753 | 615,108 | 5,477 | 96,299 | 15 |
| Schöepfer | -0,050 | 7,671 | 1,191 | -0,986 | 5 |

* Em que: D = desvio; SQRR = soma de quadrados dos resíduos relativos; SD = desvio padrão das diferenças; RP = resíduo percentual.

Na análise gráfica dos perfis médios observados e estimados (Figura 1), é possível observar que o modelo de

Schöpfer apresentou uma leve tendenciosidade, superestimando os diâmetros nas ($h_i / HT > 0,8$), porém é o modelo que apresentou melhor estatística de perfil ao longo de todas as alturas relativa em comparação com os demais.

Ao estimar os diâmetros ao longo do fuste, os modelos de Kozak et al., Demaerschalk e Ormerod se mostraram inapropriados por apresentarem tendenciosidade, ora subestimando ora superestimando os valores observados. A equação de Ormerod mostrou perceptível tendenciosidade, até a altura relativa ($h_i / HT < 0,1$ e $h_i / HT > 0,2$) ocorreu uma subestimativa dos valores de diâmetros.

No caso do modelo de Demaerschalk, é possível observar a tendenciosidade de subestimação quando a altura relativa ($h_i / HT > 0,1$) e depois de ($h_i / HT > 0,1$ a $h_i / HT < 0,3$) uma superestimativa e posteriormente até 0,9 novamente subestimando os diâmetros. Já o gráfico de perfil médio do modelo de Kozak et al. mostrou perceptível tendenciosidade de subestimativa de diâmetros na altura relativa ($h_i / HT < 0,07$ e $h_i / HT > 0,27$ até 0,65) e superestimando para ($h_i / HT > 0,07$ até 0,27) e ($h_i / HT > 0,65$).

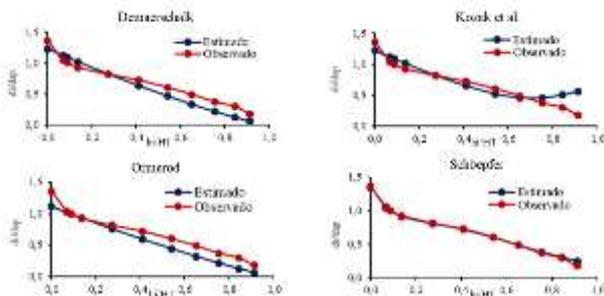


Figura 1. Perfis médios de árvores-amostra de um povoamento de *Tectona grandis* Lf. em Alta Floresta, MT.

A avaliação geral dos modelos foi feita levando-se em conta não somente as estatísticas $R^2_{aj.}$ e S_{yx} (%), mas também uma análise gráfica dos resíduos (Figura 2). Pode-se observar, que em geral as equações apresentaram alguma tendência ao longo da linha da estimativa.

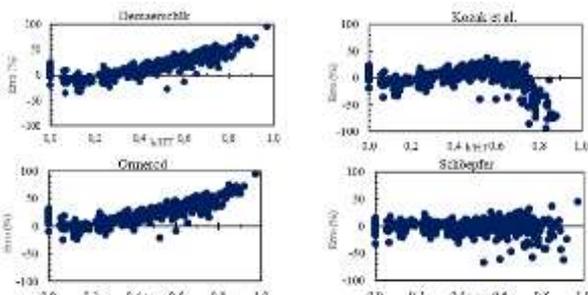


Figura 2. Distribuição dos resíduos de diâmetros, em porcentagem, em função do h_i / HT , para as equações obtidas pelo ajuste dos modelos de Demaerschalk, Kozak

et al., Ormerod e Schöpfer para um povoamento de *Tectona grandis* em Alta Floresta, MT.

Para os modelos de Demaerschalk e Ormerod, observa-se que os valores da porção superior do fuste ($h_i / HT > 0,4$) estão superestimando os diâmetros enquanto que Kozak et al. subestima os diâmetros para $h_i / HT > 0,6$. Comparando os resíduos de todos os modelos ajustados, o de Schöpfer demonstrou melhor distribuição de diâmetros, apesar de que alguns dos diâmetros tiveram leve tendência de subestimar ($h_i / HT > 0,6$), sendo o modelo mais acurado.

Cerqueira et al. (2018), avaliando modelos estatísticos não lineares para predição do afilamento de eucalipto em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, verificaram que o modelo de Demaerschalk apresentou baixo desempenho enquanto o modelo de Schöpfer foi um dos que apresentou melhor desempenho. Gama (2019), na descrição do afilamento do fuste de *Khaya senegalensis*, também verificou que o modelo de Schöpfer se mostrou o mais adequado para estimar os diâmetros ao longo do fuste.

Acuracidade nas estimativas dos volumes

Os resultados dos estimadores e as notas dos rankings atribuídas para as estimativas dos volumes comercial e total estão apresentados na Tabela 3.

Tanto para os volumes comerciais quanto para os volumes totais, o modelo de maior acurácia foi o de Schöpfer. Os modelos de Demaerschalk e Kozak et al. apresentaram desempenhos semelhantes nas estimativas acuradas, tendo o mesmo resultado entre si nas notas dos rankings, porém ocorreu tendenciosidade na distribuição dos resíduos de volume comercial, observando-se que, para as árvores com DAP > 20 cm, ocorreu tendência de subestimação para ambos os modelos. Já o modelo de Ormerod apresentou forte tendência de superestimar o volume comercial em relação aos demais modelos.

Tabela 3. Estatísticas e notas atribuídas para os modelos polinomiais não segmentados para estimativa dos volumes comercial e total em um povoamento de *Tectona grandis* em Alta Floresta, MT.

| Modelos | Estatísticas* | | | | | | | | | |
|--------------|------------------|-------|-------|--------|------|--------------|-------|-------|--------|------|
| | Volume Comercial | | | | | Volume Total | | | | |
| | D | SQRR | SD | RP | Nota | D | SQRR | SD | RP | Nota |
| Demaerschalk | -0,004 | 0,725 | 0,012 | -2,053 | 9 | 0,023 | 1,613 | 0,019 | 11,826 | 9 |
| Kozak et al. | -0,006 | 0,989 | 0,014 | -2,968 | 9 | -0,021 | 1,815 | 0,023 | -9,902 | 9 |
| Ormerod | 0,017 | 1,713 | 0,011 | 1,254 | 13 | 0,044 | 4,353 | 0,021 | 22,494 | 15 |
| Schöpfer | 0,004 | 0,564 | 0,011 | 2,497 | 8 | 0,005 | 0,834 | 0,020 | 0,815 | 7 |

* Em que: D = desvio; SQRR = soma de quadrados dos resíduos relativos; SD = desvio padrão das diferenças; RP = resíduo percentual.

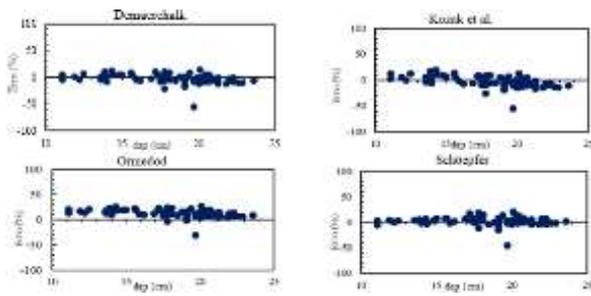


Figura 3. Distribuição dos resíduos do volume comercial, em porcentagem, em função do DAP, para as equações obtidas pelo ajuste dos modelos de Demaerschalk, Kozak et al., Ormerod e Schöpfer para um povoamento de *Tectona grandis* em Alta Floresta, MT

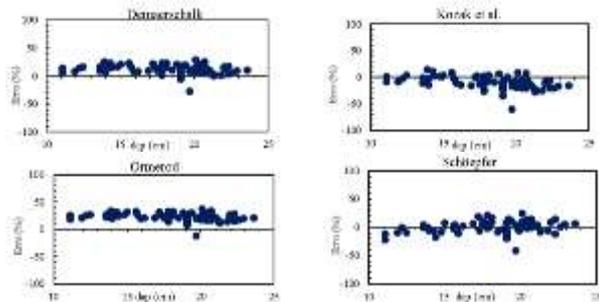


Figura 4. Distribuição dos resíduos do volume total, em porcentagem, em função do DAP, para as equações obtidas pelo ajuste dos modelos de Demaerschalk, Kozak et al., Ormerod e Schöpfer para um povoamento de *Tectona grandis* em Alta Floresta, MT.

As análises gráficas dos resíduos do volume comercial e do volume total dos quatro modelos são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 3 e 4. Assim como aconteceu com os resultados para os diâmetros, o melhor modelo foi o de Schöpfer, que apresentou melhor acuracidade.

O modelo de Ormerod foi o menos estável para as estimativas acuradas, sendo o que apresentou pior desempenho tanto para estimativas de diâmetro, volume comercial e volume total, demonstrando tendenciosidade de subestimação dos volumes, enquanto o modelo de Demaerschalk apresentou tendência de subestimativa dos volumes comerciais. O modelo de Kozak et al., por sua vez, superestimou os volumes comerciais e totais para árvores com dap maior que 17 cm. Comparativamente, o modelo de Schöpfer é o mais apropriado para as estimativas volumétricas.

Considerando os resultados obtidos nas estimativas dos diâmetros e dos volumes comercial e total, pode-se inferir que o modelo de Schöpfer apresentou melhor desempenho nas estimativas avaliadas. O modelo de Schöpfer é um polinômio de grau elevado, capaz de descrever curvas com as mais variadas formas (SOUZA et al., 2016), sendo uma das funções de afilamento mais difundida e utilizada para estimativas de diâmetro e cálculo

do volume por sortimento (MIRANDA et al., 2020). Autores como Souza (2009), Madi (2017) e Gama (2019) também verificaram em seus estudos que o modelo de Schöpfer foi o que apresentou melhores resultados.

CONCLUSÕES

Dentre os quatro modelos ajustados, o de Schöpfer foi o mais estável para estimar os diâmetros ao longo do fuste, o volume comercial e o volume total de árvores de teca, apresentando as estimativas mais acuradas em relação aos demais modelos avaliados.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, A.L. **Avaliação de modelos polinomiais segmentados e não segmentados na estimativa de diâmetros e volumes comerciais de *Pinus taeda***. 2000. 189p. (Dissertação de mestrado).
- ASSIS, A.L. et al. Comparação de modelos polinomiais segmentados e não-segmentados na estimativa de diâmetros e volumes ao longo do fuste de *Pinus taeda*. **Cerne**, v.7, n.1, p.20-40, 2001.
- CAMPOS, B.P.F. et al. Efeito do modelo de afilamento utilizado sobre a conversão de fustes de árvores em multiprodutos. **Scientia Forestalis**, v.42, n.104, p.513-520, 2014.
- CERQUEIRA, C.L. et al. Funções de afilamento para eucalipto em sistema de integração Lavoura- Pecuária-Floresta. **Advances in Forestry Science**, v.5, n.4, p.479-485, 2018.
- COUTINHO, S.A. Cultivo e mercado da teca. **Revista Opiniões**, n.49, p.48-49, 2017.
- DEMAERSCHALK, J.P. Converting volume equations to compatible taper equations. **Forest Science**, v.18, n.3, p.241-245, 1972.
- FAVALESSA, C. et al. Equações de sortimentos para *Tectona grandis* na região centro – sul de Mato Grosso. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.32, n.72, p.389-399, 2012.
- FERREIRA, J.C.V. **Mato Grosso e seus municípios**. 4. ed. Cuiabá: Memória Brasileira, 2022.
- FERREIRA, M.Z. **Estudo de funções de afilamento para representar o perfil e o volume do fuste de *Pinus taeda* L.** 2004. 200p. (Dissertação de mestrado).
- FURTADO, C.M. et al. *Tectona grandis* leaf extract, free and associated with nanoemulsions, as a possible photosensitizer of mouse melanoma B16 cell. **Journal Photochemistry Photobiology**, n.167, p.242-248, 2017.
- GAMA, R.C. **Método da altura relativa aplicado em povoamento de *Khaya senegalensis***. 2019. 52p. (Dissertação de mestrado).

GOULDING, C. J.; MURRAY, J. C. Polynomial taper equations that are compatible with tree volume equations. **New Zealand Journal of Forest Science**, v.5, n.3, p.313-322, 1976.

KEOGH, R.M. **The future of teak and the high-grade tropical hardwood sector**: Planted forests and trees working paper. Roma: FAO, 2009.

KOLLERT, W. et al. **Global teak resources and market assessment 2022**. Vienna: IUFRO, 2024. (World Series, volume 44)

KOLLERT, W.; KLEINE, M. **The global teak study**: analysis, evaluation and future potential of teak resources. Vienna: IUFRO, 2017.

KOZAK, A. et al. Taper functions and their application in forest inventory. **Forest Chronicle**, v.45, n.4, p.278-283, 1969.

LANSSANOVA, L.R. **Modelagem de efeitos mistos para afilamento em fustes de *Tectona grandis* L.f.** 2019. 145p. (Tese de doutorado).

LEITE, H.G. et al. Modelo de afilamento de cerne de *Tectona grandis* L.f. **Scientia Forestalis**, v.39, n.89, p.53-59, 2011.

LUSTOSA JUNIOR., I.M. et al. Modelos de afilamento e otimização de multiprodutos de um povoamento de *Eucalyptus* não desbastado. **Revista de Agricultura Neotropical**, v.4, p.59-65, 2017.

MADI, J.P.S. **Funções de afilamento não segmentadas aplicadas ao sortimento de *Tectona grandis* L.f.** 2017. 13p. (Monografia de especialização).

MIDGLEY, S. et al. **Planted teak**: global production and markets, with reference to Solomon Islands. Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research, 2015. (ACIAR. Technical reports, 85)

MIRANDA., E.N. et al. Efeito de variáveis de copa em funções de afilamento. **Advances in Forestry Science**, v.7, n.2, p.1057-1066, 2020.

MÔRA, R. **Funções de afilamento de forma variável e modelagem de efeitos mistos em fustes de *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna*.** 2015. 277p. (Tese de doutorado).

MOYA, R.; TENORIO, C. Wood properties and their variations in teak. **The teak genome**. Springer: Cham, 2021.

OLIVEIRA, A.S. et al. Caracterização morfológica, física e química de solos da bacia hidrográfica do médio curso do rio Teles Pires, no Município de Alta Floresta – MT. **Research, Society and Development**, v.10, n.9, e34210918157, 2021.

OLIVEIRA, B.R. **Determinação do volume de cerne produzidos nas árvores de *Tectona grandis* L.f. em Mato Grosso.** 2014. 59p. (Dissertação de mestrado).

ORMEROD, D.W. A simple bole model. **Forestry Chronicle**, v.49, n.3, p.136-138, 1973.

PARRESOL, B.R. et al. A volume and taper prediction system for bald cypress. **Canadian Journal of Forest Research**, v.17, p.250-259, 1987.

ROSA, G.D. et al. Funções de afilamento não segmentadas para povoamento de *Tectona grandis* L.f. no município de Glória D'Oeste, Mato Grosso - Brasil. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v.21, n.9, p. 12028-12042, 2023.

SCHMIDT, L. et al. Modelagem do perfil e do volume do fuste de *Tectona grandis* L.f. no Estado do Pará. **Agrarian Academy**, v.4, n.7, p.325-334, 2017.

SCHÖEPFER, W. **Automatisierung des massen, sorten und wertberechnung stenender waldbestände schriftenreihe bad.** [S.l.]: Wurttt-Forstl., 1966.

SCOLFORO, J.R.S. et al. Acuracidade de equações de afilamento para representar o perfil do fuste de *Pinus elliottii*. **Cerne**, v.4, n.1, p.100-122, 1998.

SILVA, F. et al. Equações de afilamento para descrever o volume total do fuste de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na região do Triângulo Mineiro. **Scientia Forestalis**, v.39, n.91, p.367-376, 2011.

SOUZA, C.A.M. **Avaliação de modelos de taper não segmentados e segmentados na estimação da altura e volume comercial de fustes de *Eucalyptus* sp.** 2007. 107p. (Dissertação de mestrado).

SOUZA, C.A.M. **Modelos de afilamento para *Pinus taeda* L. ajustados segundo a forma do tronco e métodos de estratificação.** 2009. 120p. (Tese de doutorado).

SOUZA, R.R. et al. Forma de fuste de árvores de eucalipto em plantios adensados. **Scientia Forestalis**, v.44, n.109, p.109-40, 2016.

TEWARI, D.N. **A monograph on teak (*Tectona grandis* L.f.)**. Dehra Dun: International Book Distributors, 1999.

THULASIDAS, P.; BAILLÈRES, H. Wood quality for advanced uses of teak from natural and planted forests. **The global teak study: analysis, evaluation and future potential of teak resources**. Vienna: IUFRO, 2017.