

Efeito do modelo de afilamento utilizado sobre a
conversão de fustes de árvores em multiprodutosEffect of taper model used on the conversion
of trees in boles into multiproductsBráulio Pizziôlo Furtado Campos¹, Daniel Henrique Breda Binoti²,
Márcio Lopes da Silva³, Hélio Garcia Leite⁴ e Mayra Luiza Marques da Silva Binoti⁵

Resumo

O objetivo deste estudo foi de quantificar e demonstrar o efeito do modelo de afilamento empregado sobre a conversão otimizada de fustes em multiprodutos. Dados de um povoamento de eucalipto (*Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla*) com 7 anos de idade foram empregados na análise. Assumiu-se que o proprietário irá realizar a colheita de 300 ha deste povoamento visando maximizar o retorno financeiro pelo uso da madeira e que, pelo programa de fomento, 30 m³ha⁻¹ devem ser destinados à uma empresa de celulose. Dados de árvores-amostra abatidas e cubadas nesse povoamento foram utilizados para ajuste de quatro modelos usuais de afilamento. As equações obtidas foram avaliadas estatisticamente e inseridas em um software de otimização. Com base nas características dos produtos comercializáveis pelo produtor e no preço desses produtos, um modelo de programação inteira foi utilizado para avaliar as receitas geradas para o produtor, ao empregar cada um dos modelos de afilamento ajustados. Embora todos os modelos testados tenham resultado em estimativas precisas e livres de viés, principalmente em relação a resultados encontrados na literatura, foi possível concluir que a escolha do modelo de afilamento tem efeito significativo sobre as receitas obtidas na conversão dos fustes em multiprodutos e na receita final do proprietário.

Palavras-chave: multiprodutos, Programação inteira, modelo de afilamento

Abstract

The objective of this study was to quantify and demonstrate the effect of the taper model employed on the optimized bole conversion into multiproducts. Data from a stand of eucalyptus (*Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla*) aged 7 years were used in the analysis. It was assumed that the owner will carry the harvest of 300 ha of this stand to maximize the financial return for the use of wood and that through a partnership program 30 m³ha⁻¹ should be assigned to a cellulose company. Data of sample and cubed trees in this population were used to fit the usual four taper models. The equations obtained were statistically evaluated and inserted into a software optimization. Based on the characteristics of tradable products by the producer and the price of these products, one integer programming model was used to evaluate the revenue generated for the producer by employing each of the adjusted taper models. While all models have resulted in accurate and estimates free of bias, especially related to results from the literature, we conclude that the choice of the taper model has a significant effect on the revenue from the conversion of boles in multiproducts and the ultimate gain for the owner.

Keywords: multiproduct, integer programming, taper model

¹Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. UFES - Universidade Federal do Espírito Santo. Av. Governador Lindemberg, 316, Centro, 29550-000 - Jerônimo Monteiro - ES - Brasil. E-mail: brauliopfc@hotmail.com.

²Bolsista de pós-doutorado CNPq. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. UFV - Universidade Federal de Viçosa. Avenida P. H. Rolfs s/n - Campus UFV, 36570-000 - Viçosa - MG - Brasil. E-mail: danielhbbinoti@gmail.com.

³Professor Doutor Departamento de Engenharia Florestal. UFV - Universidade Federal de Viçosa. Avenida P. H. Rolfs s/n - Campus UFV, 36570-000 - Viçosa - MG - Brasil. E-mail: marlosil@ufv.br.

⁴Professor Doutor Departamento de Engenharia Florestal. UFV - Universidade Federal de Viçosa. Avenida P. H. Rolfs s/n - Campus UFV, 36570-000 - Viçosa - MG - Brasil. E-mail: hgleite@gmail.com.

⁵Professora Doutora Departamento de Engenharia Florestal. UFVJM - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Rua da Glória, 187 - Centro - 39100-000 - Diamantina - MG - Brasil. E-mail: mayrabinoti@gmail.com.

INTRODUÇÃO

O mercado atual de madeira torna-se cada vez mais competitivo, exigindo o desenvolvimento e aplicação de técnicas e ferramentas a fim de reduzir custos e desperdícios nos processos de produção de um empreendimento florestal, aumentando assim sua competitividade e estabilidade no mercado. A aplicação de técnicas corretas de inventário florestal é fundamental para quantificação e classificação exata e precisa dos produtos madeireiros da floresta.

A aplicação de técnicas de otimização para definição de estratégias ótimas torna-se cada vez mais necessária dentro deste contexto, buscando maximizar o rendimento econômico do empresário. A conversão de árvores em multiprodutos é uma alternativa que vem sendo muito empregada no setor florestal, possibilitando um aumento significativo da receita oriunda de um povoamento florestal.

Funções de *taper* ou modelos de afilamento são equações essenciais para realização desse estudo, sendo utilizadas para descrever o perfil do fuste, estimando o valor do diâmetro a qualquer altura ao longo do tronco, determinar a qual altura um determinado diâmetro ocorre e o volume de seções do tronco, sendo uma ferramenta fundamental para quantificar multiprodutos de madeira (CAMPOS; LEITE, 2013). Assim, a precisão das estimativas obtidas por equações de afilamento pode ser decisiva para o sucesso do processo de otimização, o que tem sido objeto de estudo de vários autores (ASSIS et al., 2001; FISCHER et al., 2001; LEITE et al., 2011; MENDONÇA et al., 2007; SOUZA, 2009; SOUZA et al., 2008).

A gama de informações geradas pelos modelos de afilamento e suas grandes aplicações para estimar sortimentos florestais têm levado ao desenvolvimento de diferentes modelos, os quais buscam uma representação fiel do perfil do fuste (BALDWIN; FEDUCCIA, 1991; DEMA-

ERSCHALK, 1972; GARAY, 1979; GARCIA et al., 1993; KOZAK et al, 1969; LEITE; GARCIA, 2001; MAX; BURKHART, 1976; PIRES; CALEGÁRIO, 2007; ORMEROD, 1973).

A precisão de cada modelo dependerá do objetivo em que será empregado. Um modelo que estime com maior precisão o diâmetro, não necessariamente expressará melhor as alturas e os volumes (CAMPOS; LEITE, 2013). Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos buscando estudar o comportamento dos modelos de afilamento para diferentes finalidades, como: Assis (2001), Fischer (2001), Leite et al. (2011); Leite et al. (2006); Soares et al, (2004 Souza et al. (2008) dentre outros. Apesar da existência de diversos estudos com comparação de modelos de afilamento ajustados a dados obtidos em diferentes povoamentos, não é comum encontrar estudos quantificando e avaliando o efeito do emprego de diferentes modelos sobre o retorno econômico da conversão dos fustes em multiprodutos.

Assim, o presente estudo teve o objetivo quantificar e avaliar o efeito do modelo afilamento utilizado sobre a conversão de fustes de eucalipto em multiprodutos, utilizando um modelo de programação Inteira.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados neste estudo provieram de um plantio do clone híbrido de *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla* com 7 anos de idade na zona da mata, Minas Gerais. Foi assumido que o proprietário da área irá realizar a colheita de 300 ha deste plantio e que ele pretende maximizar o retorno financeiro. E, ainda, que o programa de fomento utilizado impõe que um volume mínimo de 30 m³ha⁻¹ deve ser destinado a uma empresa do setor de celulose. A distribuição diamétrica do povoamento com a altura estimada para cada classe de diâmetro encontra-se na Tabela 1 e as opções de comercialização na Tabela 2.

Tabela 1. Número de árvores por hectare (N/ha) e altura estimada por classe de DAP do povoamento.

Table 1. Number of trees per hectare (N / ha) and estimated height by dbh class of the stand.

	Classe de DAP (cm)								
	5	7	9	11	13	15	17	19	21
(N/ha)	7	15	33	97	280	481	148	26	4
Altura (m)	11,4	15,1	17,7	19,5	20,9	22,0	22,9	23,6	24,2

Tabela 2. Características dos produtos comercializáveis pelo produtor.

Table 2. Characteristics of marketable products by the producer.

Produtos	Comprimento (cm)	Diâmetro Mínimo	Diâmetro Máximo	Rendimento	R\$/m ³
Energia	220	4	40	0,98	50,00
Celulose	600	8	30	0,95	65,00
Escora	350	8	25	0,98	80,00
Serraria	300	15	50	0,95	150,00

Para ajuste e avaliação dos modelos, foram cubadas 110 árvores com *dap* variando de 6 a 21 cm e altura total de 12 a 25 m. foram medidos os diâmetros com e sem casca nas alturas comerciais de 0,1; 0,5; 1,0; 2,0 m e, a partir daí, a cada 2 m e altura, até a altura onde o diâmetro fosse de cerca de 4,0 cm. Foram testados cinco modelos de afilamento não segmentados, sendo os ajustamentos feitos com o emprego do software Statistica, INC (2014). A qualidade dos ajustamentos foi avaliada pela correlação linear entre valores de diâmetro ao longo do fuste, observados e estimados pelas equações de afilamento e, também, pela análise das distribuições de resíduos das estimativas de *d* obtidas ao aplicar essas equações. Os modelos empregados foram:

a) Kozak et al (1969)

$$\frac{d}{dap} = \sqrt{\beta_1 + \beta_2 \left(\frac{h}{H}\right) + \beta_3 \left(\frac{h}{H}\right)^2} + \varepsilon \quad (1)$$

b) Demaerschalk (1972)

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

c) Ormerod (1973)

$$\frac{d}{dap} = \left(\frac{H-h}{H-1,3}\right)^{\beta_3} + \varepsilon \quad (3)$$

d) Garay (1979)

$$\frac{d}{dap} = \beta_0(1 + \beta_1 \ln(1 - \beta_2 h^{\beta_3} H^{-\beta_3})) + \varepsilon \quad (4)$$

e) Garcia et al. (1993)

$$\frac{d_i}{dap} = \sqrt{\beta_1 - \beta_2 \left(\frac{h_i}{H}\right)^{0,5} + \beta_3 \left(\frac{h_i}{H}\right)} + \varepsilon \quad (5)$$

em que:

d_i = diâmetro comercial na altura h_i (cm);

dap = diâmetro a 1,30 m de altura (cm);

β_i = parâmetro a ser estimado ($i = 0, 1, 2$ e 3);

ε = erro aleatório supostamente com média zero e variância constante;

h_i = altura em que ocorre o diâmetro comercial d (m); e

H = altura total (m).

O processamento dos dados foi feito utilizando o software *OtimToras*, que utiliza um algoritmo de programação inteira, *Branch-and-Bound*. Este software é de natureza livre e pode ser baixado em <http://neuroforest.ucoz.com>, onde são encontrados outros sistemas para aplicações diversas em mensuração e manejo florestal.

O modelo de programação inteira implementado no *OtimToras* foi formulado assim:

Função objetivo:

$$Max.Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (6)$$

$x_{ij} \in \{0,1\}$

em que:

Z = Valor Presente Líquido Global (VPL) (R\$);

x_{ij} = variáveis de decisão, representando a j -ésima alternativa de corte adotada na i -ésima classe de diâmetro;

c_{ij} = VPL por cada classe de diâmetro i , seguindo a alternativa de corte j ;

m = número total de classe de diâmetro; e

n é número total de alternativas de corte para a i -ésima classe de diâmetro.

Restrição de classe de diâmetro:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (7)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}$$

Logo se x_{ij} assumir valor 1 a j -ésima será adotada a alternativa na i -ésima classe de diâmetro.

a) Restrição de demanda:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ijk} x_{ij} \geq Dmin_k \quad \{k = 0,1, \dots, H-1\} \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ijk} x_{ij} \leq Dmax_k \quad \{k = 0,1, \dots, H-1\} \quad (9)$$

em que:

x_{ij} = variáveis de decisão, representando a j -ésima alternativa de corte adotada na i -ésima classe de diâmetro;

m = número total classes de diâmetro;

n = número total de alternativas de corte para a i -ésima classe de diâmetro;

v_{ijk} = volume (m^3) produzido por classe de diâmetro, do produto k , pela i -ésima classe de diâmetro adotando-se a j -ésima alternativa de corte; e

$Dmin_k$ e $Dmax_k$ = demandas volumétricas (m^3) mínima e máxima respectivamente, de cada produto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o ajuste dos modelos de afilamento e análise dos coeficientes de correlação, entre valores de diâmetro observados e estimados, observa-se que todos os modelos testados tiveram boa precisão para descrever o perfil do fuste. Como evidenciado na Tabela 3, o modelo de Garay teve o melhor desempenho e o modelo de Ormerod com o menor coeficiente de determinação, porém não apresentando diferença significativa.

A Figura 1 demonstra a correlação entre valores de diâmetro observado e estimado e o gráfico de perfil do fuste. No primeiro, nota-se uma melhor correlação do modelo de Garay seguido do modelo de Garcia. Já nos gráficos de perfil, nota-se uma pequena discrepância de todos modelos, sendo o modelo de Garay o que melhor se ajustou a tendência estimada à observada.

Tabela 3. Parâmetros e estatísticas do ajuste dos modelos de afilamento para o híbrido *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla*, aos 7 anos.

Table 3. Parameters and statistics from the taper models fitted for hybrid *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla* at 7 years old.

Modelo de afilamento	Parâmetros				Estatísticas	
	β_0	β_1	β_2	β_3	R ²	Rxy
Kozak	1,17434	-1,88911	0,70229	-	0,9776	0,9887
Demaerschalk	0,04844	0,91382	-0,33965	0,37187	0,9779	0,9889
Ormerod	0,70850	-	-	-	0,9749	0,9874
Garay	1,18568	0,33539	0,95611	0,36150	0,9848	0,9924
Garcia	1,40838	-1,35846	-0,06400	-	0,9813	0,9906

Todos os modelos apresentaram resíduos com baixa tendenciosidade de superestimação em diâmetros menores e em torno da média, podendo ser observado na Figura 2. Nota-se uma menor tendência e menor amplitude de dispersão dos resíduos no modelo de Demaerschalk seguido do modelo de Garay.

Quando diferentes funções de afilamento foram utilizadas para conversão de árvores em multiprodutos, notou-se uma diferença considerável de acordo com o modelo adotado. Um maior rendimento (175m³/ha) e maior receita (R\$ 13,865,80/ha) estimados

pelo modelo de Kozak, tendo um acréscimo de 9,4% no volume de madeira utilizada e 8,6% na receita quando comparados ao modelo de Ormerod, o qual obteve menores valores (160,66 m³/ha e R\$ 12,757,13/ha) (Tabela 4; Figura 3).

Mesmo com todos os modelos testados descrevendo o perfil ao longo do tronco fielmente e com pouca variação de precisão entre eles, gerou uma diferença de 9,4% no volume de madeira utilizada e 8,6% na receita, demonstrando com isso a importância da escolha do modelo de afilamento a ser usado para tal finalidade.

Tabela 4. Comparação de volume e receita estimados pelos modelos de afilamento: Kozak, Demaerschalk, Ormerod, Garay e Garcia.

Table 4. Comparison of volume and revenue estimated by taper equations: Kozak, Demaerschalk, Ormerod, Garay and Garcia.

Modelos de afilamento		Produtos				Resíduo	Total por hectare	Total em 300ha
		Energia	Celulose	Escora	Serraria			
Kozak	Vol (m ³)	25,585	30,002	104,093	15,394	1,648	175,073	52,521,867
	Rec (R\$)	1,279,24	1,950,13	8,327,40	2,309,03	-	13,865,80	4,159,741,43
Demaerschalk	Vol (m ³)	19,607	30,045	103,733	14,542	3,548	167,927	50,378,091
	Rec (R\$)	980,34	1,952,92	8,298,67	2,181,28	-	13,413,21	4,023,962,49
Ormerod	Vol (m ³)	18,271	31,797	95,971	13,994	3,981	160,033	48,009,884
	Rec (R\$)	913,53	2,066,82	7,677,70	2,099,08	-	12,757,13	3,827,138,91
Garay	Vol (m ³)	28,941	33,851	87,809	15,059	2,274	165,659	49,697,713
	Rec (R\$)	1,447,04	2,200,28	7,024,69	2,258,86	-	12,930,88	3,879,263,57
Garcia	Vol (m ³)	24,190	30,081	101,678	15,365	3,085	171,314	51,394,271
	Rec (R\$)	1,209,51	1,955,27	8,134,27	2,304,70	-	13,603,75	4,081,123,62

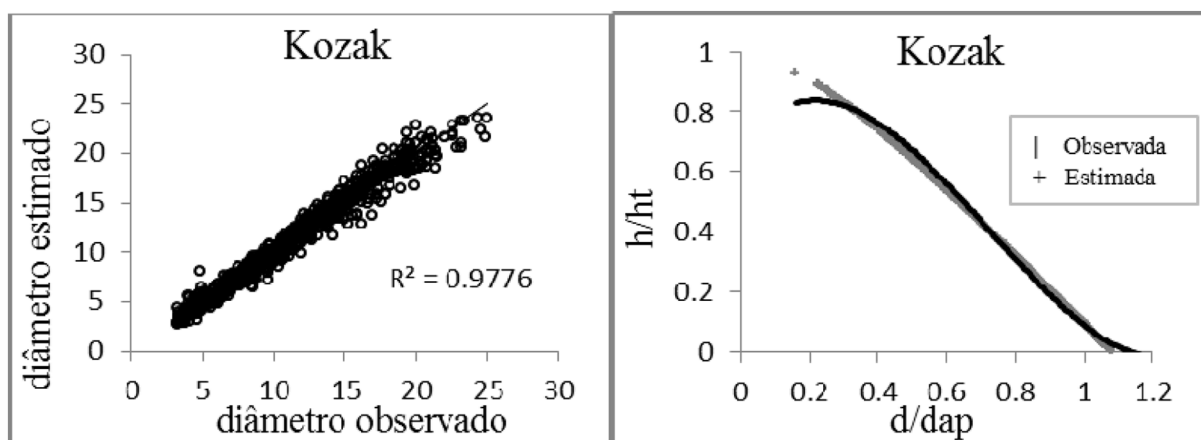


Figura 1. Gráficos comparando os ajustes dos modelos de afilamento em relação os diâmetros observados e estimados e perfil do tronco analisando a tendência entre as razões de posição por altura total e diâmetro por diâmetro a altura do peito.

Figure 1. Graphs comparing adjusted taper models in relationship with observed and estimated diameters and trunk profile by analyzing the trend between the relationships of the position by full height and diameter by diameter at breast height.

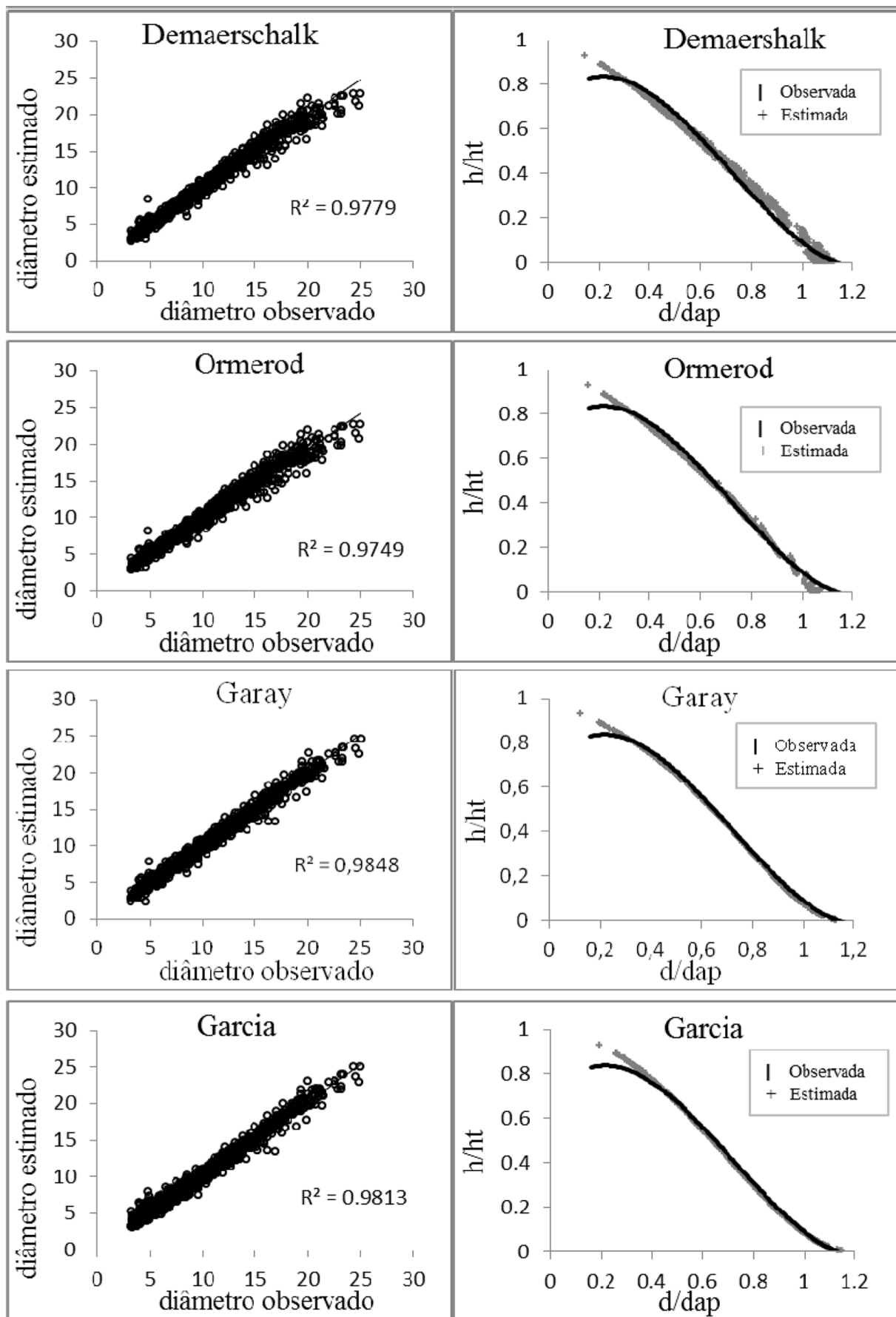


Figura 1 - Continuação. Gráficos comparando os ajustes dos modelos de afilamento em relação os diâmetros observados e estimados e perfil do tronco analisando a tendência entre as razões de posição por altura total e diâmetro por diâmetro a altura do peito.

Figure 1 - Continuation. Graphs comparing adjusted taper models in relationship with observed and estimated diameters and trunk profile by analyzing the trend between the relationships of the position by full height and diameter by diameter at breast height.

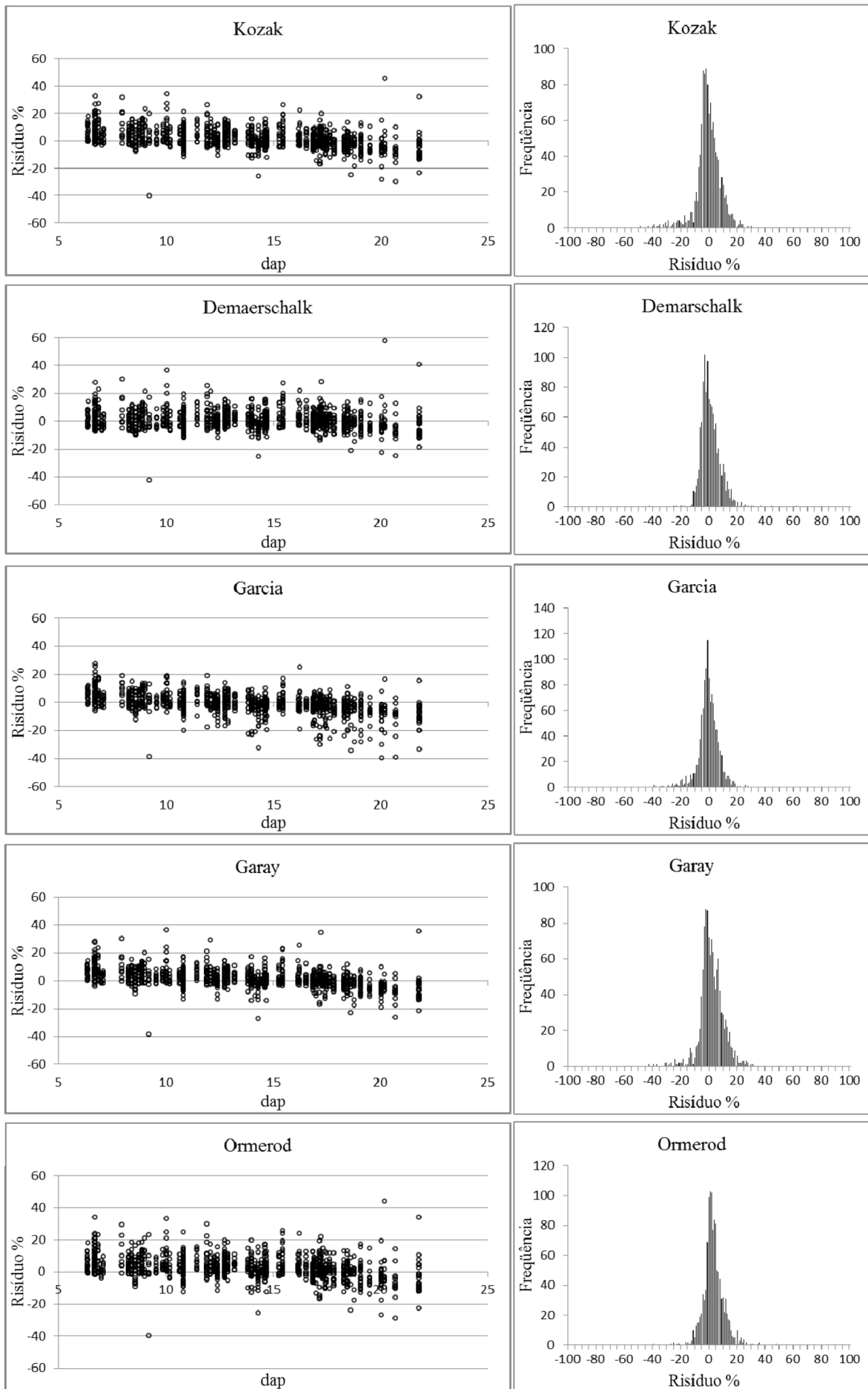
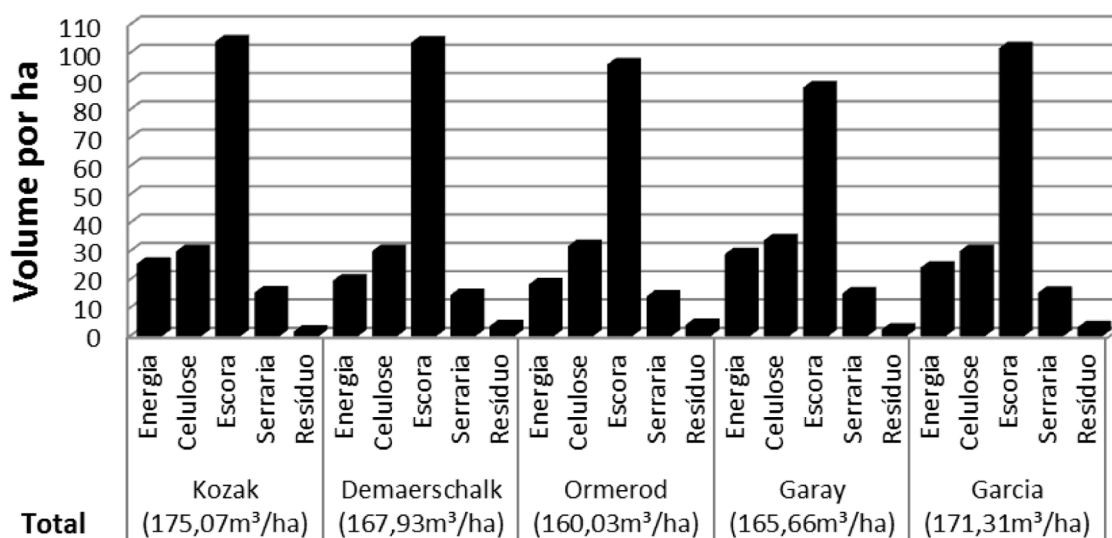


Figura 2. Gráfico de dispersão dos resíduos e histograma dos diâmetros estimados.
Figure 2. Scatter plot of residuals and histogram of the estimated diameters.

Volume estimado por modelo de *taper*



Receita estimada por modelo de *taper*

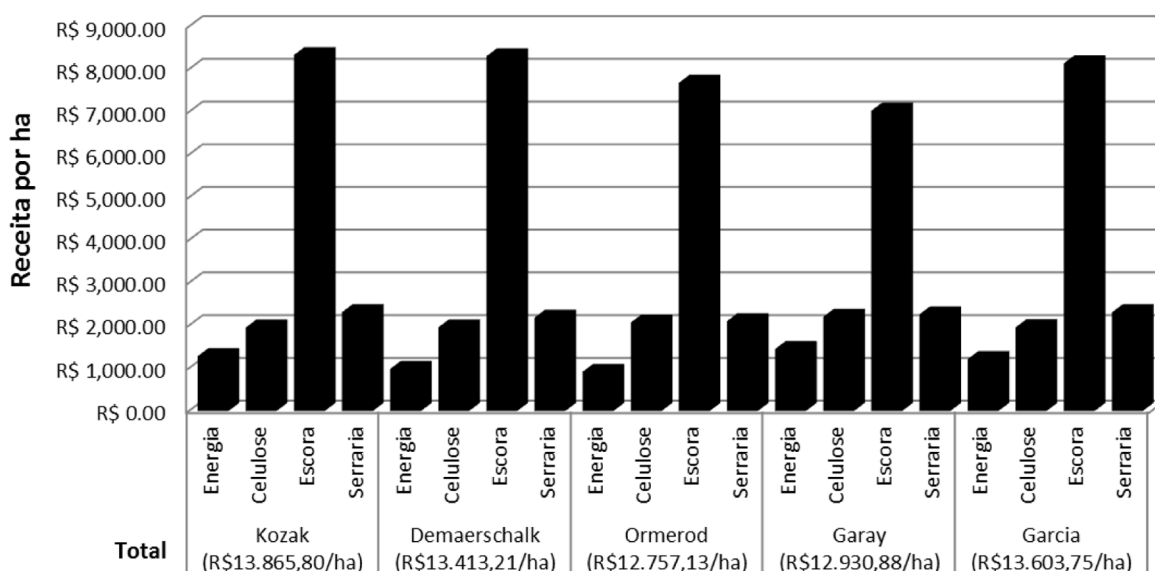


Figura 3. Volume e receita estimados pelos modelos de afilamento: Kozak, Demaerschalk, Ormerod, Garay e Garcia.
Figure 3. Volume and revenue estimated by taper models: Kozak, Demaerschalk, Ormerod, and Garay Garcia.

O modelo de Garay foi o que teve maior eficiência em estimar os diâmetros ao longo do tronco, tendo em vista um maior coeficiente de correlação e determinação, com melhor ajuste no gráfico do perfil do tronco, dispersão dos resíduos em torno da média e em forma de distribuição normal. Este obteve o segundo maior lucro e pode ser tido como o valor de referência para eventuais comparações.

CONCLUSÕES

O retorno econômico da conversão otimizada de fustes em multiprodutos depende do modelo de afilamento empregado, independente da exatidão das estimativas de diâmetro geradas pelos modelos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSIS, A. L.; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M.; ACERBI JUNIOR, F. W.; OLIVEIRA, A. D. Comparação de modelos polinomiais segmentados e não-segmentados na estimativa de diâmetros e volumes ao longo do fuste de *Pinus taeda*. *Cerne*, Lavras, v. 7, n. 1, p. 20-40, 2001.
- BALDWIN J. R. V. C.; FEDUCCIA, D. P. Compatible Tree-volume and upper-stem diameter equations for plantation Loblolly Pines in the West Gulf region. *Southern Journal Applied Forestry*, Bethesda, v. 15, n. 2, p. 92-97, 1991.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 3. ed. Viçosa: Editora UFFV, 2013. 605 p.
- DEMAERSCHALK, J. P. Integrated systems for the estimation of tree taper and volume. *Canadian Journal of Forest Research*, Ottawa, v. 3, n. 90, p. 90-94, 1972.
- FISCHER, F.; SCOLFORO, J. R. S.; ACERBI JUNIOR, F.W.; MELLO, J.M.; MAESTRI, R. Exatidão dos modelos polinomiais não-segmentados e das razões entre volumes para representar o perfil do tronco de *Pinus taeda*. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v.11, n. 1, p.167-188, 2001.
- GARAY, L. **Tropical forest utilization system**. VIII. A taper model for entire stem profile including buttressing. Seattle: Inst. Forest Prod. Univ. Wash., 1979. 64 p. (Contrib. 36).
- GARCIA, S. L. R.; LEITE, H. G.; YARED, J. A. G. Análise do perfil do tronco de morototó (*Didymopanax morototonii*) em função do espaçamento. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1., CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. *Anais...* Curitiba: SBS/SBEF, 1993. p. 485-491.
- KOZAK, A.; MUNRO, D. D.; SMITH, J. G. H. Taper functions and their applications in forest inventory. *Forest Chronicle*, Ottawa, v.45, n. 4, p.278-283, 1969.
- LEITE, H. G.; NETO, R. R. O.; MONTE, M. A.; FARDIN, L.; ALCANTARA, A. M.; BINOTI, M. L. M. S.; CASTRO, R. V. O. Modelo de afilamento de cerne de *Tectona grandis* L.f. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 39, n. 89, p.53-59, 2011.
- LEITE, H. G.; GAMA, J. R. V.; CRUZ, J. P.; SOUZA, A. L. Função de afilamento para *Virola surinamensis* (Roll.) Warb. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 30, n.1, p. 99-106, 2006.
- LEITE, H. G.; GARCIA, S. L. R. **Pesquisa e desenvolvimentos em inventário, mensurações e manejo florestal na CENIBRA**. Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais, 2001. 49 p. (Relatório Técnico, SIF).
- MAX, T. A., BURKHART, H. E. Segmented polynomial regression applied to taper equations. *Forest Science*, Bethesda, v. 22, n. 2, p. 283-289, 1976.
- MENDONÇA, A. R.; SILVA, G. F.; OLIVEIRA, J. T. S.; NOGUEIRA, G. S. Avaliação de funções de afilamento visando a otimização de fustes de *Eucalyptus* spp. para multiprodutos. *Cerne*, Lavras, v. 13, n. 1, p. 71-82, 2007.
- NEUROFOREST. Disponível em: <<http://neuroforest.ucoz.com/>>. Acesso em 10 jun 2013.
- ORMEROD, D. W. A simple bole model. *Forest Chronicle*, Toronto, v. 49, n. 3, p. 136-138, 1973.
- PIRES, L. M.; CALEGARIO, N. Ajuste de modelos estocásticos lineares e não-lineares para a descrição do perfil longitudinal de árvores. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 845-852, 2007.
- SOARES, T. S.; LEITE, H. G. VALE, A. B. Um modelo alternativo para a quantificação de multiprodutos em árvores individuais. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 875-882, 2004.
- SOUZA, C. A. M. **Modelos de afilamento para *Pinus taeda* L. ajustados segundo a forma do tronco e métodos de estratificação**. 2009. 120 p. Tese. (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- SOUZA, C. A. M.; CHASSOT T.; FINGER.; C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; FLEIG, F. D. Modelos de afilamento para o sortimento do fuste de *Pinus taeda* L. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 38, n. 9, p. 2506-2511, 2008.

Recebido em 09/12/2013

Aceito para publicação em 03/07/2014