

# Modelagem do volume do povoamento para todas as espécies dos bracatingais nativos da região metropolitana de Curitiba – Paraná - Brasil

## Modeling the stand volume for all species from the native bracatinga forests in metropolitan region of Curitiba – Paraná - Brazil

Edilson URBANO [1](#); Sebastião do Amaral MACHADO [2](#); Afonso FIGUEIREDO FILHO [3](#); Carlos Roberto SANQUETTA [4](#)

Recebido: 12/06/2017 • Aprovado: 09/07/2017

### Conteúdo

- [1. Introdução](#)
- [2. Metodologia](#)
- [3. Resultados](#)
- [4. Conclusões](#)

[Referências bibliográficas](#)

#### RESUMO:

Os bracatingais constituem uma formação pioneira cuja madeira é usada principalmente para lenha e carvão. Desta forma, visando facilitar a quantificação do estoque de lenha, o objetivo deste trabalho foi modelar o volume por unidade de área para todas as espécies presentes nos bracatingais. Para isso ajustou-se 31 modelos usando 320 parcelas. A melhor equação apresentou  $R^2 = 0,950$  e  $Syx\% = 8,87$ , a qual foi validada e considerada apta para utilização nos inventários florestais dos bracatingais.

**Palavras chave** bracatinga, volume do povoamento, equações volumétricas.

#### ABSTRACT:

The bracatinga forest constitute a pioneer formation whose wood is used mainly for firewood and charcoal. Thus, in order to facilitate the quantification of wood stock, the objective of this work was to model the volume per unit of area for all species present in the bracatinga forests. For this, 31 models were fitted using 320 plots. The best equations presented  $R^2 = 0.950$  and  $Syx\% = 8.87$ , which was validated and considered suitable for use to the forest inventories of the bracatinga forests.

**Keywords** *Mimosa scabrella*, stand volume, volumetric equations.

## 1. Introdução

Os bracatingais são formações florestais compostas na fase inicial predominantemente pela

espécie *Mimosa scabrella* Bentham (Bracatinga), que é uma espécie nativa, pioneira pertencente à família Fabaceae. Ao longo dos anos, espécies secundárias vão substituindo a bracatinga, até que após 11 anos o povoamento tenha característica de um capoeirão, com predominância de diversas espécies secundárias (Silva *et al.*, 2016).

Na região metropolitana de Curitiba, os bracatingais são conduzidos para a produção de madeira, principalmente para lenha e carvão, além de outros usos. Esses bracatingais, têm grande importância social e econômica para a região e constitui-se em uma poupança verde para os pequenos agricultores que os manejam.

Mazuchowski e Angelo (2012) afirmam que o processo produtivo de bracatinga mantém uma relativa linearidade entre a área de corte anual e a área de regeneração, sendo que a média de corte anual é inferior a 20 hectares, com predomínio de talhões entre 2 a 5 hectares de produção e corte.

Há uma necessidade de quantificação da produção volumétrica de lenha nos bracatingais com a finalidade de facilitar o processo comercialização da produção. Usualmente o estoque volumétrico de madeira em um povoamento florestal é obtido pela soma dos volumes estimados por meio de equações para as árvores individuais das unidades amostrais e expresso por unidade de área (hectare). Segundo Soares e Campos (2000), a possibilidade de obter o volume do povoamento sem usar equações individuais é um avanço no processo de mensuração florestal.

Para Scolforo (2005), a modelagem de equações para o povoamento (modelagem por unidade de área) é uma alternativa ao uso de modelos para árvores individuais e tem por finalidade a redução de trabalho e custos no inventário florestal, principalmente na medição das alturas das árvores individuais, que é um procedimento trabalhoso e sujeito a erros.

Figueiredo Filho *et al.* (1982), afirmam que a aplicação de modelos matemáticos para estimar o volume do povoamento só é justificado quando as variáveis independentes do modelo são fáceis de serem medidas no campo e com isso traga uma redução de trabalho e custo sem prejuízos significativos na precisão.

As equações de volume do povoamento são funcionalmente similares às equações de volume para árvores individuais, porém, nelas utilizam-se de variáveis independentes referentes à unidade de área, tais como, área basal, altura média das árvores, média da altura dominante, média do DAP, diâmetro médio quadrático e o número de árvores (Scolforo, 2005).

A modelagem por unidade de área é uma técnica antiga e consolidada atualmente, Rosot *et al.* (1990) aponta diversos autores internacionais que iniciaram e desenvolveram a modelagem por unidade de área. Na literatura florestal brasileira destacam-se os trabalhos de Figueiredo Filho *et al.* (1982); Silva (1985); Rosot *et al.* (1990); Machado e Pizzato (1998); Oliveira *et al.* (2005); e Machado *et al.* (2008a). Recentemente tem-se os trabalhos de Cysneiros *et al.* (2016), Ribeiro *et al.* (2012), Souza *et al.* (2013) e Souza *et al.* (2014).

Machado *et al.* (2008a), com uma base de dados de 229 parcelas, modelaram o volume de lenha do povoamento para *Mimosa scabrella* na Região Metropolitana de Curitiba, sendo as demais espécies presentes nos bracatingais não modeladas.

Com a evolução da amostragem nos bracatingais, a base de dados aumentou para 320 parcelas, sendo incluída na amostra parcelas de povoamentos com idades mais avançadas. Também foi feita a classificação de sítio dos bracatingais, além da modelagem do volume individual da bracatinga com árvores cubadas. Por isso, tornou-se necessário modelar novamente o volume de lenha por hectare da *Mimosa scabrella* e das demais espécies presentes nos bracatingais.

Desta forma, considerando aos avanços na amostragem e no conhecimento gerado por outras pesquisas e a importância que esses povoamentos têm para os pequenos produtores da região metropolitana de Curitiba, o objetivo deste trabalho foi modelar o volume da lenha por unidade de área (volume do povoamento) para o conjunto de todas as espécies presentes nos

## 2. Metodologia

### 2.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo está localizada no primeiro planalto do Paraná, que segundo o sistema da classificação de Köppen, apresenta clima do tipo Cfb, que corresponde ao clima temperado, mesotérmico úmido sem estação seca definida, com quatro estações bem definidas, com verões quentes e chuvosos e invernos frios com períodos secos eventuais. A temperatura média anual se apresenta em torno de 17°C, com mínimas de 11°C e máximas de 24°C. A precipitação média anual situa-se entre 1.400 e 1600 mm, com leve diminuição no inverno, não ocorrendo déficits hídricos (Caviglione *et al.*, 2000).

As coordenadas geográficas da área de estudo estão limitadas ao norte pela latitude 24°58'11" S, ao sul pela latitude 25°55'44" S, a oeste pela longitude 49°29'09" W e ao leste pela longitude 49°03'58" W (Silva *et al.*, 2016).

Nessa região os solos predominantes são: Cambissolo Háplico alumínico e distrófico, Argissolo Vermelho distrófico e Latossolo Vermelho Amarelo álico, Neossolos, além de algumas áreas de Cambissolos Húmicos alumínicos e distróficos associados a Afloramentos de Rochas (Bhering *et al.*, 2008).

### 2.2. Base de dados

Os dados para desenvolvimento desta pesquisa foram coletados em quatorze municípios da região metropolitana de Curitiba. De acordo com Mazza *et al.* (2000), nesses municípios os bracatingais ocupam uma área de aproximadamente 60.000 hectares. São provenientes de parcelas temporárias, distribuídas aleatoriamente em bracatingais com idades variando de 3 a 20 anos, não sendo encontrados bracatingais com a idade de 16 anos. No total o conjunto de dados reúne 320 parcelas oriundas de diversas pesquisas já realizadas.

De cada parcela foram mensurados em todas as árvores os diâmetros a 1,30 m em relação ao nível do solo (DAP) e a altura total. Das 320 parcelas, em 20 delas a bracatinga não está presente e em 81 delas somente a bracatinga está presente, restando 219 parcelas com composição mista de espécies (bracatinga + secundárias).

Os dados de cada parcela foram preparados para atender os objetivos propostos e desenvolver o processo de modelagem por meio dos seguintes procedimentos: Cálculo das alturas médias ( ), diâmetros médios ( ) e diâmetro médio quadrático (*dg*) das árvores nas parcelas; Determinação das alturas dominantes (*hdom*) de cada parcela com posterior classificação de sítio; Cálculo do volume de lenha individual de cada árvore com posterior extrapolação para hectare; Cálculo das áreas transversais de cada árvore e sua extrapolação para hectare.

As idades das bracatingas nas parcelas foram determinadas através de informações locais (proprietários), conferidas quando necessário, através da leitura dos anéis de crescimento (Silva *et al.*, 2016).

A quantidade de unidades amostrais por idade, diferenciando a bracatinga das demais secundárias, é apresentada na Tabela 01.

**Tabela 01 -**

Intensidade amostral, por idade, nos bracatingais da região metropolitana de Curitiba, Paraná.

Idade (Anos)	Número de Parcelas Total	Número de Parcelas Com Bracatinga	Número de Parcelas Com Secundárias	Área Amostrada (m <sup>2</sup> )	Área das Parcelas (m <sup>2</sup> )

3	8	8	0	800	100
4	21	21	5	4920	234
5	27	27	6	6315	234
6	32	32	18	8125	254
7	36	36	24	9610	267
8	22	22	17	5800	264
9	25	25	22	6720	269
10	16	16	16	4800	300
11	18	18	18	5720	318
12	15	15	15	4270	285
13	19	19	18	6000	316
14	21	21	21	6900	329
15	13	13	12	5000	385
17	6	6	6	3400	567
18	9	9	9	2980	331
19	29	11	29	5800	200
20	3	1	3	900	300
<b>Total</b>	<b>320</b>	<b>300</b>	<b>239</b>	<b>88060</b>	

Na classificação de sítio dos bracatingais, inicialmente os valores observados de altura dominante - *hdom* em cada parcela foram determinados considerando o conceito de Assmann para altura dominante, ou seja, a média das alturas das 100 árvores mais grossas por hectare.

Cada uma das *n* parcelas foi classificada em classes de sítio baseando-se nas curvas de sítio para a bracatinga construídos por Machado *et al.* (2011). A classificação de sítio resultou em 48 parcelas na classe III, 190 na classe II e 62 na classe I, totalizando 300 parcelas. Parcelas onde a bracatinga não estava presente, somaram 20 unidades e não receberam classificação de sítio usando a equação de Machado *et al.* (2011), porém, para fins de utilização na modelagem, estas parcelas foram classificadas de acordo com a proximidade de parcelas já classificadas.

### 2.3. Cálculo dos volumes individuais das árvores das parcelas

Para estimativa dos volumes com casca de lenha (Fuste + galhos grossos  $\geq 4\text{cm de } \emptyset$ ) das árvores de bracatinga foram utilizadas as equações volumétricas ajustadas por Machado *et al.* (2008b).

Para estimativa dos volumes individuais dos fustes das espécies secundárias (exceto Araucária) foram utilizadas as equações volumétricas ajustadas para estimar o volume do fuste das espécies folhosas da Floresta Ombrófila Mista no Paraná por Santos *et al.* (2006).

Para estimativa dos volumes totais das araucárias foi utilizada a equação volumétrica ajustada por Fupef (1978) e citada por Figueiredo Filho *et al.* (2014).

Como não foi encontrada na literatura florestal uma equação apropriada para estimar o volume de lenha das espécies secundárias, multiplicou-se o volume estimado dos fustes por 1,3. Este fator de expansão do volume considera para as espécies secundárias a mesma proporção de galhos observados nas árvores cubadas e xilometradas de bracatinga, que foram utilizadas por Machado *et al.* (2006).

## **2.4. Detecção de dados discrepantes – “outliers”**

Foi realizada uma análise exploratória sobre a base de dados para detectar a presença de valores discrepantes de volume por hectare para cada idade amostrada. Considerou-se como dado discrepante uma observação cujo valor é muito superior ou inferior ao restante das observações.

Para rejeitar dados discrepantes em cada classe de idade, primeiramente foi utilizado o método do quartil, e na seqüência, os dados foram plotados em gráficos e observada a tendência. Quando observado valores muito superiores ou muito inferiores nas diferentes idades, estes também foram rejeitados.

## **2.5. Modelagem para o Povoamento**

Para a modelagem do volume de lenha por hectare do conjunto de todas as espécies presentes nos bracatingais nativos, ajustou-se os mesmos modelos utilizados por Machado *et al.* (2008a). Na ocasião, testaram um total de 29 modelos matemáticos selecionados da literatura florestal, sendo 12 modelos de natureza aritmética, 4 semi-logarítmicos e 13 de natureza logarítmica. Na Tabela 02 constam os modelos aritméticos, semi-logarítmicos e logarítmicos que foram ajustados.

No ajuste dos modelos lineares aritméticos ou logarítmicos, usou-se a técnica dos mínimos quadrados por regressão linear simples ou múltipla, já os modelos não lineares foram ajustados por regressão não linear. Ajustaram-se também outros modelos por meio do método de ajuste por seleção de variável “forward stepwise”.

### **Tabela 02**

Modelos matemáticos testados para estimar os volumes de lenha com casca dos bracatingais nativos.

Nº	Modelo Matemático	Autores	
1	$V = b_0 + b_1.G\bar{h} + b_2.G + b_3.\bar{h}$	Stoate (1945)	
2	$V = b_0 + b_1.Gh_{dom} + b_2.G + b_3.h_{dom}$		
3	$V = b_0 + b_1.G\bar{h}$	Spurr (1952)	
4	$V = b_0 + b_1.Gh_{dom}$		
5	$V = b_0 + b_1.G$		
6	$V = b_0 + b_1.G^2 + b_2.G$		
7	$\ln(V) = b_0 + b_1.\ln(G\bar{h})$		
8	$\ln(V) = b_0 + b_1.\ln(G)$		
9	$\ln(V) = b_0 + b_1.\ln(G^2)$		
10	$\ln(V) = b_0 + b_1.\ln(G^2h_{dom})$		
11	$\ln(V) = b_0 + b_1.\ln(Gh_{dom})$		
12	$V = G\bar{h}/b_0 + b_1.d_g$		Takata (1959)
13	$V = b_0 + b_1.G^2$		Machado (1973)
14	$V = b_0 + b_1.G^2h_{dom}$	Silva (1979)	
15	$V = b_0 + b_1.\ln(G\bar{h})$	Figueiredo Filho (1983)	
16	$V = b_0 + b_1.\ln(G^2\bar{h})$		
17	$V = b_0 + b_1.\ln(G)$		
18	$V = b_0 + b_1.\ln(G^2)$		
19	$\ln(V) = b_0 + b_1.\ln(G^2\bar{h})$		
20	$V = b_0 + b_1.G^2\bar{h}$	Rosot (1989)	
21	$\ln(V) = b_0 + b_1.\ln(GN)$		
22	$\ln(V) = b_0 + b_1.\ln(\bar{d}^2\bar{h})$		
23	$V = b_0.G^{b_1}.h_{dom}^{b_2}$	Ung e Ouellett (1991)	
24	$V = b_0.G^{b_1}.\bar{h}^{b_2}$		
25	$\ln(V) = b_0 + \ln(G\bar{h})^{b_1} + \ln(Gh_{dom})^{b_2}$		
26	$\ln(V) = b_0 + b_1.\ln(G) + b_2.\ln(\bar{h})$		
27	$\ln(V) = b_0 + b_1.\ln(G\bar{h}) + b_2.\ln(Gh_{dom})$		
28	$\ln(V) = b_0 + b_1.\ln(G^2N)$	Scolforo (1997)	
29	$\ln(V) = b_0 + b_1.\ln(N\bar{d})$		

**Onde:** V = volume total com casca por hectare (m<sup>3</sup>/ha); G = área basal por hectare (m<sup>2</sup>/ha);  $\bar{h}$  = altura total média (m);  $h_{dom}$  = altura dominante (m);  $d_g$  = diâmetro médio quadrático (cm);  $\bar{d}$  = diâmetro à altura do peito médio (cm); N = número de árvores por hectare; ln = logaritmo neperiano;  $b_i$  = coeficientes dos modelos.

Como nunca houve ajuste de modelos para estimar o volume por unidade de área incluindo todas as espécies presentes nos bracatingais, e mesmo sabendo que as espécies secundárias são multiâneas, considerou-se em alguns modelos e no processo "forward stepwise" a utilização das variáveis; idade, altura dominante e sítio que são próprias da *Mimosa scabrella* (bracatinga).

## 2.6. Análises dos modelos ajustados

Para que a equação escolhida tenha suas estimativas confiáveis, a seleção da melhor entre as ajustadas foi baseada nos seguintes critérios estatísticos: maior coeficiente de determinação

( $R^2$ ), menor erro padrão da estimativa em porcentagem ( $Sy_x\%$ ), ausência de multicolinearidade e análise gráfica de resíduos para verificar heterocedasticidade e tendências presentes na estimativa.

O diagnóstico da multicolinearidade foi feito de forma informal através da observação da não significância (valor p para  $\alpha=5\%$ ) dos coeficientes das variáveis independentes utilizadas em modelos múltiplos de regressão linear, conforme Scolforo (2005).

Para equações ajustadas com os valores da variável dependente transformados para logaritmo neperiano, os valores estimados foram corrigidos para eliminar a discrepância logarítmica e torná-las comparáveis com as aritméticas. Nesse caso, os volumes estimados foram multiplicados pelo Fator de Correção de Mayer e o  $R^2$  e o  $Sy_x$  foram recalculados.

Após a escolha da melhor equação fez-se a sua validação por meio do teste de aderência do Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) com limite de  $\alpha=5\%$  de significância, e a análise gráfica dos resíduos dos dados utilizados na validação. Na seleção das parcelas para a validação procurou-se seguir a recomendação dada por Prodan *et al.* (1997), os quais sugerem que os dados para a validação devem ser independentes dos dados utilizados no ajuste, abrangendo a variação de idades, sítios e regimes de manejo.

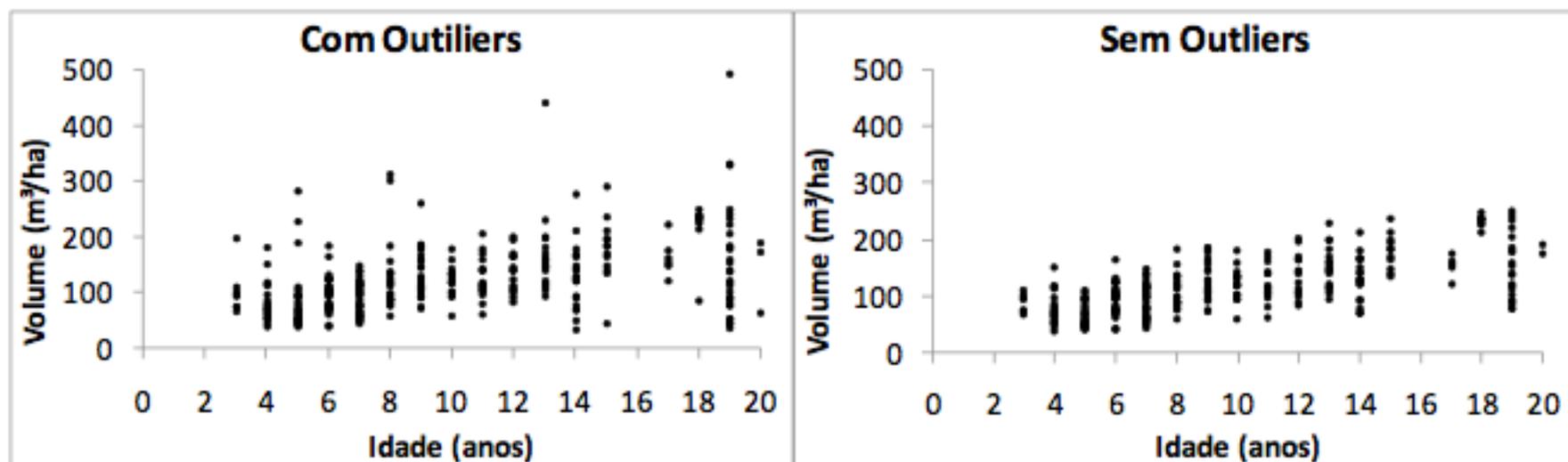
## 3. Resultados

### 3.1. Análise de dados discrepantes

Como resultado da análise dos dados para volume por hectare de todas as espécies juntas retirou-se 27 parcelas discrepantes, sobrando 293 parcelas que foram utilizadas nos processos de modelagem volumétrica por unidade de área. A Figura 01 mostra o antes e o depois da retirada dos dados discrepantes.

**Figura 01**

Valores de volume por hectare ao longo da idade, antes e depois da retirada dos valores discrepantes.



### 3.2. Estatísticas descritivas das variáveis utilizadas no ajuste dos modelos

Após a retirada dos dados discrepantes, calculou-se com as parcelas restantes os valores mínimos, médios e máximos, bem como o desvio-padrão e o coeficiente de variação em porcentagem para as principais variáveis utilizadas na modelagem do volume do povoamento. Essas estatísticas podem ser observadas na Tabela 03.

**Tabela 03.** Estatística descritiva das principais variáveis utilizadas no ajuste das equações.

Variável	Mínimo	Médio	Máximo	Desvio Padrão	CV %
Idade (anos)* - I	3,00	9,83	20,00	4,55	46,25
Número de Árvores por Hectare – N	533	2474	11584	1311	53,00
Média do DAP - $\bar{d}$ (cm)	3,75	8,83	18,43	1,94	21,95
Média da Altura Total - $\bar{h}$ (m)	4,39	9,80	15,71	1,99	20,26
Diâmetro Quadrático Médio - dg (cm)	4,08	9,45	20,59	2,28	24,09
Sítio - S (m)*	9,00	12,99	17,00	2,49	19,16
Altura Dominante - $h_{dom}$ (m)*	6,00	13,56	21,33	2,85	21,02
Área Basal por Hectare - G (m <sup>2</sup> )	6,06	15,56	31,32	4,30	27,61
Volume por Hectare - V (m <sup>3</sup> )	38,19	117,82	250,43	47,37	40,21

\* Da espécie *Mimosa scabrella* Bentham (bracatinga).

### 3.3. Correlação entre as variáveis utilizadas no ajuste dos modelos

Depois da análise exploratória dos dados volumétricos e da retirada das parcelas com valores discrepantes, procedeu-se à análise da correlação linear simples entre as variáveis independentes (medidas, calculadas, combinadas e transformadas) e dependentes (volume de lenha por hectare na forma aritmética e logarítmica), como mostra a Tabela 4.

Quando comparada a correlação entre as variáveis considerando todas as espécies na Tabela 04 observa-se um uma correlação média para variáveis como I, , dg e hdom. Variáveis como N, e , não obtiveram boa correlação com as variáveis volumétricas testadas.

A área basal (G), apresentou boa correlação com as variáveis volumétricas (0,885 e 0,881), na forma aritmética e logarítmica respectivamente. Oliveira *et al.* (2005), trabalhando com fragmentos florestais no município de Viçosa, observou que a área basal apresentou uma correlação de 0,90 com o volume total por hectare e de 0,88 com volume do fuste por hectare. Esses autores, também observaram boa correlação entre as variáveis volumétricas e a altura total e altura do fuste das árvores.

**Tabela 04**

Coeficiente de correlação linear simples das 65 variáveis independentes com as variáveis dependentes usadas no ajuste das equações

Variável Independente	Variável Dependente		Variável Independente	Variável Dependente	
	V	ln(V)		V	ln(V)
I	0,649	0,626	$\ln(\bar{d}^2 h_{dom})$	0,690	0,715
N	-0,158	-0,153	$\ln(G^2)$	0,871	0,905
$\bar{d}$	0,630	0,628	$\ln(G \bar{h})$	0,728	0,776
$\bar{h}$	0,038	0,076	$\ln(G^2 \bar{h})$	0,843	0,887
Dg	0,688	0,676	$\ln(G h_{dom})$	0,888	0,931
S	0,017	0,046	$\ln(G^2 h_{dom})$	0,915	0,955
$h_{dom}$	0,535	0,564	$\ln(dg \bar{h})$	0,478	0,502
G	0,885	0,881	$\ln(dg^2 \bar{h})$	0,599	0,617
$\bar{d} \bar{h}$	0,420	0,438	$\ln(dg h_{dom})$	0,718	0,743
$\bar{d}^2 \bar{h}$	0,501	0,495	$\ln(dg^2 h_{dom})$	0,736	0,755
$\bar{d} h_{dom}$	0,697	0,708	$\ln(GN)$	0,319	0,348
$\bar{d}^2 h_{dom}$	0,679	0,671	$\ln(G^2 N)$	0,554	0,587
$G^2$	0,860	0,823	$\ln(\bar{d}^2 \bar{h})$	0,520	0,545
$G \bar{d}$	0,906	0,881	$\ln(N \bar{d})$	0,229	0,264
Gdg	0,914	0,880	$1/\bar{d}$	-0,584	-0,610
$G \bar{h}$	0,738	0,757	$1/\bar{h}$	0,002	-0,019
$G^2 \bar{h}$	0,853	0,831	$1/h_{dom}$	-0,451	-0,491
$G h_{dom}$	0,908	0,898	$1/dg$	-0,653	-0,676
$G^2 h_{dom}$	0,921	0,874	$1/G$	-0,819	-0,890
$dg \bar{h}$	0,490	0,499	$1/\bar{d} \bar{h}$	-0,374	-0,407
$dg^2 \bar{h}$	0,565	0,546	$1/\bar{d}^2 \bar{h}$	-0,436	-0,474
$dg h_{dom}$	0,736	0,738	$1/\bar{d} h_{dom}$	-0,623	-0,668
$dg^2 h_{dom}$	0,721	0,698	$1/\bar{d}^2 h_{dom}$	-0,555	-0,601
GN	0,217	0,221	$1/G^2$	-0,736	-0,836
$G^2 N$	0,416	0,399	$1/G \bar{h}$	-0,681	-0,754
$\ln(\bar{d})$	0,627	0,641	$1/G^2 \bar{h}$	-0,708	-0,813
$\ln(\bar{h})$	0,016	0,047	$1/G h_{dom}$	-0,809	-0,901
$\ln(h_{dom})$	0,501	0,537	$1/G^2 h_{dom}$	-0,733	-0,851
$\ln(dg)$	0,694	0,700	$1/dg \bar{h}$	-0,439	-0,472
$\ln(G)$	0,871	0,905	$1/dg^2 \bar{h}$	-0,502	-0,542
$\ln(\bar{d} \bar{h})$	0,406	0,435	$1/dg h_{dom}$	-0,657	-0,701
$\ln(\bar{d}^2 \bar{h})$	0,520	0,545	$1/dg^2 h_{dom}$	-0,601	-0,648
$\ln(\bar{d} h_{dom})$	0,681	0,711			

Onde: V = volume de lenha com casca em m<sup>3</sup>/ha; ln(V) = logaritmo neperiano do volume de lenha com casca em m<sup>3</sup>/ha; I = Idade da bracatinga (anos); N = Número de Árvores por Hectare;  $\bar{d}$  = Média do Diâmetro à Altura do Peito (cm);  $\bar{h}$  = Média da Altura total (m); dg = Diâmetro Médio Quadrático (cm); S = Sítio da bracatinga (m);  $h_{dom}$  = Altura Dominante da bracatinga (m); e G = Área Basal por Hectare (m<sup>2</sup>).

A maior correlação observada no conjunto de todas as espécies para o volume da lenha, com casca por hectare (V) foi com a variável combinada entre área basal ao quadrado e altura dominante ( $G^2h_{dom}$ ), com  $r = 0,921$ , seguido pela variável combinada, na forma logarítmica, entre área basal ao quadrado e altura dominante  $\ln(G^2h_{dom})$ , com  $r = 0,915$  e pela variável combinada entre área basal e diâmetro quadrático (Gdg), com  $r = 0,914$ . Para a variável  $\ln(V)$  a maior correlação foi com a variável  $\ln(G^2h_{dom})$ , com  $r = 0,955$  seguido pela variável  $\ln(Gh_{dom})$ , com  $r = 0,931$  e pelas variáveis  $\ln(G)$  e  $\ln(G^2)$ , que apresentaram  $r = 0,905$ .

### 3.4. Modelagem do volume do povoamento

Na modelagem do volume do povoamento foram utilizadas 255 parcelas para o ajuste das equações e 38 parcelas para fazer a validação da equação com melhor desempenho.

A Tabela 05 apresenta, ordenados de acordo com o erro padrão, os resultados das estatísticas de ajuste e precisão para os modelos testados. Observa-se que os erros padrões da estimativa (Syx) variaram de 13,69% a 38,72%, os coeficientes de determinação ( $R^2_{aj}$ ) variaram de 0,882 a 0,053.

Observa-se na Tabela 05 que no ajuste se destacaram o modelo 2 de Stoate (1945) com  $Syx\% = 13,69$  e  $R^2_{aj} = 0,882$ , seguido pela equação ajustada para o modelo não linear 23 de Ung e Ouellett (1991), com  $Syx\% = 13,97$  e  $R^2_{aj} = 0,877$ , e pela equação ajustada para o modelo 10 de Spurr (1952), com  $Syx\% = 14,00$  e  $R^2_{aj} = 0,876$ . Na equação ajustada para o modelo 2 o intercepto é não significativo, sendo então descartado. A distribuição gráfica de resíduos das equações 23 e 10 são mostradas na Figura 02 juntamente com os gráficos das equações ajustadas por meio do processo de seleção de variáveis "forward stepwise".

**Tabela 05** - Coeficientes e estatísticas de ajuste e precisão das equações ajustadas, bem como o fator de correção de Mayer para as equações logarítmicas.

Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	FCM	R <sup>2</sup> aj	Syx	Syx%
2	-41,0261	0,2265	5,8164	1,4489	----	0,882	16,118	13,69
23	1,0906	1,0906	1,0906	----	----	0,877	16,443	13,97
10	-0,0909	0,5975	----	----	1,0077	0,876	16,476	14,00
14	50,3224	0,0186	----	----	----	0,843	18,554	15,76
27	-0,4938	0,1022	0,8836	----	1,0118	0,819	19,908	16,92
4	8,5096	0,5100	----	----	----	0,815	20,155	17,13
11	-0,3530	0,9528	----	----	1,0120	0,815	20,160	17,13
25	-1,8177	0,3283	0,9340	----	----	0,812	20,316	17,26
24	1,9183	1,2953	0,2432	----	----	0,798	21,050	17,89
1	-6,7894	0,3598	6,4591	-3,1227	----	0,798	21,063	17,90
26	0,5260	1,3341	0,2437	----	1,0144	0,797	21,090	17,92
6	-55,2202	-0,0903	12,6146	----	----	0,782	21,843	18,56
5	-31,3381	9,5675	----	----	----	0,780	21,951	18,65
7	1,1330	1,3130	----	----	1,0158	0,771	22,422	19,05
8	1,1330	1,3130	----	----	1,0158	0,771	22,422	19,05
9	1,1330	0,6565	----	----	1,0158	0,771	22,422	19,05
17	-273,3144	144,4404	----	----	----	0,758	23,035	19,57
18	-273,3144	72,2202	----	----	----	0,758	23,035	19,57
19	-0,0939	0,6233	----	----	1,0185	0,738	23,957	20,36
13	47,2168	0,2697	----	----	----	0,733	24,177	20,54
20	45,5272	0,0288	----	----	----	0,718	24,866	21,13
16	-400,6722	67,5795	----	----	----	0,708	25,309	21,50
12	2,2133	5,4513	----	----	----	0,629	28,505	24,22
3	11,9726	0,6996	----	----	----	0,532	32,036	27,22
15	-378,2346	99,9171	----	----	----	0,521	32,394	27,52
28	0,4601	0,3219	----	----	1,0561	0,282	39,667	33,70
22	1,9457	0,4174	----	----	1,0632	0,245	40,688	34,57
21	1,8006	0,2769	----	----	1,0761	0,095	44,544	37,85
29	0,3754	0,4367	----	----	1,0809	0,053	45,577	38,72

Onde:  $\beta_i$  = coeficientes das equações ajustadas; FCM = Fator de correção de Mayer;  
R<sup>2</sup>aj = coeficiente de determinação ajustado; Syx = Erro padrão da estimativa.

Trabalhando com modelagem para o povoamento em florestas naturais do município de Viçosa, Minas Gerais, Oliveira *et al.* (2005) observaram que a melhor equação ajustada para estimar o volume do fuste foi o modelo logaritmizado 25 de Ung e Ouellett (1991) e para estimar o volume total foi o modelo 24 não linear de Ung e Ouellett (1991). No ajuste para todas espécies nesse trabalho, a equação 25 ficou em 8º lugar em desempenho geral, com erro padrão da estimativa 3,6% maior que o primeiro colocado.

Machado *et al.* (2008a), trabalhando com modelagem do volume por hectare para bracatinga observaram que a melhor equação aritmética ajustada foi a equação do modelo 1, em segundo lugar ficou a equação do modelo 3 e em terceiro lugar a equação do modelo 12. Já para as logarítmicas, observaram que o modelo 7 de Spurr (1952) e os modelos 25, 26 e 27 de Ung e Ouellett (1991) foram melhores que os modelos aritméticos.

Ribeiro *et al.* (2012), modelando a quantidade de nutrientes por hectare em bracatingais, observaram que os melhores modelos foram aqueles que tiveram a combinação de área basal com a altura média e/ou altura dominante, destacando-se o modelo 26 de Ung e Ouellett (1991), o modelo 19 de Figueiredo Filho (1983) e o modelo de melhor desempenho de Machado *et al.* (2008a) obtido por processo "forward stepwise".

Souza *et al.* (2014), modelando a lenha por unidade de área de bracatinga em povoamentos nativos e Cysneiros *et al.* (2016) modelando o volume explorável em floresta Ombrófila Densa na Amazônia, selecionaram como um dos mais eficientes o modelo de variável combinada de Spurr (modelo 7). Neste trabalho, a equação deste modelo ficou em 14º lugar em desempenho geral, com erro padrão da estimativa 5,4% maior que o primeiro colocado.

Para comparar com as equações obtidas dos modelos retirados da literatura, ajustou-se também uma equação aritmética e outra logarítmica pelo processo "forward stepwise", as quais foram denominadas equações 30 e 31 respectivamente. Estas equações são apresentadas a seguir com seus respectivos coeficientes, suas estatísticas de ajuste e precisão, bem como o fator de correção de Mayer para a logarítmica.

#### Modelo 30:

$$V = -148,0249 + 0,00971 * G^2 h_{dom} + 5,1059 * dg + 21,3167 * \ln(G^2 h_{dom}) + 1,1940 * I$$

$$R^2_{aj} = 0,950 \text{ e } Syx\% = 8,87$$

#### Modelo 31:

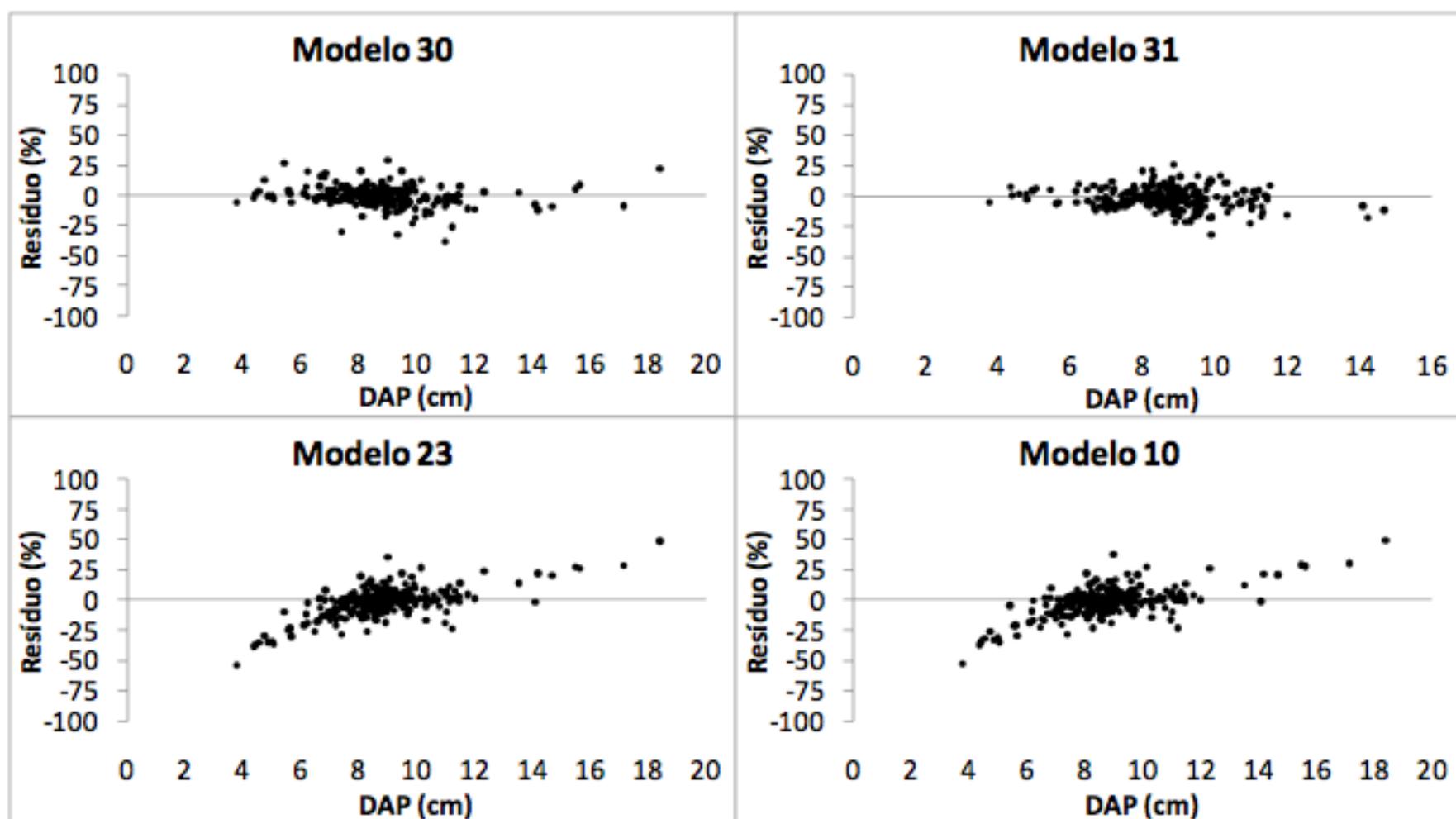
$$\ln(V) = -0,4725 + 0,4190 * \ln(G\bar{h}) + 0,4593 * \ln(Gh_{dom}) + 0,1578 * \ln(dg) + 0,0304 * I$$

$$FCM = 1,004, R^2_{aj} = 0,939 \text{ e } Syx\% = 9,79$$

As equações ajustadas por meio do processo "forward stepwise" não apresentam problema de multicolinearidade entre as variáveis. Quando comparadas com a equação 2, que foi a de melhor desempenho entre as escolhidas da literatura, a equação 30 apresenta um erro padrão da estimativa (Syx) 4,8% menor e a equação 31 apresenta um Syx 3,9% menor, denotando ganho estatístico ao usar a metodologia de seleção de variáveis "forward stepwise". A distribuição gráfica de resíduos dessas duas equações é mostrada na Figura 02.

#### Figura 02

Gráficos de resíduos para as 4 melhores equações ajustadas para estimativa do volume de lenha por hectare.

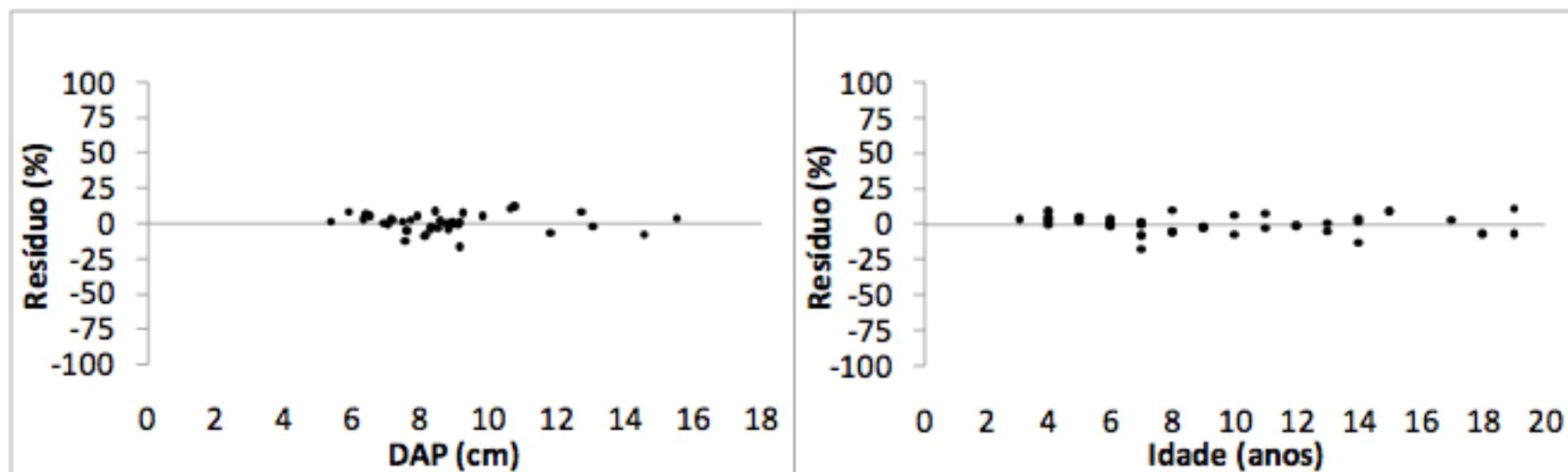


Na Figura 02 observa-se que as equações resultantes dos modelos 23 e 10 apresentam tendenciosidade de superestimar o volume de lenha por hectare de todas as espécies para as parcelas de menor diâmetro médio e subestimar para as parcelas de maior diâmetro médio. As duas equações obtidas por processo "forward stepwise" têm distribuição de resíduos homogênea ao longo de toda linha de regressão, porém a equação aritmética tem valores menos dispersos e também melhor estatística de ajuste e precisão, sendo, portanto, a escolhida para o teste de validação.

O teste de aderência do Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) usado para a validação da equação apresentou um  $\chi^2_{cal} = 17,21$ , menor que  $\chi^2_{tab} (\alpha=5\%) = 52,19$ , sendo não significativo e mostrando que o modelo usado para estimativa de volume dos povoamentos é acurado. Recalculando o erro padrão da estimativa ( $Syx\%$ ) para os dados da validação, este apresentou um valor igual a 7,25%. A Figura 03 mostra a dispersão dos valores residuais obtidos com a estimativa do volume total por hectare da bracatinga para os dados utilizados na validação do melhor modelo, evidenciando a distribuição homogênea ao longo de toda linha de regressão.

**Figura 03**

Gráficos de resíduos dos dados utilizados na validação da equação escolhida para estimativa do volume de lenha por hectare.



## 4. Conclusões

A obtenção da estimativa do volume do povoamento através de modelos para unidade de área é uma forma precisa e mais rápida do que o método tradicional de estimativa usando o volume por árvore individual, sendo, portanto, vantajoso pela redução de trabalho de campo e processamento dos dados e por conseqüência resulta em menor custo no inventário florestal.

O uso do processo de seleção de variáveis usando a metodologia "forward stepwise" resultou em equações com níveis de ajuste e precisão superiores aos das equações ajustadas usando modelos retirados da literatura.

Para estimativa do volume por hectare de todas as espécies dos bracatingais, dentre os 29 modelos retirados da literatura, a equação correspondente ao modelo 02 de Stoate (1945) foi o que apresentou melhor resultado estatístico, porém com intercepto não significativo e com tendências nas estimativas volumétricas. Já a equação ajustada por meio do processo "forward stepwise" com melhor resultado foi a aritmética.

Nos testes de validação não houve diferença estatística entre os valores reais e os estimados, habilitando a equação aritmética obtida por processo "forward stepwise" para uso no processamento dos inventários feitos para quantificar o volume de lenha dos bracatingais nativos da região metropolitana de Curitiba. Por não conter a altura média o uso dessa equação gera economia de tempo e custo na execução do inventário florestal.

---

## Referências bibliográficas

- Bhering, S. B., Santos, H. G., Manzatto, C. V., Bognola, I., Carvalho, A. P., Potter, O., ...  
Carvalho Junior, W. (2008). *Mapa de solos do estado do Paraná – legenda atualizada*. Rio de Janeiro: EMBRAPA Florestas; EMBRAPA Solos; IAPAR. 2008. 74 p.
- Caviglione, J. H., Kiihl, L. R., Caramori, P. H., Oliveira, D. (2000). *Cartas Climáticas do Estado do Paraná*. Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR, Londrina - PR. Recuperado de <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677>.
- Cysneiros, V. C., Machado, S. A., Pelissari, A. L., Figueiredo Filho, A., Urbano, E. (2016). Modeling of the commercial volume stock in an ombrophilous forest in the Southwest of the Amazon. *Cerne*, Lavras - MG, 22(4), 457-464.
- Figueiredo Filho, A., Machado, S.A., Miranda, R. O. V., Retslaff, F. A. S. (2014). *Compêndio de Equações de volume e de afilamento de espécies florestais plantadas e nativas para as regiões geográficas do Brasil*. Curitiba - PR. 306 p.
- Figueiredo Filho, A., Machado, S. A., Rosot, N. C. (1982). Estimativas volumétricas por Unidade de Área em Florestas Naturais. *Silvicultura em São Paulo*, São Paulo - SP, 16, 491-504.
- Machado, S. A., Aguiar, L. P., Figueiredo Filho, A., Koehler, H. S. (2008a). Modelagem do volume do povoamento para **Mimosa scabrella** Benth. na Região Metropolitana de Curitiba. *Revista Árvore*, Viçosa - MG, 32(3), 465-478.
- Machado, S. A., Figura, M. A., Téó, S. J., Stolle, L., Urbano, E. (2008b). Modelagem volumétrica para bracatinga (**Mimosa scabrella** Benth.) em povoamentos da Região Metropolitana de Curitiba. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo - PR, 56, 17-19.
- Machado, S. A., Souza, R. F., Jaskiu, E., Cavalheiro, R. (2011). Construction of site curves for native **Mimosa Scabrella** stands in the Metropolitan Region of Curitiba - PR. *Cerne*, Lavras, 17(4), 489-497.
- Machado, S. A., Pizzato, W. (1998). Tabela de volume do povoamento para florestas nativas de **Araucária angustifolia** nos estados da região sul do Brasil. *Revista Floresta*, Curitiba - PR, 26(1), 11-26.
- Machado, S. A., Téó, S. J., Urbano, E., Figura, M. A., Silva, L. C. R. (2006). Comparação de métodos de cubagem absolutos com o volume obtido pelo xilômetro para bracatinga (**Mimosa**

**scabrella** Bentham). *Cerne*, Lavras - MG, 12(3), 239-253.

Mazuchowski, J. Z., Angelo, A. C. (2012). Caracterização e entraves do sistema de produção com bracatinga na região metropolitana de Curitiba. *Revista Floresta*, Curitiba - PR, 42(4), 711-724.

Mazza, C. A. D. S., Baggio, A. J., Carpanezzi, A. A. (2000). *Distribuição espacial da bracatinga na região metropolitana de Curitiba com imagens de satélite Landsat*. Embrapa Florestas. Colombo - PR, 22 p.

Oliveira, M. L., Soares, C. P. B., Souza, A. L., Leite, H. G. (2005). Equações de volume do povoamento para fragmentos florestais naturais do município de Viçosa, Minas Gerais. *Revista Árvore*, Viçosa - MG, 29(2), 213-225.

Prodan, M., Peters, R., Cox, F., Real, P. (1997). *Mensura forestal*. San José: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura - IICA. 586 p.

Ribeiro, A., Machado, S. A., Péllico Netto, S., Figueiredo Filho, A. (2012). Quantificação e modelagem dos macronutrientes em povoamentos de bracatinga. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo - PR, 32(69), 29-43.

Rosot, M. A. D., Machado, S. A., Rosot, N, C. (1990). Estudo de modelos matemáticos para estimar o volume por hectare em um povoamento de **Pinus taeda** L. em Piraí do Sul - PR. In: 6º. Congresso Florestal Brasileiro, 1990, Campos do Jordão. *Anais do 6º. Congresso Florestal Brasileiro*, Campos do Jordão - SP, 3, 126-138.

Santos, K., Sanquetta, C. R., Eisfield, R. L., Watzlawick, L. F., Ziliotto, M. A. B. (2006). Equações volumétricas por classe diamétrica para algumas espécies folhosas da Floresta Ombrófila Mista no Paraná, Brasil. *Revista de Ciências Exatas e Naturais*, Guarapuava - PR, 8(1), 99-112.

Scolforo, J. R. S. (2005). *Biometria Florestal: Parte I - Modelos de regressão linear e não-lienar. Parte II - Modelos para relação hipsométrica, volume, afilamento e peso da matéria seca*. Lavras - MG: Centro de Editoração FAEPE. 352 p.

Silva, J. A. (1985). Modelo de equação para estimar o volume por hectare de **Eucalyptus spp** na região de Campo Grande, no estado do Mato Grosso do Sul. *Floresta e Ambiente*, Seropédica - RJ, 2, 51-59.

Silva, L. C., Machado, S. A., Galvão, F., Figueiredo Filho, A. (2016). Evolução estrutural de bracatingais da região metropolitana de Curitiba, Paraná, Brasil. *Ciência Florestal*, Santa Maria - RS, 261, 171-179.

Soares, C. P. B., Campos, J. C. C. (2000). Conversão do volume total de povoamentos de eucalipto em volumes comerciais. *Revista Árvore*, Viçosa - MG, 24(4), 477-481.

Souza, R. F., Machado, S. A., Figueiredo Filho, A. (2013). Modelagem do carbono orgânico total e da lenha por unidade de área para bracatingais nativos. *Ciência Florestal*, Santa Maria - RS, 23(1), 117-127.

Souza, R. F., Machado, S. A., Figueiredo Filho, A. (2014). Modelagem da biomassa total e da lenha por unidade de área para bracatingais nativos. *Revista Árvore*, Viçosa - MG, 38(1), 53-62.

---

1. Departamento de Ciências Florestais. Universidade Federal do Paraná. Rua Lothário Meissner 900, Curitiba, Paraná, Brasil, 80210-170. [edurbano2@gmail.com](mailto:edurbano2@gmail.com), autor para correspondência.

2. Departamento de Ciências Florestais. Universidade Federal do Paraná. Rua Lothário Meissner 900, Curitiba, Paraná, Brasil, 80210-170. [samachado@ufpr.br](mailto:samachado@ufpr.br)

3. Departamento de Ciências Florestais. Universidade Federal do Paraná. Rua Lothário Meissner 900, Curitiba, Paraná, Brasil, 80210-170. [afigfilho@gmail.com](mailto:afigfilho@gmail.com)

4. Departamento de Ciências Florestais. Universidade Federal do Paraná. Rua Lothário Meissner 900, Curitiba, Paraná, Brasil, 80210-170. [carlossanquetta@gmail.com](mailto:carlossanquetta@gmail.com)

---

[Índice]

[No caso de você encontrar quaisquer erros neste site, por favor envie e-mail para [webmaster](#)]

©2017. revistaESPACIOS.com • Derechos Reservados