

VALIDAÇÃO DE MODELOS DE AFILAMENTO PARA ESTIMATIVA DO DIÂMETRO, ALTURA E VOLUME EM POVOAMENTO COMERCIAL DE EUCALIPTO

Fabício Assis LEAL¹

Renato Vinícius Oliveira CASTRO²

Eraldo Aparecido Trondoli MATRICARDI¹

- RESUMO: Este trabalho objetivou avaliar o desempenho de funções de *taper* não segmentadas na validação da estimativa do diâmetro, altura e volume de árvores de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, de plantios comerciais localizados na região de Rio Verde, GO. Foram cubadas 98 árvores sendo que para o ajuste dos modelos foram utilizadas, aleatoriamente, 60 árvores e para a validação foram utilizadas as outras 38 árvores. As estimativas de diâmetro, altura e volume total apresentaram excelentes ajustes, porém quando a avaliação envolveu volume por seção houve muitos desvios, em todos os modelos. Após as análises verificou-se que o modelo de Demaerschalk foi o mais estável entre os modelos testados, inclusive no processo de validação.
- PALAVRAS-CHAVE: *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake; modelagem; volume; *taper*.

1 Introdução

O termo *taper* é utilizado para expressar a taxa de decréscimo do diâmetro ao longo do fuste. Desta forma, os estudos envolvendo o afilamento da árvore se baseiam na estimativa do diâmetro (d) em qualquer altura, bem como a altura (h) em qualquer diâmetro, propiciando estimar o volume de qualquer seção (CAMPOS e LEITE, 2013).

Assim sendo, as funções *taper* se tornam excelente opção no aperfeiçoamento das técnicas de inventários florestais, bem como na quantificação dos sortimentos, pois permitem descrever, matematicamente, o perfil longitudinal do tronco (YOSHITANI JÚNIOR *et al.*, 2012) e, dessa forma, determinar o volume de madeira por meio da integral dessas funções, entre quaisquer pontos ao longo do fuste (MENDONÇA *et al.*, 2007).

Os estudos de afilamento do fuste são realizados por meio de modelos de regressão e, apesar da existência de muitos, não existe um que seja eficiente em todos os casos. Os modelos propostos por Kozak *et al.* (1969), Demaerschalk (1972), Ormerod (1973), Garay

¹ Universidade de Brasília - UnB, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, CEP: 70.910-900, Brasília, DF, Brasil. E-mail: fabricioassisleall@gmail.com; emarcardi@gmail.com

² Universidade Federal de São João Del-Rei - UFSJ, Campus Universitário de Sete Lagoas, Departamento de Ciências Agrárias, CEP: 35.702-383, Sete Lagoas, MG, Brasil. E-mail: castrorvo@ymail.com

(1979), Biging (1984) são consagrados na literatura e suas aplicações são bastante difundidas (LOUREIRO *et al.*, 2012).

Porém, a maioria dos modelos de *taper* não descreve todo o fuste com a mesma precisão. A estimativa do volume, por exemplo, geralmente é de baixa precisão na porção até 1,3 metro, diâmetro a altura do peito (*dap*). Uma mesma equação de *taper* pode resultar em estimativas precisas para diâmetro e ao ser aplicada para estimar alturas comerciais, resulta em *bias* (CAMPOS e LEITE, 2013).

A maioria dos trabalhos envolvendo *taper* avalia somente a acurácia da equação em relação à estimativa do diâmetro a qualquer altura, não se atentando para as estimativas da variável altura (*h*), tampouco na validação de todo esse processo. Assim sendo, este trabalho objetivou avaliar o desempenho de três modelos *taper* não segmentados (Kozak, Demaerschalk e Ormerod), bem como validar a estimativa do diâmetro, altura e volume a partir de um banco de dados independente, para um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

2 Material e métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, com 6,5 anos de idade, plantado em espaçamento de 2,8 x 1,8 m, pertencente à Cooperativa Agroindustrial dos Produtores Rurais do Sudoeste Goiano - COMIGO. A área de estudo está localizada entre os paralelos 18° 00' 45'' e 18° 01' 45'' de latitude Sul e entre os meridianos 50° 52' 45'' e 50° 53' 15'' de longitude Oeste, na cidade de Rio Verde, estado de Goiás. A área estudada envolveu 116 hectares de floresta comercial e a altitude média é de 685 metros.

O clima, segundo a classificação de Köppen é do tipo Aw, tropical úmido, caracterizado por duas estações bem definidas: uma seca, que corresponde ao outono e inverno, indo do mês de maio ao mês de setembro e a outra úmida, com chuvas torrenciais, correspondendo ao período de primavera e verão. A precipitação média anual varia de 1.200 a 1.500 mm, com média anual em torno de 1.300 mm e temperaturas médias em torno de 20° a 25°C (SIQUEIRA NETO *et al.*, 2011).

2.2 Obtenção dos dados

Ao todo foram cubadas 98 árvores, abatidas com corte ao nível do solo e o diâmetro inicial tomado neste ponto. A cubagem foi realizada pelo método de Hohenadl com 10 secções, sendo realizadas aos: 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85 e 95% da altura total da árvore (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2009). Nesses pontos foram obtidos os diâmetros com casca. A escolha das árvores a serem cubadas rigorosamente foi realizada após caracterização quanto a estrutura diamétrica do povoamento (LEAL *et al.*, 2011).

Foram ajustados três modelos de *taper* aos dados de cubagem, sendo: Kozak *et al.* (1969), Demaerschalk (1972) e Ormerod (1973). A escolha se fez por serem modelos não segmentados, ou seja, uma única função representa a forma do fuste desde a base até o ápice (CAMPOS e LEITE, 2013). Esses modelos têm como vantagem a possibilidade de

serem transformados em equações de volume e de reordenação para cálculo de alturas comerciais (PRODAN *et al.*, 1997).

Para o ajuste dos modelos foram utilizadas, aleatoriamente, 60 árvores. As 38 árvores restantes foram utilizadas para validação das equações, na estimativa de diâmetro (d), altura (h) e volume (m^3). Primeiramente foram estimados o diâmetro (\hat{d}) e a altura (\hat{h}) com as equações reordenadas para cada modelo. O volume das seções, de cada árvore, adveio aplicando o método de Smalian e o volume total foi obtido somando o volume das seções, mais o volume da ponta. Esse último calculado pela fórmula do cone (CAMPOS e LEITE, 2013).

A seguir são apresentadas as expressões matemáticas para ajuste dos modelos, bem como sua forma reordenada para estimativa de diâmetro (d), em cm e altura (h), em m, respectivamente, em que \hat{d} = diâmetro estimado, \hat{h} = altura estimada, dap = diâmetro a 1,3 m (cm); H = altura total (m) e β_i = parâmetros a serem estimados.

Modelo 1 – Kozak et al. (1969):

$$\left(\frac{d}{dap}\right)^2 = \beta_0 + \beta_1\left(\frac{h}{H}\right) + \beta_2\left(\frac{h}{H}\right)^2 + \varepsilon \quad (1)$$

$$\hat{d} = dap \sqrt{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1\left(\frac{h}{H}\right) + \hat{\beta}_2\left(\frac{h}{H}\right)^2} \quad (1.1)$$

$$\hat{h} = \frac{-\hat{\beta}_1 H \pm \sqrt{(\hat{\beta}_1 H)^2 - 4\hat{\beta}_2\left(\hat{\beta}_0 H^2 - \frac{d^2 H^2}{dap^2}\right)}}{2\hat{\beta}_2} \quad (1.2)$$

Modelo 2 - Demaerschalk (1972):

$$\left(\frac{d}{dap}\right)^2 = 10^{2\beta_0} dap^{(2\beta_1-2)} H^{2\beta_2} (H-h)^{2\beta_3} + \varepsilon \quad (2)$$

$$\hat{d} = 10^{\hat{\beta}_0} dap^{\hat{\beta}_1} H^{2\hat{\beta}_2} (H-h)^{2\hat{\beta}_3} \quad (2.1)$$

$$\hat{h} = H - \left[\frac{d}{10^{\hat{\beta}_0} dap^{\hat{\beta}_1} H^{2\hat{\beta}_2}} \right]^{\frac{1}{2\hat{\beta}_3}} \quad (2.2)$$

Modelo 3 - Ormerod (1973):

$$\left(\frac{d}{dap}\right)^2 = \left[\frac{(H-h)}{H-1,30}\right]^{2\beta_1} + \varepsilon \quad (3)$$

$$\hat{d} = dap \left(\frac{(H-h)}{H-1,30}\right)^{\hat{\beta}_1} \quad (3.1)$$

$$\hat{h} = H - \left\{ \left(\frac{d}{dap}\right)^{\left(\frac{1}{\hat{\beta}_1}\right)} [H-1,30] \right\} \quad (3.2)$$

2.3 Avaliação dos ajustes e validação

A avaliação dos ajustes e da validação dos modelos procedeu-se com a análise da distribuição gráfica de resíduos, o erro padrão da estimativa (S_{yx}) que mede o quanto das estimativas variaram em relação aos valores observados, a correlação (r) entre os valores observados e as estimativas e *bias* (LANSSANOVA *et al.*, 2013; QUEIROZ *et al.*, 2008; SOUZA *et al.*, 2008b). Para verificar os valores significativos dos parâmetros nos modelos utilizou-se o valor de t calculado, pela distribuição do teste t , ao nível de 5% de significância.

As equações foram testadas na estimativa do diâmetro (d), da altura (h), volume por seção (m^3) - estimados pelo método de Smalian (CAMPOS e LEITE, 2013) - utilizando o diâmetro (\hat{d}) e a altura (\hat{h}) estimados; e também o volume total (m^3), somando o volume de todas as seções.

A validação procedeu-se aplicando as equações ajustadas na etapa anterior à base de dados, com as 38 árvores cubadas que não fizeram parte dos dados de ajuste da equação (dados independentes), as quais foram selecionadas aleatoriamente da base de dados original. Para avaliar a validação entre os dados observados e as estimativas realizadas foram obedecidos os mesmos critérios estatísticos para a avaliação dos ajustes, sendo: distribuição gráfica de resíduos, erro padrão da estimativa (S_{yx}), correlação (r) e *bias* (LANSSANOVA *et al.*, 2013; QUEIROZ *et al.*, 2008; SOUZA *et al.*, 2008b).

3 Resultados e discussão

3.1 Avaliação dos ajustes

Todas as equações de *taper* tiveram seus coeficientes, que representam as estimativas, significativos. Os valores dos coeficientes ajustados, sua probabilidade e

valor pelo teste t , bem como o erro padrão associado a cada coeficiente são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Estimativa dos coeficientes das equações ou modelos *taper* e seus respectivos valores p , estatísticas calculadas do teste t , erro padrão do coeficiente, correlação (r) entre os valores observados e as estimativas e o erro padrão da estimativa (S_{yx}), para cada modelo avaliado

Modelo	Descrição	Parâmetros				r	S_{yx}
		β_0	β_1	β_2	β_3		
Demaerschalk	Coefficientes	0,08632	0,96047	-0,64203	0,62194	0,995	0,70
	P-Valor	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		
	t (calculado)	7,02530	100,795	-37,8052	99,2973		
	Erro padrão	0,01229	0,00953	0,01698	0,00626		
Kozak	Coefficientes	1,06292	-1,42208	0,35760	-	0,994	0,79
	P-Valor	0,00000	0,00000	0,00000	-		
	t (calculado)	220,712	-57,1563	14,5496	-		
	Erro padrão	0,00482	0,02488	0,02458	-		
Ormerod	Coefficientes	-	0,63974	-	-	0,995	0,75
	P-Valor	-	0,00000	-	-		
	t (calculado)	-	107,909	-	-		
	Erro padrão	-	0,00593	-	-		

em que: S_{yx} = Erro padrão da estimativa absoluto; r = correlação entre valores observados e as estimativas.

Com a aplicação das equações *taper* ajustadas e reordenadas para estimativa de diâmetro (d) e altura (h) obteve-se estatísticas de ajuste e precisão para cada modelo avaliado. Dessa forma os valores encontrados são apresentados na Tabela 2.

Em geral, os melhores ajustes foram para a estimativa do diâmetro (d). Fato esse explicado, uma vez que o modelo é estruturado para estimar essa variável. Mesmo assim, para a estimativa da altura, os modelos tiveram bom comportamento e também apresentaram estatísticas bastante aceitáveis.

Considerando o ajuste do modelo na função original, os três (3) modelos testados apresentaram precisão satisfatória e elevados valores de correlação (r) para diâmetro, altura e volume total, porém para volume por seção a correlação (r) foi menor. Todos os modelos tiveram estatísticas S_{yx} bastante aceitáveis para diâmetro (d), com valores menores que 7,5%. Entretanto, o volume por seção apresentou, em média, 79%. O S_{yx} significa o quanto os valores das estimativas variaram em relação aos valores observados.

Leite *et al.* (2011), trabalhando com análise comparativa entre dois procedimentos para estimativa do volume de *Eucalyptus urophylla*, tiveram erro (S_{yx}) acima de 10% em todos os modelos *taper* avaliados. Destaque para o modelo de Kozak com 13,5% de S_{yx} , fato justificado pela heterogeneidade do povoamento.

Tabela 2 - Estatísticas resultantes dos ajustes dos modelos *taper* para as variáveis: diâmetro (d), altura (h), volume da seção (m^3) e volume total (m^3), na base de dados com 60 árvores

	S_{yx}	S_{yx} (%)	r	$Bias$
Diâmetro (d)				
Demaerschalk	0,70	6,5	0,995	0,013
Kozak	0,79	7,3	0,994	0,151
Ormerod	0,75	6,9	0,995	0,095
Altura (h)				
Demaerschalk	1,09	9,8	0,992	0,270
Kozak	1,13	10,4	0,992	0,060
Ormerod	1,13	10,2	0,991	0,111
Volume seção (m^3)				
Demaerschalk	0,0200	84,0	0,847	0,001
Kozak	0,0183	76,9	0,872	0,002
Ormerod	0,0183	77,1	0,872	0,002
Volume total (m^3)				
Demaerschalk	0,0605	21,2	0,972	0,017
Kozak	0,0747	26,2	0,973	0,028
Ormerod	0,0685	24,0	0,972	0,022

em que: S_{yx} = Erro padrão da estimativa absoluto e relativo (%); r = correlação entre valores observados e as estimativas.

Quando a avaliação envolveu o volume da seção, todos os modelos apresentaram desvios consideráveis. Por exemplo, para as variáveis diâmetro (d) e altura (h), o modelo de Demaerschalk reuniu as melhores estatísticas, maiores desvios foram observados para o volume por seção. Na Figura 1 são apresentados os gráficos de dispersão de resíduos, em relação aos dados das estimativas. Eles foram importantes na determinação da melhor equação ajustada, complementando a análise das estatísticas de ajuste e precisão apresentadas na Tabela 2.

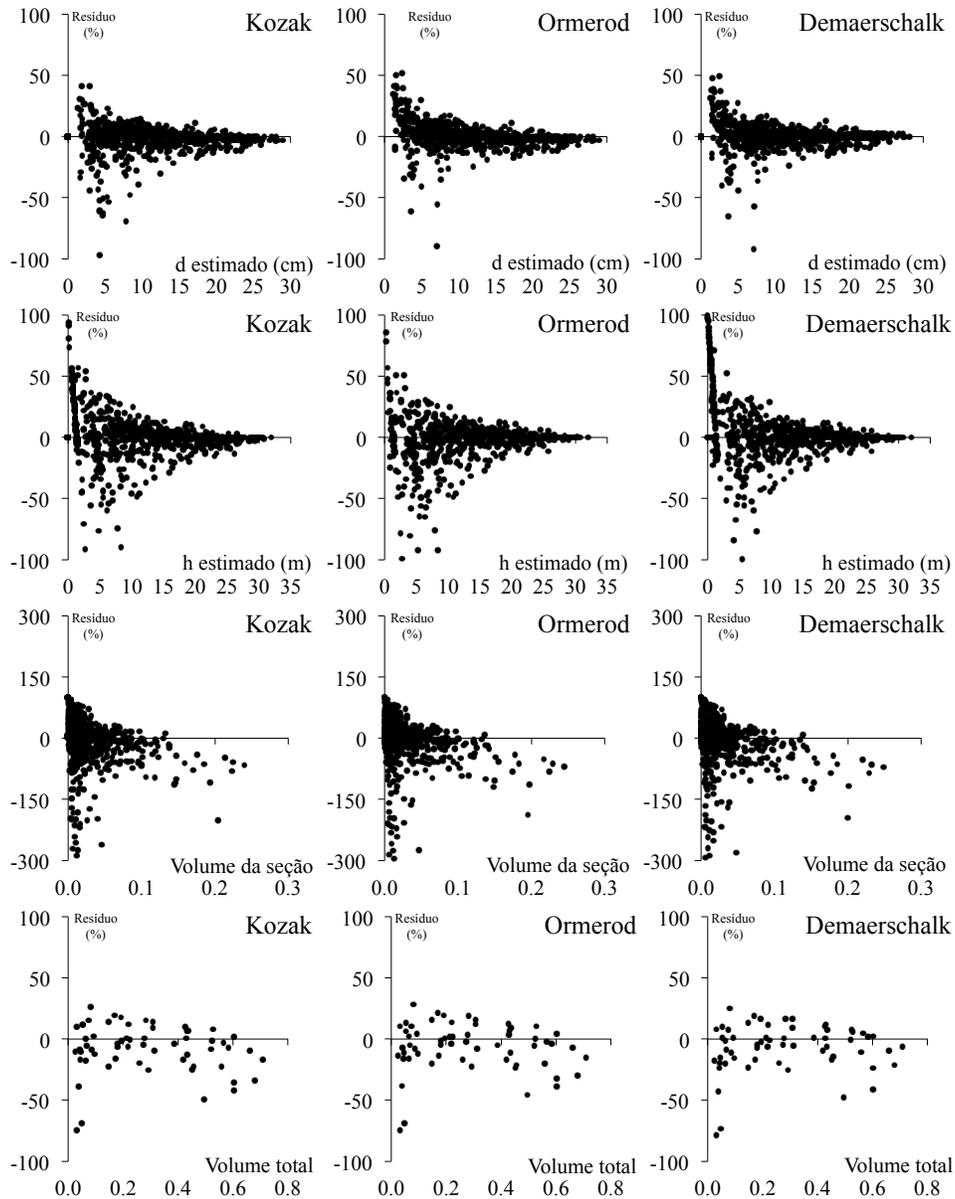


Figura 1 - Dispersão residual dos modelos *taper* na estimativa de diâmetro (d), altura (h), volume da seção (m^3) e volume total da árvore (m^3), para a base de dados com 60 árvores.

Os modelos apresentaram maiores desvios para as porções inferiores das árvores (base da árvore), nas quais o diâmetro é maior e onde ocorrem as maiores deformações no fuste (SOUZA *et al.*, 2008a). Entretanto, como a estruturação do modelo é para a

estimativa do diâmetro (d), nota-se que o comportamento residual para essa variável foi mais homogêneo e o modelo de Demaerschalk se destacou como mais estável.

Na avaliação dos gráficos de dispersão de resíduos foi possível perceber certa semelhança entre os três modelos. Todos variaram a amplitude de erro em $\pm 100\%$, com exceção, quando a estimativa foi feita com o volume por seção. Em geral todos os modelos apresentaram maiores desvios na parte inferior do fuste. Souza et al. (2008a), encontraram maior precisão nas estimativas das dimensões das toras na porção mais inferior do fuste aplicando modelos segmentados.

3.2 Validação

Os dados de validação apresentaram estatísticas de precisão bem semelhantes aos encontrados na Tabela 2 (ajuste). Assumindo os desvios encontrados, todos os modelos foram capazes de estimar o diâmetro e altura para as árvores (Tabela 3).

Tabela 3 - Estatísticas resultantes da validação dos modelos *taper* para as variáveis: diâmetro (d), altura (h), volume da seção (m^3) e volume total (m^3), na base de dados com as 38 árvores, selecionadas aleatoriamente

	S_{yx}	S_{yx} (%)	r	$Bias$
Diâmetro (d)				
Demaerschalk	0,66	6,1	0,995	0,051
Kozak	0,75	6,9	0,995	0,194
Ormerod	0,72	6,7	0,995	0,124
Altura (h)				
Demaerschalk	1,01	9,0	0,993	0,465
Kozak	1,10	10,2	0,992	0,191
Ormerod	1,07	9,6	0,993	0,181
Volume seção (m^3)				
Demaerschalk	0,0232	92,1	0,834	0,001
Kozak	0,0224	89,1	0,836	0,001
Ormerod	0,0226	89,9	0,834	0,000
Volume total (m^3)				
Demaerschalk	0,0576	19,1	0,979	0,010
Kozak	0,0605	20,0	0,979	0,011
Ormerod	0,0551	18,2	0,979	0,004

em que: S_{yx} = Erro padrão da estimativa absoluto e relativo (%); r = correlação entre valores observados e as estimativas.

O modelo de Demaerschalk apresentou as melhores estatísticas de ajuste e precisão no processo de validação, sendo o mais estável. Porém, assim como no ajuste inicial dos modelos, os gráficos de dispersão de resíduos também foram submetidos à análise para a definição do melhor modelo *taper*. A dispersão residual para a validação, na estimativa de diâmetro (d), altura (h), volume da seção (m^3) e volume total (m^3) são apresentadas na Figura 2.

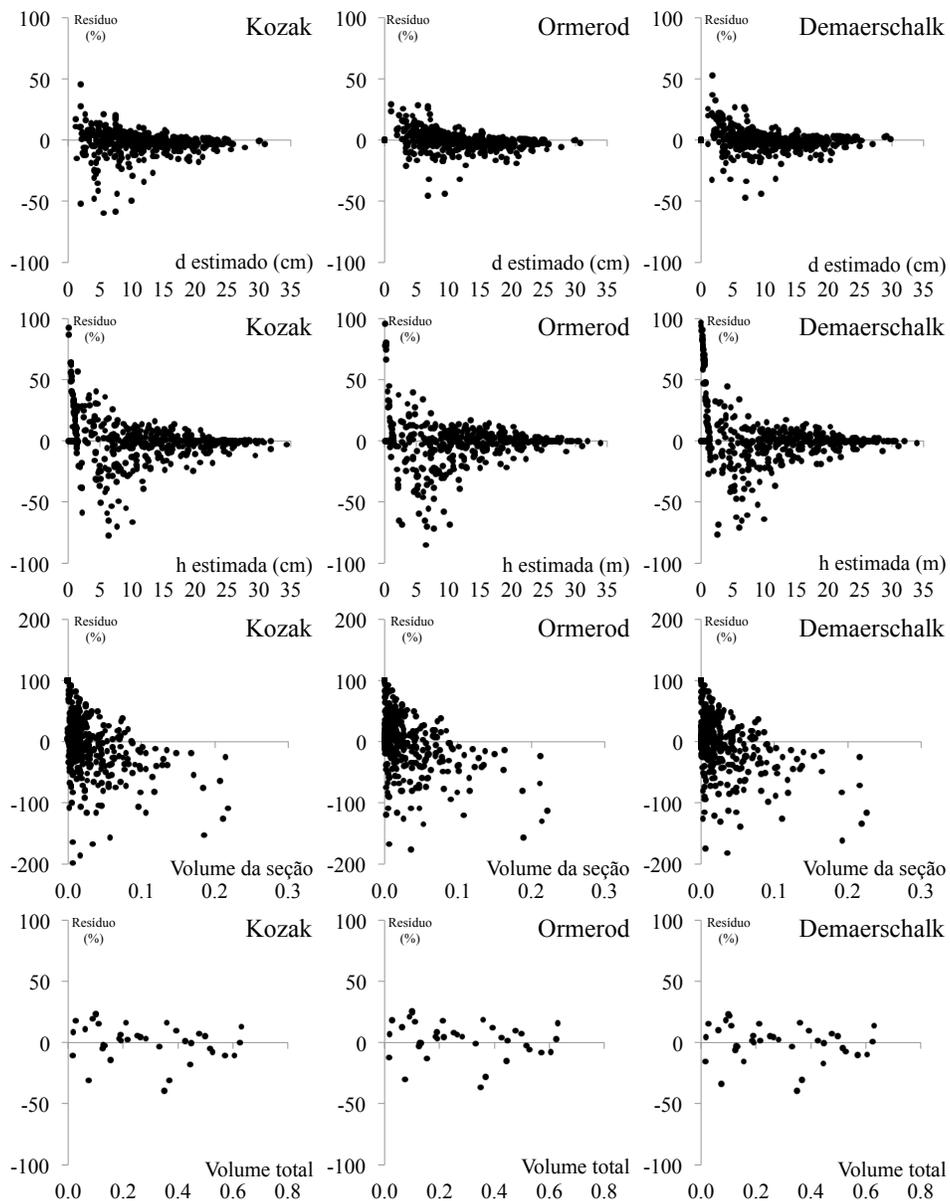


Figura 2 - Dispersão residual na validação dos modelos *taper* na estimativa de diâmetro (d), altura (h), volume da seção (m^3) e volume total (m^3).

Todos os modelos foram bem semelhantes nas estimativas das variáveis supracitadas, no processo de validação, diferindo, entretanto, para o volume por seção, nesse caso, os maiores desvios entre todos. Como o erro padrão da estimativa (S_{yx}) leva em consideração a variação média dos valores estimados em relação aos observados, esse

fato pode ter influenciado nos altos valores encontrados para essa estatística. Mesmo assim, fica evidenciado na validação, que as equações foram eficazes na estimativa de diâmetro (d) e altura (h).

Embora os gráficos de dispersão de resíduos não tenham grande diferença, o modelo de Demaerschalk ainda foi o que teve, também na validação, as melhores estatísticas de precisão.

4 Conclusões

O modelo de Demaerschalk (1972) foi o mais estável, tanto no ajuste inicial quanto na validação, seguido do modelo de Ormerod (1973) e Kozak *et al.* (1969). Sendo assim, neste caso, o modelo de Demaerschalk o mais indicado para realizar as estimativas.

Para o cálculo do volume por seção, as estimativas tiveram altos desvios em todos os modelos, neste caso recomenda-se cautela sobre o uso das estimativas realizadas.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de doutorado e pelo auxílio financeiro no Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE) e aos dois revisores pelas sugestões.

LEAL, F. A.; CASTRO, R. V. O.; MATRICARDI, E. A. T. Validation of taper models for diameter, height and volume estimation in commercial eucalyptus stands. *Rev. Bras. Biom.*, Lavras, v.35, n.3, p.449-460, 2017.

- *ABSTRACT: This study aimed to evaluate the performance of not segmented taper functions validation of the estimated diameter, height and volume of Eucalyptus urophylla S. T. Blake, commercial plantations located in the region of Rio Verde, GO. A total of 98 trees were random selected and rigorously scaled. From the 98 trees, 60 were used to fit the models, and 38 were used for validation. The estimated diameter, height and total volume had excellent fits, but when the evaluation involved volume per section, the deviations were higher in all models. After the analysis it was found that the Demaerschalk's model was the most stable among all tested models, including those of the validation process.*
- *KEYWORDS: Eucalyptus urophylla S.T. Blake; modeling; volume; taper.*

5 Referências

BIGING, G. S. Taper equations for second mixed-conifers of Northern California. *Forest Science*, v.30, n.4, p.1103-1117, 1984.

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

DEMAERSCHALK, J. P. Converting volume equations to compatible taper equations. *Forest Science*, v.18, n.3, p.241-245, 1972.

GARAY, L. *Tropical forest utilization system. VIII. A taper model for entire stem profile including buttressing*. Seattle: Coll. Forest. Resource, Inst. Forest Prod. Univ. Wash., 64p, 1979. (Contrib. 36).

KOZAK, A.; MUNRO, D. D.; SMITH, J. H. G. Taper functions and their application in Forest inventory. *Forestry Chronicle*, v.45, n.4, p.278-283, 1969.

LANSSANOVA, L. R. *et al.* Avaliação de funções de afilamento para a estimativa de diâmetro de espécies florestais comerciais do bioma amazônico Mato-Grossense. *Floresta*, v.43, n.2, p.215-224, 2013.

LEAL, F. A.; MIGUEL, E. P.; MATRICARDI, E. A. T. Mapeamento de unidades produtivas utilizando a interpolação geoespacial krigagem a partir do inventário florestal em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Enciclopédia Biosfera*, v.7, n.13; p.727-745, 2011.

LEITE, D. R. *et al.* Análise comparativa entre dois procedimentos para estimativa da variável volume em um povoamento de *Eucalyptus urophylla*, no município de Mineiros – Goiás. *Enciclopédia Biosfera*, v.7, n.13, p.1684-1700, 2011.

LOUREIRO, G. H. *et al.* Avaliação de equações de afilamento em um plantio de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze utilizando o diâmetro como variável dependente. In: Congresso Florestal Paranaense, 2012, Anais... Curitiba - PR. 4º Congresso Florestal Paranaense, 8p. 2012.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. *Dendrometria*. 2.ed. Guarapuava: UNICENTRO, 2009. 309p.

MENDONÇA, A. R. *et al.* Avaliação de funções de afilamento visando a otimização de fustes de *Eucalyptus* sp. para multiprodutos. *Cerne*, v.13, n.1, p.71-82, 2007.

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

PRODAN, M. *et al.* *Mensura Forestal*. San José, C. R: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Instituto Internacional de Cooperación para la Agricultura (IICA), 1997, 586p.

QUEIROZ, D. *et al.* Identidade de modelos em funções de afilamento para *Mimosa scabrella* Benth em povoamentos nativos da região metropolitana de Curitiba/PR. *Floresta*, Curitiba, v.38, n.2, p.339-349, 2008.

SIQUEIRA NETO, M. *et al.* Emissão de gases do efeito estufa em diferentes usos da terra no bioma Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.63-76, 2011.

SOUZA, C. A. M. *et al.* Avaliação de modelos de afilamento não segmentados na estimação da altura e volume comercial de *Eucalyptus* sp. *Ciência Florestal*, v.18, n.3, p.387-399, 2008a.

SOUZA, C. A. M. *et al.* Avaliação de modelos de afileamento segmentados na estimação da altura e volume comercial de fustes de *Eucalyptus* sp. *Revista Árvore*, v.32, n.3, p.453-463, 2008b.

YOSHITANI JÚNIOR, M. *et al.* Funções de afileamento para plantios desbastados de *Pinus taeda*. *Floresta*, v.42, n.1, p.169-176, 2012.

Recebido em 03.02.2016

Aprovado após revisão em 22.12.2016