

## MODELOS PARA ESTIMATIVAS VOLUMÉTRICAS DE FUSTES DE *Pinus taeda* L.

Rômulo Môra<sup>1</sup>, Afonso Figueiredo Filho<sup>2</sup>, Sinta Valerio Kohler<sup>3</sup>, Rodrigo Otávio Veiga de Miranda<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Professor Mestre do Departamento de Engenharia Florestal da Faculdade de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Mato Grosso (romulomef@yahoo.com.br), Cuiabá-MT, Brasil

<sup>2</sup> Professor Doutor do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Estadual do Centro Oeste, Irati-PR, Brasil

<sup>3</sup> Engenheiro(a) Florestal, Doutorando(a) no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, Brasil

Recebido em: 30/09/2014 – Aprovado em: 15/11/2014 – Publicado em: 01/12/2014

### RESUMO

Neste estudo objetivou-se analisar estimativas de volumes individuais por árvores obtidas por modelos de volume total e suas derivações em funções de afilamento constituindo sistemas integrados. Utilizou-se seis sistemas, cada um composto por um modelo de volume e uma função de afilamento, baseados no modelo de Schumacher e Hall (sistema 1), no modelo de Spurr (sistema 2), no volume sobre a área basal em função da altura sem intercepto (sistema 3) e com intercepto (sistema 4), no volume sobre a área basal em função da altura e altura ao quadrado (sistema 5) e no modelo de Honer (sistema 6). Para os ajustes foram utilizados 677 fustes de *Pinus taeda* L. (amostra do estudo), localizados no município de Piraí do Sul, no estado do Paraná. A escolha do sistema mais preciso foi feita por análise gráfica dos resíduos,  $Syx(\%)$  e  $PVE$ . Os erros absolutos dos dois métodos para cada sistema foram comparados pelo teste t. Os seis modelos de volume e os seis de afilamento foram comparados pela análise de variância. Considerando, o  $Syx(\%)$ ,  $PVE$  e a análise gráfica dos resíduos para cada sistema, o sistema 1 baseado no tradicional modelo de Schumacher-Hall para as estimativas de volume total foi o mais preciso. Não houve diferença estatística média entre os volumes individuais estimados pela equação de volume e pela respectiva função de afilamento derivada em cada sistema pelo teste t. Da mesma forma, não houve diferença nas equações de volume e afilamento entre os diferentes sistemas.

**PALAVRAS-CHAVE:** funções de afilamento, modelos volumétricos, regressão

### MODELS FOR ESTIMATE VOLUMETRIC OF STEM TO *Pinus taeda* L.

### ABSTRACT

This study aimed to analyze estimates of individual volumes for trees obtained by models of total volume and its derivations in taper functions constituting integrated systems. Used been six systems, each composed of a volume model and a taper function, based on the Schumacher and Hall model (system 1), on Spurr model (system 2), on volume over basal area as a function of height without intercept

(system 3) and with intercept (system 4), on volume on the basal area as a function of height and height squared (system 5) and on Honer model (system 6). To the adjustments, 677 stems of *Pinus taeda* L. were used (study sample), located in Piraí do Sul, State of Paraná. The choice of system more accurate was made by residual plot,  $Syx(\%)$  and  $PVE$ . The absolute errors of the two methods for each system were compared by t test. The six models in volume and six taper functions were compared by analysis of variance. Considering  $Syx(\%)$ ,  $PVE$  and residual plots for each system, the system 1 based on the traditional Schumacher and Hall model to estimate the total volume was the most precise. There was no statistical average difference between individual volumes estimated by the volume equation and taper in each system. Similarly, no difference in the volume and taper equations between different systems.

**KEYWORDS:** taper functions, volumetric models, regression

## INTRODUÇÃO

Espécies do gênero *Pinus* estão entre as mais plantadas no Brasil, sendo que a maior concentração de povoamentos desse gênero está localizada na região sul do país, representando 83% de um total de 1.641.892 ha plantados. A maior concentração de povoamentos de *Pinus* no sul se deve ao fato de que essa região possui as melhores condições edafoclimáticas para esse gênero e concentra os principais centros processadores de sua madeira (ABRAF, 2012).

O volume de madeira de um povoamento é a variável de maior interesse para o mercado e para o planejamento florestal. As estimativas de volume de madeira nos inventários florestais envolvem, sobretudo, a utilização de equações volumétricas (OLIVEIRA et al., 2009). Segundo FIGUEIREDO FILHO et al. (1993) o volume das árvores têm sido estimados com facilidade e precisão empregando equações de volume ajustadas a partir de medições do diâmetro a altura do peito e da altura total.

Em determinados casos, apenas conhecer o volume total das árvores não é suficiente, deseja-se também conhecer o volume de partes específicas do tronco, determinadas de acordo com dimensões pré-estabelecidas pelo mercado. Essa classificação do tronco com base em suas dimensões é chamada sortimento florestal. Segundo MANCINI (2011), regimes multiprodutos possuem um efeito de redução de riscos, pois, embora a produção desse tipo de toras seja cada vez mais consumida por nichos específicos, o mercado sempre valorizará madeira de melhor qualidade.

A função de afilamento é uma ferramenta dendrométrica um pouco mais complexa às equações de volume, mas oferecem uma maior quantidade de informações. O leque de informações que essas funções podem propiciar, aliado às necessidades crescentes de estimar os sortimentos das florestas têm levado ao desenvolvimento de diferentes técnicas de modelagem do perfil dos fustes das espécies florestais. Esse fato tem justificado a realização de estudos na tentativa de aliar estimativas confiáveis à praticidade de utilização das funções de afilamento (SOUZA et al. 2008).

Segundo HORLE et al. (2010), as funções de afilamento podem estimar os diâmetros mínimos comerciais e conseqüentemente o número de toras produzidas. Ainda, segundo esses autores, as estimativas de altura pelo diâmetro são muito úteis quando se quer estimar o comprimento do tronco para posterior otimização do uso do fuste.

Nos modelos de afilamento, os valores da maioria dos parâmetros são definidos pela condição de integração da equação de afilamento, que tende a produzir exatamente o volume total por árvore como obtido pela equação de volume, a partir do qual é derivado. Os parâmetros indefinidos, os chamados "parâmetros livres", podem ser escolhidos de forma a obter o melhor encaixe possível do afilamento, minimizando o erro padrão de estimativa. Por isso são necessários alguns dados sobre afilamento. Os parâmetros livres podem ser definidos por um procedimento de mínimos quadrados (geralmente não linear) para minimizar o erro padrão (DEMAERSCHALK, 1973).

Dessa forma neste estudo objetivou-se analisar as estimativas de volumes por árvores obtidas por modelos de volume total e suas derivações em funções de afilamento constituindo sistemas integrados.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

O estudo foi realizado com dados de uma empresa de base florestal, no município de Piraí do Sul, região Centro-Oriental do estado do Paraná. A altitude é de 1036 m sobre o nível do mar (PREFEITURA MUNICIPAL DE PIRAÍ DO SUL, 2014) e precipitação média anual de 1440 mm (IGUAÇU CELULOSE E PAPEL S/A, 2013). O clima, segundo classificação de Köppen, caracteriza-se em subtropical úmido mesotérmico (Cfb), com a temperatura média máxima nos meses mais quentes inferior a 22°C e inferior a 18 °C nos meses mais frios, com verões moderadamente quentes (FOERSTER et al., 2011).

### Dados

Os dados utilizados neste estudo provieram de 677 fustes (Tabela 1) de *Pinus taeda* L., constituindo a amostra do estudo, que corresponde à espécie do gênero mais plantada no sul do país.

**TABELA 1:** Distribuição de frequência das árvores por classes de diâmetro e altura

Classes de altura (m)	Classes de diâmetro (cm)									Total
	5,0 - 9,9	10,0 - 14,9	15,0 - 19,9	20,0 - 24,9	25,0 - 29,9	30,0 - 34,9	35,0 - 39,9	40,0 - 44,9	45,0 - 49,9	
5,0 - 6,9	26	10								36
7,0 - 8,9	9	44	6							59
9,0 - 10,9	7	35	35	6	1					84
11,0 - 12,9		21	45	15	1					82
13,0 - 14,9		9	24	21	7	1				62
15,0 - 16,9		5	37	24	13	3				82
17,0 - 18,9		1	23	36	10	10				80
19,0 - 20,9		3	11	27	20	4	2			67
21,0 - 22,9			3	27	22	6	2	2		62
23,0 - 24,9				5	15	6	4	1		31
25,0 - 26,9				5	5	5	2	2		19
27,0 - 28,9				1	2	3	1			7
29,0 - 30,9						1	1			3
31,0 - 32,9						1		1	1	3
Total	42	128	184	167	98	39	12	5	2	677

A cubagem, para todos os 677 fustes de *Pinus taeda* L., consistiu em mensurar diâmetros nas alturas (*h*) absolutas 0,1; 0,3; 0,7 e 1,3 m e nas alturas relativas 5, 10, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85, 95% da altura total (*H*) de cada árvore.

O número de árvores, bem como as estatísticas descritivas das variáveis *DAP* e *H* constam na Tabela 2.

**TABELA 2:** Estatísticas descritivas do conjunto de dados para ajuste de *Pinus taeda* L.

Estatísticas	<i>DAP</i>	<i>H</i>
Número de fustes	677	
Média	20,05	15,41
Desvio-padrão	7,09	5,60
Valor Mínimo	6	5,7
Valor Máximo	48,1	32,4

Os diâmetros (*d*) nas várias alturas foram medidos com auxílio da fita diamétrica. Para cada árvore, mediu-se também o diâmetro a 1,30 m do solo (*DAP*) e a altura total (*H*) que foi mensurada com auxílio de um hipsômetro.

A obtenção dos volumes totais para cada fuste foi realizada somando-se os volumes parciais de todas as seções utilizando-se o método de cubagem rigorosa de Smalian. Por esse método, aplicado nesse estudo, mensurou-se os diâmetros nas extremidades de cada torete (cada uma das partes seccionadas do fuste). Esses diâmetros foram utilizados para calcular as áreas seccionais (*g<sub>i</sub>*). A média das áreas seccionais multiplicada pelo comprimento (*L<sub>j</sub>*) de cada torete resultou no volume do torete. O volume total foi então obtido somando os volumes parciais relativos a cada um dos toretes constituintes do fuste. O cálculo pode ser explicitado pelas seguintes fórmulas:

$$g_i = \frac{\pi * (d^2)}{40000} \quad v_j = \frac{(g_i + g_{i+1})}{2} L_j \quad vt = \sum_{j=1}^n v_j$$

em que: *g<sub>i</sub>* = área seccional de cada extremidade (m<sup>2</sup>) do torete; *v<sub>j</sub>* = volume do *j*-ésimo torete, sendo o índice *i* relativo às áreas seccionais extremas do torete; *L<sub>j</sub>* = o comprimento do *j*-ésimo torete e *vt* = volume total.

### Sistemas integrados de volumes totais e funções de afilamento

A maioria das equações de volume comumente utilizadas podem ser convertidas para as equações de afilamento compatíveis.

Esses sistemas foram idealizados por Demaerschalk em trabalhos publicados nos anos de 1972 e 1973 e foram aplicados nesse estudo. Este autor desenvolveu os seguintes sistemas integrados baseados no: modelo de Schumacher e Hall (1933) (DEMAERSCHALK, 1972), SPURR (1952), volume ao longo da área basal em função da altura da árvore sem intercepto e com intercepto, volume ao longo da área basal em função da altura e/ou a altura ao quadrado e modelo de Honer (1965) (DEMAERSCHALK, 1973). O intercepto dos modelos, quando apresentado, representa um parâmetro (coeficiente) do modelo que não está associado a nenhuma variável do estudo, podendo ser denominado também de constante da regressão.

Para a composição do estudo foram considerados sistemas integrados propostos por DEMAERSCHALK (1972, 1973) nos quais as funções de afilamento são derivadas de modelos de volumes totais. Os sistemas adotados nesse estudo foram:

**Sistema 1 – Baseado no modelo volumétrico de Schumacher e Hall**

$$V = \beta_0 D^{\beta_1} H^{\beta_2} + \varepsilon$$

que pode ser convertido na função de afilamento

$$d = 10^{\beta_0} D^{\beta_1} (H-h)^{\beta_2} H^{\beta_2} + \varepsilon$$

$$\hat{V} = K 10^{2\hat{\beta}_0} D^{2\hat{\beta}_1} H^{2\hat{\beta}_2} \frac{(H-h_1)^{2\hat{\beta}_2+1} - (H-h_2)^{2\hat{\beta}_2+1}}{2\hat{\beta}_2+1}$$

**Sistema 2 – Baseado no modelo volumétrico de Spurr**

$$V = \beta_0 + \beta_1 (D^2 H) + \varepsilon$$

que pode ser convertido na função de afilamento

$$d = D \sqrt{\beta_0 \left[ \frac{(H-h)^{\beta_1}}{D^2 H^{\beta_1+1}} \right] + \beta_2 \left( \frac{H-h}{H} \right)^{\beta_3}} + \varepsilon$$

$$\hat{V} = KD \hat{\beta}_0 \left\{ \left[ \frac{(H-h_1)^{\hat{\beta}_1+1} - (H-h_2)^{\hat{\beta}_1+1}}{D^2 H^{\hat{\beta}_2+1} \hat{\beta}_1+1} \right] + \hat{\beta}_2 \left[ \frac{\left(1-\frac{h_1}{H}\right)^{\hat{\beta}_3+1} - \left(1-\frac{h_2}{H}\right)^{\hat{\beta}_3+1}}{\hat{\beta}_3+1} \right] H \right\}$$

**Sistema 3 – Baseado no volume sobre a área basal em função da altura (sem intercepto)**

$$V / g = \beta_1 H + \varepsilon$$

que pode ser convertido na função de afilamento

$$d = D \sqrt{\beta_0 \left( \frac{H-h}{H} \right)^{\beta_1}} + \varepsilon$$

$$\hat{V} = KD \hat{\beta}_0 \left\{ \left[ \frac{(H-h_1) \left( \frac{H-h_1}{H} \right)^{\hat{\beta}_1} - (H-h_2) \left( \frac{H-h_2}{H} \right)^{\hat{\beta}_1}}{\hat{\beta}_1+1} \right] \right\}$$

**Sistema 4 – Baseado no volume sobre a área basal em função da altura (com intercepto)**

$$V / g = \beta_0 + \beta_1 H + \varepsilon$$

que pode ser convertido na função de afilamento

$$d = D \sqrt{\beta_0 \left[ \frac{(H-h)^{\beta_1}}{H^{\beta_1+1}} \right] + \beta_2 \left( \frac{H-h}{H} \right)^{\beta_3}} + \varepsilon$$

$$\hat{V} = KD \left\{ \hat{\beta}_0 \left[ \frac{(H-h_1)^{\hat{\beta}_1+1} - (H-h_2)^{\hat{\beta}_1+1}}{H^{(\hat{\beta}_1+1)} (\hat{\beta}_1+1)} \right] + \hat{\beta}_2 H \left[ \frac{\left(1-\frac{h_1}{H}\right)^{\hat{\beta}_3+1} - \left(1-\frac{h_2}{H}\right)^{\hat{\beta}_3+1}}{(\hat{\beta}_3+1)} \right] \right\}$$

### Sistema 5 – Baseado no volume sobre a área basal em função da altura e altura ao quadrado

$$V/g = \beta_0 + \beta_1 H + \beta_2 H^2 + \varepsilon$$

que pode ser convertido na função de afilamento

$$d = D \sqrt{\beta_0 \left[ \frac{(H-h)^{\beta_1}}{H^{\beta_1+1}} \right] + \beta_2 \left( \frac{H-h}{H} \right)^{\beta_3} + \beta_4 \left[ \frac{(H-h)^{\beta_5}}{H^{\beta_5-1}} \right] + \varepsilon}$$

$$\hat{V} = KD^2 \left\{ \hat{\beta}_0 \left[ \frac{(H-h_1)^{\hat{\beta}_1+1} - (H-h_2)^{\hat{\beta}_1+1}}{H^{(\hat{\beta}_1+1)}(\hat{\beta}_1+1)} \right] + \hat{\beta}_2 H \left[ \frac{\left(1 - \frac{h_1}{H}\right)^{\hat{\beta}_3+1} - \left(1 - \frac{h_2}{H}\right)^{\hat{\beta}_3+1}}{(\hat{\beta}_3+1)} \right] + \hat{\beta}_4 \left[ \frac{(H-h_1)^{\hat{\beta}_5-1} - (H-h_2)^{\hat{\beta}_5-1}}{H^{(\hat{\beta}_5+1)}(\hat{\beta}_5+1)} \right] \right\}$$

### Sistema 6 – Baseado no modelo volumétrico de Honer

$$V = D^2 / (\beta_0 + \beta_1 / H) + \varepsilon$$

que pode ser convertido na função de afilamento

$$d = D \sqrt{\beta_0 \left[ \frac{(H-h)^{\beta_1}}{\beta_2 H^{\beta_1+1} + \beta_3 H^{\beta_1}} \right] + \varepsilon}$$

$$\hat{V} = KD^2 \hat{\beta}_0 \left\{ \left[ \frac{(H-h_1)^{\hat{\beta}_1+1} - (H-h_2)^{\hat{\beta}_1+1}}{(\hat{\beta}_1+1)\hat{\beta}_2 H^{\hat{\beta}_1+1} + \hat{\beta}_3 H^{\hat{\beta}_1}} \right] \right\}$$

em que:  $V$  = volume total individual com casca ( $m^3$ );  $D = DAP$ , diâmetro à altura do peito com casca (cm);  $d$  = diâmetro medido a altura  $h$  (cm);  $H$  = altura total da árvore (m);  $g$  = área seccional individual à altura do peito ( $m^2$ );  $\beta_i$  = coeficientes dos modelos;  $(H - h_1)$  e  $(H - h_2)$  são, respectivamente, o limite inferior e superior da seção no fuste; e  $\varepsilon$  = erro aleatório.

Para os modelos lineares os ajustes utilizaram como base o método dos mínimos quadrados ordinários. Nos ajustes não lineares foi utilizado o método iterativo proposto por Marquardt. Para ambos, os parâmetros foram avaliados pelo teste  $t$  à 95% de confiança. Para verificar a confiabilidade desses modelos ajustados foram obtidas as estatísticas erro padrão da estimativa ( $Syx(\%)$ ) e coeficiente de determinação ajustado ( $R^2(\%)$ ).

### **Estatísticas de precisão das estimativas volumétricas por árvore**

Os resultados dos volumes estimados obtidos nos ajustes de volume total e função de afilamento de cada sistema foram comparados com o volume total obtido pelo método de Smalian, considerado nesse estudo como volume real.

Para avaliar a precisão das estimativas e escolher os ajustes mais precisos para os dados, as comparações dos métodos em cada sistema integrado foram feitas através da estatística erro padrão da estimativa ( $Syx(\%)$ ), percentual da variação explicada ( $PVE$ ) e análise gráfica de resíduos.

As estatísticas  $Syx(\%)$  e o  $PVE$  são representadas pelas seguintes expressões:

$$Syx(\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}}}{\bar{y}} 100$$

$$PVE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

em que  $y_i$ ,  $\hat{y}_i$  e  $\bar{y}$  são respectivamente os valores observados, os valores preditos e a média dos valores das variáveis dependentes;  $n$  é o total de observações usados no ajuste; e  $p$  é o número de parâmetros do modelo.

Na estatística  $Syx(\%)$ , quanto mais baixo for seu valor, mais precisas são as estimativas, enquanto na estatística  $PVE$  quanto maior for seu valor, maior é o percentual de variação explicada pelas estimativas de volume.

Os valores residuais utilizados nas ilustrações são expressos por:

$$resíduo(\%) = \frac{(y_i - \hat{y}_i)}{y_i} 100$$

Para aumentar a confiabilidade das estatísticas entre os volumes obtidos pelas duas metodologias em cada sistema, a média dos erros absolutos do modelo de volume total foi comparada a média dos valores obtidos pela função de afilamento através de um teste t para duas amostras independentes para verificar significância entre os resultados obtidos, utilizando um nível de significância de 5%.

Para realizar esse teste em cada sistema, primeiro calcula-se um teste F para duas amostras para verificar homogeneidade de variância entre as duas amostras envolvidas, considerando 95% de confiabilidade. Se o resultado for não significativo para o F calcula-se o teste t para duas amostras considerando variâncias homogêneas e, caso o resultado seja significativo para o teste F, calcula-se o mesmo teste t, porém considerando variâncias heterogêneas (estatisticamente diferentes).

Como última análise para verificar diferença entre as estimativas volumétricas dos modelos de volume e dos modelos de afilamento entre os sistemas foi realizada uma análise de variância. Considerou-se cada modelo de volume e cada função de afilamento de cada sistema como os tratamentos de um delineamento inteiramente casualizado (DIC), utilizando o teste de Tukey, se necessário. Para todos os testes foi utilizado um nível de significância de 5%.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Equações ajustadas

Efetuada o procedimento de ajuste, todos os coeficientes ajustados das equações de volume total e afilamento (Tabela 3) tiveram efeito significativo pelo teste t. Isso reforça a importância de cada variável independente na estimativa da variável dependente, neste caso volume e diâmetro, para equação de volume total e afilamento respectivamente.

Os valores de  $R^2(\%)$  foram satisfatórios para ambas as equações ajustadas, sendo superior a 98% para as equações de volume na estimativa de volume e de 94% para funções de afilamento na estimativa de diâmetro, mostrando assim que esses modelos são confiáveis (Tabela 3). Padrões semelhantes foram encontrados para estatística  $Syx(\%)$  nos ajustes. Isso reforça o fato que quando um ajuste tem altos valores de coeficientes de determinação têm baixos erros padrões da estimativa.

**TABELA 3:** Coeficientes e estatísticas de precisão dos modelos de volume total e afilamento dos sistemas integrados.

Sistema	Modelo	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$\hat{\beta}_4$	$\hat{\beta}_5$	$R^2$ (%)	Syx(%)
1	Volume	0,000048	1,8336	1,0817				98,55	11,95
	Afilamento	0,1337	0,961	0,8313	-0,8556			94,29	13,76
2	Volume	0,00944	0,000035					98,36	12,72
	Afilamento	8323,9	190	1,2009	1,5935			98,02	8,11
3	Volume		0,4478					98,34	12,82
	Afilamento	1,2552	1,6579					97,29	9,48
4	Volume	0,3609	0,4314					98,35	12,77
	Afilamento	9,0344	37,3973	1,1119	1,4958			98,40	7,30
5	Volume	-0,993	0,5708	-0,00336				98,39	12,65
	Afilamento	9,9856	42,3857	1,2638	1,606	-0,00923	3,8328	98,52	7,00
6	Volume	73,862	26725,1					98,37	12,70
	Afilamento	5,9671	1,6627	0,0291	4,2165			97,40	9,29

#### Estimativas médias por classe de diâmetro

Através dos modelos de volume total e funções de afilamento ajustados para cada um dos sistemas, calcularam-se as estimativas de volume para todos os 677 fustes. A partir desses volumes estimados, foram obtidos os volumes médios para cada método em cada sistema para as classes diâométricas, juntamente com o volume médio real (calculado por Smalian) também para as classes de diâmetro (Tabela 4).

**TABELA 4:** Volume real médio (m<sup>3</sup>) e volumes médios estimados (m<sup>3</sup>) pelos dois métodos de cada sistema por classe de diâmetro

Métodos	Classes de diâmetro (cm)								
	5,0 - 9,9	10,0 - 14,9	15,0 - 19,9	20,0 - 24,9	25,0 - 29,9	30,0 - 34,9	35,0 - 39,9	40,0 - 44,9	45,0 - 49,9
Volume Real	0,0220	0,0629	0,1542	0,3226	0,5435	0,7976	1,1931	1,3937	2,1580
VT	0,0215	0,0649	0,1578	0,3219	0,5365	0,7850	1,1596	1,4054	2,2737
S1 AF	0,0220	0,0663	0,1602	0,3249	0,5434	0,8034	1,1846	1,4495	2,3013
VT	0,0286	0,0693	0,1586	0,3198	0,5389	0,8042	1,1994	1,4768	2,3831
S2 AF	0,0194	0,0611	0,1529	0,3190	0,5445	0,8172	1,2248	1,5101	2,4478
VT	0,0192	0,0601	0,1498	0,3119	0,5320	0,7987	1,1957	1,4745	2,3852
S3 AF	0,0196	0,0618	0,1551	0,3241	0,5538	0,8318	1,2473	1,5381	2,4941
VT	0,0207	0,0626	0,1529	0,3144	0,5336	0,7995	1,1916	1,4694	2,3596
S4 AF	0,0193	0,0604	0,1506	0,3133	0,5341	0,8016	1,1994	1,4791	2,3896
VT	0,0176	0,0587	0,1507	0,3151	0,5360	0,8029	1,1934	1,4742	2,3123
S5 AF	0,0202	0,0626	0,1540	0,3154	0,5327	0,7964	1,1786	1,4549	2,2834
VT	0,0200	0,0620	0,1531	0,3155	0,5348	0,8009	1,1909	1,4694	2,3363
S6 AF	0,0209	0,0645	0,1583	0,3230	0,5441	0,8128	1,1996	1,4809	2,3097

Legenda: S1 a S6: representam os sistemas de 1 a 6; VT = representa o volume médio calculado através das estimativas obtidas pela equação de volume total em cada sistema; AF = representa o volume médio calculado através das estimativas obtidas pela função de afilamento em cada sistema.



Pelos resultados da Tabela 4, a função de afilamento do Sistema 1, baseado no modelo de volume de Schumacher e Hall, estimou o volume médio igual ao volume real médio na classe de diâmetro de 5,0 – 9,9 cm. Para essa mesma classe apenas a estimativa do volume médio pelo modelo de volume total do Sistema 2, baseado no modelo de volume de Spurr, superestimou o volume médio real.

Nas classes inferiores a 29,9 cm, considerando cada classe de diâmetro, grande parte das estimativas volumétricas para todos os casos estudados subestimou o volume médio de Smalian (Tabela 4).

Nas classes superiores a 30,0 cm, considerando as classes diâmétricas, a maioria dos métodos dos diferentes sistemas superestimou o volume médio. Ressalva deve ser feita nas classes de 44,0-44,9 e 45,0-49,9 cm que tiveram estimativas de volumes médios superiores ao volume médio real para todos os métodos em todos os sistemas estudados (Tabela 4).

### Estimativas volumétricas por árvore

Pelos resultados das estatísticas de avaliação obtidas a partir das estimativas volumétricas pelas equações de volume total e afilamento pode-se constatar que em todos os sistemas quando são comparados os dois procedimentos de ajuste verificam-se estimativas precisas com erros não superando 14% (Tabela 5). O mesmo pode ser visto na estatística *PVE* que teve resultados superiores a 0,9797 para ambos os métodos.

Constata-se ainda na Tabela 5 que o *Syx*(%) sempre é inferior nas equações de volume, indicando maior precisão das estimativas volumétricas nesse caso. O mesmo pode ser constatado na estatística *PVE*, a qual teve resultados superiores quando comparados com os resultados dessa estatística para as estimativas de volume obtidas pela integração da equação de afilamento. Valores mais próximos entre as estatísticas constatados entre os dois métodos pode ser verificado no Sistema 4 com diferença entre as estatísticas de 0,01 para o *Syx*(%) e 0,0001 para o *PVE*.

**TABELA 5:** Estatísticas *Syx*(%), *PVE*, teste F para duas variâncias e teste t para duas amostras independentes para estimativas volumétricas obtidas pela equação de volume total e afilamento, nos diferentes sistemas

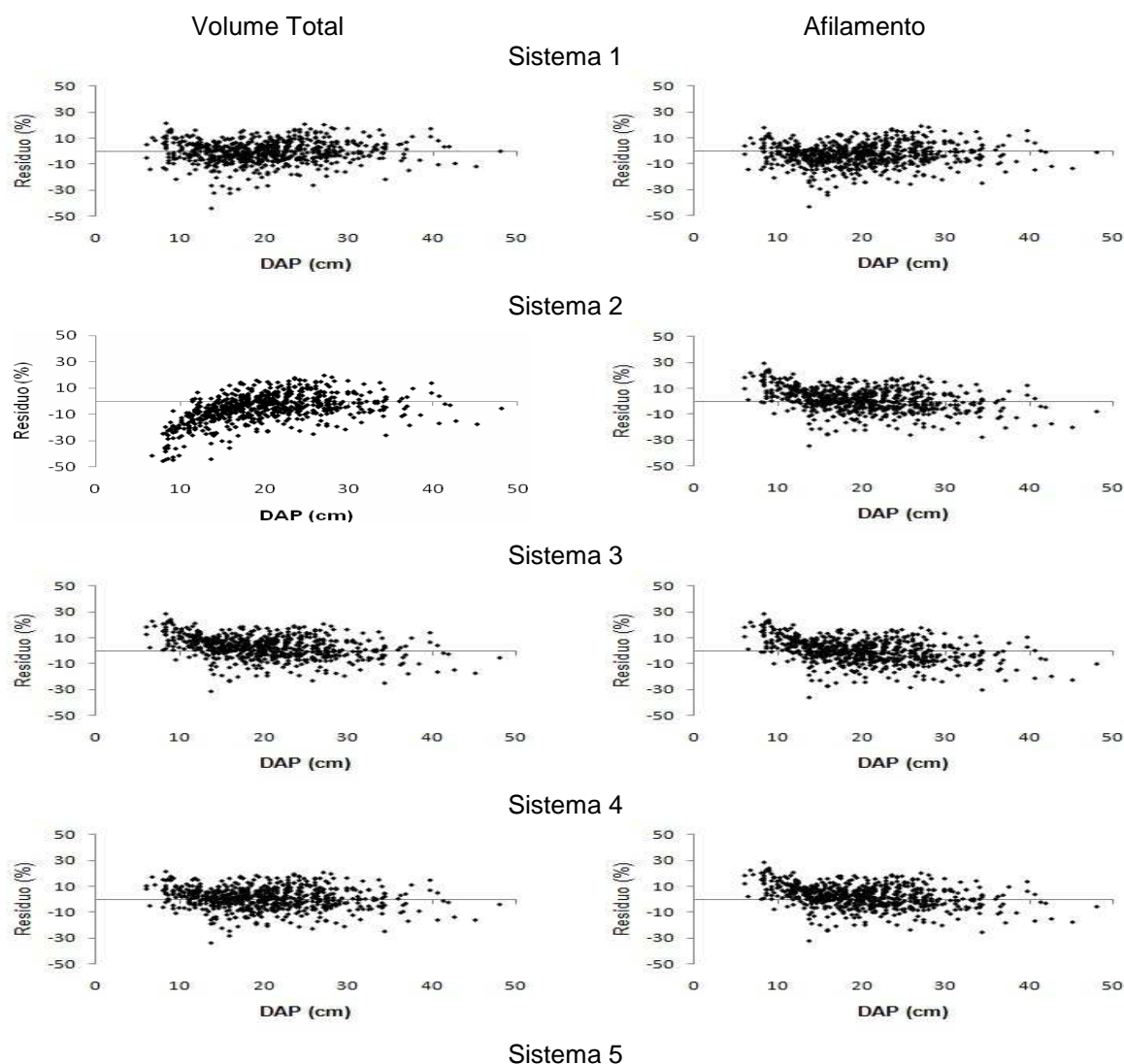
Sistema	Modelo	<i>Syx</i> (%)	<i>PVE</i>	Teste F	Teste t
1	Volume	11,94	0,9855		
	Afilamento	12,27	0,9847	1,02 <sup>ns</sup>	0,81 <sup>ns</sup>
2	Volume	12,72	0,9836		
	Afilamento	13,24	0,9822	1,16*	-0,43 <sup>ns</sup>
3	Volume	12,82	0,9834		
	Afilamento	14,14	0,9797	1,26*	0,57 <sup>ns</sup>
4	Volume	12,77	0,9835		
	Afilamento	12,78	0,9834	1,01 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>
5	Volume	12,65	0,9839		
	Afilamento	12,74	0,9835	1,04 <sup>ns</sup>	-0,08 <sup>ns</sup>
6	Volume	12,7	0,9837		
	Afilamento	12,91	0,9831	1,00 <sup>ns</sup>	0,69 <sup>ns</sup>

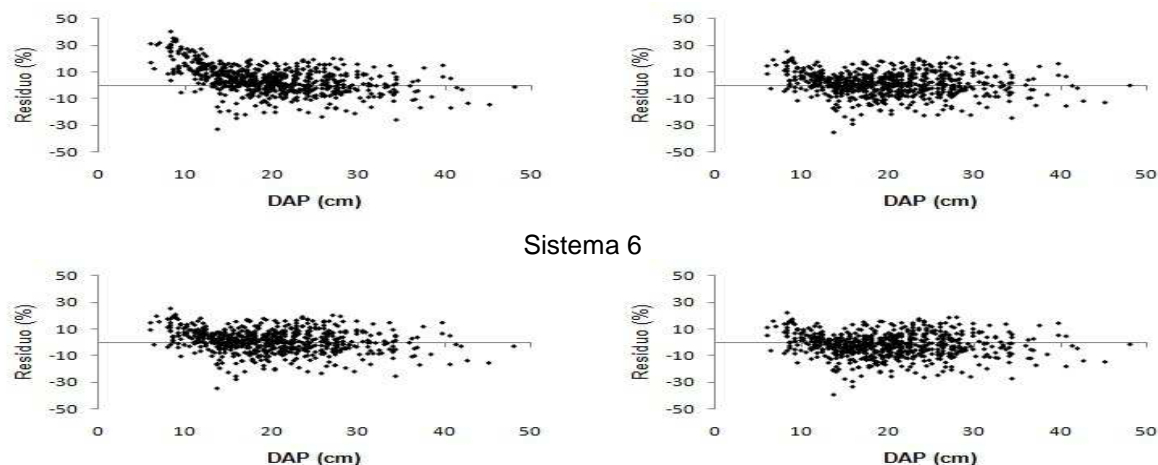
<sup>ns</sup> não significativo a 5% de probabilidade

\* significativo a 5% de probabilidade

As estimativas mais precisas de volume total por árvore foram obtidas na equação de volume total de Schumacher e Hall (sistema 1) e sua equação de afilamento derivada pois apresentou menor  $Syx(\%)$  e maior  $PVE$ , enquanto as menos precisas foram obtidas no sistema 3 que apresentaram resultados inversos para as mesmas estatísticas.

Os resíduos confirmam os resultados das estatísticas anteriormente obtidas pelos métodos. Esses demonstram resultados semelhantes para os métodos de estimativas volumétricas, com ressalva para o Sistema 2 em que pode constatar-se que para um DAP < 15 cm, houve superestimções nos volumes individuais quando comparados com os reais, enquanto para esse mesmo caso na equação de afilamento têm-se subestimativas (Figura 1). O Sistema 1 apresenta as estimativas mais precisas para ambos os métodos para o volume, uma vez que seus resíduos estão mais próximos ao eixo das abscissas.





**FIGURA 1:** Resíduos (%) das estimativas de volume total obtidos em função das equações de volume total e funções de afilamento em função do *DAP*

É muito interessante observar na Tabela 5 que no Sistema 1 onde constata-se maior precisão nas estimativas de volume total por árvore, não encontra-se as estimativas menos precisas para a variável diâmetro (Tabela 3) quando comparada as outras equações de afilamento derivadas de equações de volume. Assim, segundo DEMAERSCHALK (1973) uma equação que estima bem o afilamento pode não necessariamente estimar de forma precisa o volume ou vice-versa.

Os resultados do teste t para duas amostras independentes, considerando cada sistema de forma independente, corroboram os outros resultados das estatísticas  $Syx(\%)$ ,  $PVE$  e resíduos, confirmando que as estimativas volumétricas médias obtidas para o volume total e a função de afilamento em cada sistema foram em média estatisticamente iguais (Tabela 5). Estudos têm sido realizados com intuito de comparar os volumes estimados pelas equações de volume e pelas equações de afilamento. Dentre estes, estão o de MACHADO et al. (2005), os quais compararam os volumes dos fustes de *Pinus oocarpa* obtidos pelos métodos de Smalian, fator de forma, equações de volume e função de afilamento. Concluíram que não existe diferença significativa entre estes métodos de estimativa de volume para o povoamento estudado. LEITE et al. (2011) comparando dois métodos para estimativa da variável volume em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* não encontrou diferença entre os volumes obtidos pelas equações volumétrica e funções de afilamento.

Pela análise de variância realizada para verificar a significância dos ajustes das seis equações de volume de cada um dos sistemas e das seis funções de afilamento entre os diferentes sistemas, para estimativas de volume médio, constatou-se pelos resultados do teste F para ambas as análises, que não houve resultado significativo. Esses resultados indicam que não houve diferença nas estimativas médias volumétricas, portanto são estatisticamente iguais, não sendo necessário aplicar o teste de comparações de médias.

## CONCLUSÃO

De acordo com os resultados, os sistemas compatíveis formados pelos modelos de volume e sua função de afilamento estimaram os volumes totais por árvore de forma precisa.

Nas classes inferiores (menores que 29,9 cm) a maioria dos volumes médios estimados pelas equações de volume total e afilamento subestima o volume médio real, enquanto nas classes superiores a 30,0 cm ocorre o inverso.

Avaliando todos os seis sistemas de forma independente, o sistema 1 baseado no modelo de Schumacher e Hall, foi o mais preciso tanto para a equação de volume total como para a função de afilamento.

Como não houve diferença estatística nas estimativas de volume nas análises feitas pelo teste t para os dois métodos em cada sistema, e pela análise de variância considerando os seis modelos de volume total e as seis funções de afilamento entre os diferentes sistemas, pode-se utilizar qualquer uma das metodologias para estimar o volume total.

Por mais que as equações de volume sejam consagradas no decorrer dos tempos, principalmente o modelo de Schumacher e Hall, deve-se atentar que com o uso das funções de afilamento outras variáveis dendrométricas, como diâmetro, altura e volume comercial, podem ser estimadas além do volume total, o que pode pesar a favor na escolha desse tipo de equação.

## REFERÊNCIAS

ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2012: Ano base 2011**. Brasília: 2012.

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

DEMAERSCHALK, J. Integrated systems for the estimation of tree taper and volume. **Canadian Journal of Forest Research**, v.3, n.1, p. 90–94, 1973.

FIGUEIREDO FILHO, A.; OLIVEIRA, C. G.; MOURA, J. B.; CUNHA, U. S. Conversão de equações de volume em equações de forma compatíveis para *Pinus elliottii*. In: Congresso Florestal Pan-americano, 1.; Congresso Florestal Brasileiro, 7., 1993, Curitiba. Floresta para o desenvolvimento: política, ambiente, tecnologia e mercado. **Anais...** São Paulo: SBS; [S.I.]: SBEF, 1993. v.2, p.501-503.

FOERSTER, N. E.; CRIVELLARI, L. B.; CONTE, C. E. Anurofauna da Floresta Nacional de Piraí do Sul. In: Congresso de Ecologia do Brasil, 10., 2011, São Lourenço. **Anais...** São Lourenço: 2011. p.1-3.

HORLE, D. C.; MENDONÇA, A. R.; CARVALHO, S. P. C.; CALEGARIO, N. Modelagem não linear do perfil longitudinal de fustes de *Pinus oocarpa*. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 2, p. 177-184, 2010.

IGUAÇU CELULOSE E PAPEL S.A. **Resumo público do plano de manejo florestal**. 2 ed., 2013

LEITE, D. R.; MIGUEL, E. P.; SANTOS, G. A.; ENCINAS, J. M. I.; REZENDE, A. V. Análise comparativa entre dois procedimentos para estimativa da variável volume em um povoamento de *Eucalyptus urophylla*, no município de mineiros – Goiás. **Enciclopédia da Biosfera**, Goiânia, v. 7, n. 13, p. 1684-1700, 2011.

MACHADO, S. A.; URBANO, E.; CONCEIÇÃO, M. B. Comparação de métodos de estimativa de volume para *Pinus oocarpa* em diferentes idades e diferentes regimes de desbastes. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 50, p.85-98, 2005.

MANCINI, J. C. Mercado de Toras. In: **WORKSHOP DE DESBASTE E PODA EM PLANTIOS FLORESTAIS 2011**; Colombo: Associação Paranaense de Empresas de Base Florestal, 2011. [CD-ROM].

OLIVEIRA, M. L. R.; LEITE, H. G.; GARCIA, S. L. R.; CAMPOS, J. C. C.; SOARES, C. P. B.; SANTANA, R. C. Estimação do volume de árvores de clones de eucalipto pelo método de similaridade de perfis. **Revista Árvore**, Viçosa, v.33, n.1, p. 133 – 141, 2009.

PREFEITURA DE PIRAÍ DO SUL. **PERFIL DE PIRAÍ DO SUL**. Piraí do Sul, PR. Disponível em: [http://www.piraidosul.pr.gov.br/site/index.php?option=com\\_content&view=article&id=27&Itemid=95](http://www.piraidosul.pr.gov.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=27&Itemid=95). Acesso em: 15/06/2014.

SCHRÖDER, T.; PEREIRA, L. D.; HOFIÇO, N. S. A. Comparação de métodos de estimativa de volume total para *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Floresta e Ambiente**, Seropédica. v.20, n. 4, p. 480-486, 2013.

SOUZA, C. A.; SILVA, G. F.; XAVIER, A. C.; MENDONÇA, A. R.; ALMEIDA, A. Q. Avaliação de modelos de afilamento não-segmentados na estimação da altura e volume comercial de *Eucalyptus* sp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.18, n.3, p. 387-399, 2008.