

SELEÇÃO DE MODELOS PARA ESTIMAR A BIOMASSA DE TRONCO,  
FOLHAS E RAMOS DE ÁRVORES DE *Eucalyptus grandis*  
AOS SETE ANOS DE IDADE NA REGIÃO DE BOTUCATU - SP\*

Ricardo Antonio de Arruda VEIGA\*\*  
Carlos Marchesi de CARVALHO\*\*  
Maria Aparecida Mourão BRASIL\*\*

RESUMO

Em plantações experimentais foram amostradas 156 árvores de *E. grandis* com 7 anos de idade, visando selecionar o melhor modelo para determinações de biomassa de tronco, folhas e ramos. Foram extraídos discos de madeira em 125 árvores, na base (0%), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial, os quais foram processados em laboratório para determinações da densidade básica da madeira e da densidade da casca. Em outras 31 árvores foram pesados separadamente todos os ramos e folhas, e coletadas amostras para a determinação das relações de peso entre matéria seca e matéria verde. Sete modelos de regressão, em função de DAP e altura total, foram testados para estimar os pesos totais de matéria seca de: tronco total com e sem casca, tronco comercial com e sem casca, folhas, ramos e copa. O modelo selecionado para tais estimativas de biomassa foi o de Schumacher-Hall na forma logarítmica.

Palavras-chave: *E. grandis*; equações de peso; modelos; biomassa; tronco; copa.

1 INTRODUÇÃO

Ante a importância do gênero *Eucalyptus* para as atividades florestais do País, e a relevância de resultados que permitam quantificar o desenvolvimento de suas espécies em termos de produção de biomassa, vários estudos vêm sendo conduzidos nas últimas duas décadas.

A maioria desses estudos, desde os publicados por VEIGA & BRASIL (1980, 1981) e VEIGA *et al.* (1980, 1981), refere-se à determinação de equações de peso, destinadas à estimativa do peso total ou comercial do tronco de uma árvore em função dos respectivos valores de DAP e altura (VEIGA, 1992). Há também trabalhos sobre biomassa da copa, como o de TIMONI *et al.* (1997).

Dentre as várias espécies do gênero *Eucalyptus* que vêm sendo utilizadas com sucesso

ABSTRACT

A total of 156 trees were sampled in an experimental plantation of 7-years-old *E. grandis* to select the best model for stem, leaves and branches biomass determinations. Cross sections were collected in 125 sampled trees at ground level (0%), 25%, 50%, 75% and at the merchantable-stem diameter top of 4.0 cm outside bark (100%), and were processed in laboratory to establish the wood basic density and the bark density. Another 31 trees were separated into the crown components of branches and leaves, which were weighted green, and samples were collected to determinate the dry mass/green mass ratios for those components. Seven regression models, based on diameter at breast height outside bark (d<sub>b</sub>) and tree total height (h<sub>t</sub>), were tested for biomass (w<sub>i</sub>) estimations of: total-stem wood dry weight outside and inside bark; merchantable-stem wood dry weight outside and inside bark; total leaves dry weight; total branches dry weight; total crown dry weight. The selected model for the biomass equations estimations was the one from Schumacher-Hall.

Key words: *E. grandis*; weight equations; models; biomass; stem; crown.

nas atividades florestais brasileiras, cabe destaque ao *E. grandis*, a mais plantada e que se sobressai pela rusticidade, frugabilidade e bons rendimentos em volume de madeira.

A literatura revela vários trabalhos que quantificam para tal espécie a biomassa do tronco ou mesmo a biomassa total acima do solo. É o caso dos trabalhos de PINHEIRO *et al.* (1986), selecionando equações para estimar peso da copa para povoamentos com 6 a 8 anos de idade no Estado de São Paulo; VITAL & LUCIA (1987), mostrando que o peso de matéria seca aos 5,5 anos de idade variava com o espaçamento; CAMPOS *et al.* (1990), que também analisaram o efeito do espaçamento; e SOARES *et al.* (1996), que estimaram a biomassa total acima do nível do solo para povoamento de *E. grandis*, em Viçosa, Minas Gerais.

(\*) Aceito para publicação em maio de 1999.

(\*\*) UNESP, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Departamento de Ciências Florestais, Caixa Postal 237, 18603-970, Botucatu, SP, Brasil.

O presente trabalho foi conduzido tendo por objetivo a seleção de modelos de regressão que permitam estimar a biomassa do tronco, das folhas e dos ramos de árvores de *E. grandis*, aos 7 anos de idade, na região de Botucatu, Estado de São Paulo.

Trata-se de parte de projeto mais amplo que deverá utilizar os resultados obtidos para comparações de rendimento entre essa espécie e árvores de *Acacia mangium*, com a mesma idade, na mesma região.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram amostradas aleatoriamente, igualmente distribuídas por classes de diâmetro, 156 árvores de povoamento de *E. grandis* com 7 anos de idade, em área de solo latossol amarelo fase arenosa, em Botucatu - SP, implantado ao espaçamento original de 3 x 2 m.

Em 125 das árvores-amostras foram coletadas secções transversais nas porções correspondentes à base (0%), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial, considerando-se o diâmetro comercial de despona de 4,0 cm com casca.

Para cada uma das secções foi determinada a densidade básica de madeira, e com base nos valores correspondentes às diferentes secções de cada árvore, foi estimada a densidade básica média de madeira da árvore. Para cada árvore foi também estimada a densidade média da casca.

As determinações de densidade foram conduzidas em função dos respectivos valores de peso de matéria seca, obtido em estufa, e volume saturado, determinado em balança hidrostática.

A partir das determinações de campo e de laboratório, foram calculados para todas as árvores amostradas os valores da biomassa, em termos de peso de matéria seca, correspondentes ao peso total do tronco com e sem casca, e ao peso total da porção comercial do tronco com e sem casca.

Nas demais 31 árvores-amostras foram realizadas determinações dendrométricas e coletado todo o material da copa, com pesagem de matéria verde de folhas e de ramos. Foram também coletadas amostras de folhas e ramos para determinações das respectivas relações entre peso de matéria seca e peso de matéria verde, para estimativas dos pesos totais de matéria seca correspondentes.

Para a seleção de equações de peso, as variáveis estudadas foram as seguintes: peso total de matéria seca do tronco com casca (ptcc), peso total de matéria seca do tronco sem casca (ptsc), peso total de matéria seca do tronco comercial com casca (pccc), peso total de matéria seca do tronco comercial sem casca (pcsc), peso total de matéria seca de folhas (ptfl), peso total de matéria seca de ramos (ptr) e peso total de matéria seca da copa (ptc), este considerado como a soma dos valores correspondentes a ramos e folhas.

Para cada uma dessas variáveis dependentes foram testados os modelos de equação de regressão relacionados na TABELA 1, para estimativas de peso de matéria seca em função dos valores de DAP e altura total. Tais modelos são clássicos, utilizados há décadas para determinação de equações de volume (SPURR, 1952), tendo sido escolhidos no presente trabalho pelos bons resultados apresentados em estudos sobre equações de peso (VEIGA, 1984, 1992; TIMONI *et al.*, 1997).

TABELA 1 - Modelos testados para seleção de equações de regressão para estimar a biomassa de uma árvore, em termos de peso total de matéria seca ( $w_i$ ) em função dos respectivos valores de DAP ( $d_i$ ) e altura total ( $h_i$ ).

Modelo	Relação Funcional
1 (Variável combinada, de Spurr)	$w_i = \beta_0 + \beta_1 d_i^2 h_i + \epsilon$
2 (Australiana, de Stroat)	$w_i = \beta_0 + \beta_1 d_i^2 + \beta_2 h_i + \beta_3 d_i^2 h_i + \epsilon$
3 (Mewer, modificada)	$w_i = \beta_0 + \beta_1 d_i + \beta_2 d_i^2 + \beta_3 d_i h_i + \beta_4 d_i^2 h_i + \epsilon$
4 (Naslund)	$w_i = \beta_0 + \beta_1 d_i^2 + \beta_2 d_i^2 h_i + \beta_3 d_i h_i^2 + \beta_4 h_i^2 + \epsilon$
5 (Variável combinada logarítmica, de Spurr)	$\log_e w_i = \beta_0 + \beta_1 \log_e (d_i^2 h_i) + \epsilon$
6 (Logarítmica, de Schumacher-Hall)	$\log_e w_i = \beta_0 + \beta_1 \log_e d_i + \beta_2 \log_e h_i + \epsilon$
7 (Variável combinada logarítmica)	$\log_e w_i = b_0 + b_1 \log_e (d_i h_i^2) + \epsilon$

### 3 RESULTADOS

Os principais resultados correspondentes às equações de peso, para estimativas da biomassa do tronco e da copa, estão sintetizados nas TABELAS 2 a 5.

Na TABELA 2 estão relacionadas as estimativas dos parâmetros dos modelos de regressão testados, para as variáveis dependentes correspondentes aos pesos totais e comerciais, com e sem casca, da matéria seca do tronco, obtidos com

N = 125 observações cada. Os respectivos valores de coeficiente de variação (CV) e de coeficiente de determinação ( $r^2$ ) estão relacionados na TABELA 4.

Na TABELA 3 estão reunidas as estimativas dos parâmetros dos modelos de regressão comparados, para as variáveis dependentes correspondentes aos pesos totais de matéria seca de folhas, de ramos e da copa, obtidos com N = 31 observações cada. Os respectivos valores de coeficiente de variação (CV) e de coeficiente de determinação ( $r^2$ ) estão apresentados na TABELA 5.

TABELA 2 - Estimativas dos parâmetros dos modelos de regressão testados para determinações de peso de matéria seca da madeira do tronco de árvores de *E. grandis* aos sete anos de idade, na região de Botucatu - SP. Resultados relativos às estimativas das variáveis dependentes peso total com casca (ptcc), peso total sem casca (ptsc), peso comercial com casca (pccc) e peso comercial sem casca (pcsc).

Modelo	$b_i = \hat{\beta}_i$	ptcc	ptsc	pccc	pcsc
1	$b_0$	-964,641062	-905,515843	-1585,155976	-1488,842276
	$b_1$	18,173740	16,757421	17,944619	16,802894
2	$b_0$	-8782,187687	-8521,638563	-11293	-10056
	$b_1$	-90,476322	-116,522271	-75,990300	-110,413644
	$b_2$	700,660715	732,793437	805,793146	787,758895
	$b_3$	21,041578	20,686324	20,051507	20,396147
3	$b_0$	40196	30703	38163	29068
	$b_1$	-15487	-11999	-15395	-11815
	$b_2$	805,349195	568,910282	809,475561	561,427544
	$b_3$	507,741769	413,166929	515,700699	413,097312
	$b_4$	-13,555867	-6,443314	-14,505155	-6,397162
4	$b_0$	-8221,292128	-5691,489680	-9553,869210	-6735,699971
	$b_1$	-127,294533	-120,803179	-102,252033	-111,361234
	$b_2$	28,597010	23,648360	26,399667	23,033952
	$b_3$	-7,721768	-3,753178	-6,819073	-3,544338
	$b_4$	85,096053	54,923129	81,525109	55,091647
5	$b_0$	2,354076	2,241832	1,905625	1,869331
	$b_1$	1,064456	1,068224	1,117041	1,113303
6	$b_0$	1,437515	1,222887	0,751949	0,654418
	$b_1$	1,789235	1,758826	1,806529	1,776358
	$b_2$	1,665142	1,736008	1,873123	1,909519
7	$b_0$	0,189151	0,060441	-0,383283	-0,417698
	$b_1$	1,266765	1,272316	1,331408	1,327653

VEIGA, R. A. de A.; CARVALHO, C. M. de & BRASIL, M. A. M. Seleção de modelos para estimar a biomassa de tronco, folhas e ramos de árvores de *Eucalyptus grandis* aos sete anos de idade na região de Botucatu - SP.

TABELA 3 - Estimativas dos parâmetros dos modelos de regressão testados para determinações de peso de matéria seca da copa de árvores de *E. grandis* aos sete anos de idade, na região de Botucatu - SP. Resultados relativos às estimativas das variáveis dependentes peso total de folhas (ptfl), peso total de ramos (ptr) e peso total da copa (ptc).

Modelo	$b_i = \hat{\beta}_i$	ptfl	ptr	ptc
1	$b_0$	-480,343417	-2099,989869	-2580,333286
	$b_1$	0,902358	2,035335	2,937694
2	$b_0$	2959,283969	10832	13791
	$b_1$	43,998613	51,956158	95,954772
	$b_2$	-300,065977	-944,064653	-1244,130630
3	$b_3$	-0,571213	1,013444	0,439231
	$b_0$	7462,479151	16033	23496
	$b_1$	-2309,597649	-4259,187209	-6568,784857
	$b_2$	185,812428	330,518306	516,330734
	$b_3$	35,758259	30,378250	66,136509
4	$b_4$	-4,682851	-6,101098	-10,783949
	$b_0$	-3964,350763	-5904,999557	-9869,350320
	$b_1$	-18,740339	-85,346496	-104,086834
	$b_2$	7,774838	18,628694	26,403532
	$b_3$	-7,129404	-14,705217	-21,834621
5	$b_4$	50,129732	93,260017	143,329749
	$b_0$	-1,544845	-2,364163	-1,351933
6	$b_1$	1,142785	1,306471	1,239933
	$b_0$	2,969795	6,500786	5,751615
7	$b_1$	3,660300	5,318455	4,642933
	$b_2$	-1,550393	-3,993786	-2,997640
	$b_0$	-2,710699	-3,651052	-2,577838
	$b_1$	0,940213	1,068784	1,016528

TABELA 4 - Resultados de coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e coeficiente de variação (CV) obtidos para os modelos testados para determinações de peso de matéria seca da madeira do tronco de árvores de *E. grandis* aos sete anos de idade, na região de Botucatu - SP, relativos às estimativas de peso total com casca (ptcc), peso total sem casca (ptsc), peso comercial com casca (pccc) e peso comercial sem casca (pcsc).

Modelo	ptcc		ptsc		pccc		pcsc	
	$r^2$	CV%	$r^2$	CV%	$r^2$	CV%	$r^2$	CV%
1	0,956	12,34	0,952	12,91	0,956	12,44	0,952	13,03
2	0,958	12,16	0,954	12,61	0,958	12,22	0,955	12,70
3	0,959	12,02	0,955	12,53	0,959	12,08	0,956	12,63
4	0,958	12,15	0,955	12,63	0,958	12,22	0,955	12,73
5	0,964	1,29	0,962	1,34	0,961	1,42	0,960	1,46
6	0,967	1,24	0,966	1,28	0,966	1,35	0,964	1,37
7	0,961	1,36	0,960	1,38	0,960	1,43	0,960	1,45

TABELA 5 - Resultados de coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e coeficiente de variação (CV) obtidos para os modelos testados para determinações de peso de matéria seca de árvores de *E. grandis* aos sete anos de idade, na região de Botucatu - SP, relativos às estimativas do peso total de folhas (ptfl), do peso total de ramos (ptr) e do peso total da copa (ptc).

Modelo	ptfl		ptr		ptc	
	$r^2$	CV%	$r^2$	CV%	$r^2$	CV%
1	0,770	40,16	0,754	51,36	0,776	45,14
2	0,832	35,61	0,829	44,32	0,848	38,61
3	0,850	34,28	0,849	42,41	0,868	36,68
4	0,872	31,61	0,863	40,41	0,884	34,26
5	0,798	5,77	0,765	6,84	0,796	5,57
6	0,820	5,54	0,828	5,95	0,842	4,98
7	0,783	5,97	0,743	7,15	0,776	5,83

#### 4 DISCUSSÃO

Comparando-se os resultados correspondentes aos modelos 1 a 4, não logarítmicos, depreende-se da TABELA 4 que os melhores resultados para as estimativas de ptcc, ptsc, pccc e pcsc foram os obtidos por meio do modelo de Meyer modificado (modelo 3), que apresentou para essas variáveis dependentes menores valores de coeficiente de variação e maiores valores de coeficiente de determinação. De modo similar, depreende-se da TABELA 5 que os melhores resultados com modelos não logarítmicos para estimativas de ptfl, ptr e ptc foram os decorrentes do modelo 4, de Naslund.

Cotejando-se os modelos 5 a 7, logarítmicos, infere-se da TABELA 4 que os melhores resultados para estimativa da biomassa do tronco (variáveis dependentes ptcc, ptsc, pccc e pcsc) foram obtidos com o modelo 6, de Schumacher-Hall. Foi também este o modelo logarítmico selecionado para estimativas da biomassa da copa (ptfl, ptr e ptc), como se depreende dos resultados inseridos na TABELA 5.

Para poder-se comparar, para cada uma das sete variáveis dependentes em estudo, os resultados dos respectivos modelos logarítmico e não logarítmico selecionados, calculou-se os correspondentes valores do índice de Furnival (FURNIVAL, 1961).

Assim, em relação à variável dependente ptcc, o índice de Furnival para o modelo 3 foi de 6,237 e para o modelo 6 foi de 5,444, selecionando-se portanto o modelo 6 por apresentar menor valor do índice em questão. De modo análogo, para as

demais variáveis relativas a peso de matéria seca do tronco, cotejando-se os modelos 3 e 6, sendo o primeiro não logarítmico e o segundo logarítmico, os respectivos valores do índice de Furnival foram de 5,994 e 5,228 para ptsc, 4,398 e 4,010 para pccc, e 3,902 e 3,534 para pcsc, selecionando-se igualmente o modelo 6, de Schumacher-Hall.

De modo similar, comparando-se os modelos 4 e 6, respectivamente os melhores não logarítmico e logarítmico para estimativas da biomassa dos componentes da copa, os valores do índice de Furnival foram de 5,994 e 5,228 para ptfl, 4,398 e 4,010 para ptr, e 3,902 e 3,534 para ptc, selecionando-se também o modelo 6, de Schumacher-Hall.

Em decorrência, para todas as variáveis dependentes analisadas, o melhor modelo para estimar a biomassa da parte aérea de *E. grandis* aos 7 anos de idade na região em estudo foi o modelo 6, de Schumacher-Hall. Com base nos resultados apresentados nas TABELAS 2 e 3, as equações de peso selecionadas foram as seguintes:

$$\log_e \text{ptcc} = 1,437515 + 1,789235 \log_e d_i + 1,665142 \log_e h_i \quad (r^2 = 0,967, \text{CV} = 1,24\%)$$

$$\log_e \text{ptsc} = 1,222887 + 1,758826 \log_e d_i + 1,736008 \log_e h_i \quad (r^2 = 0,966, \text{CV} = 1,28\%)$$

$$\log_e \text{pccc} = 0,751949 + 1,806529 \log_e d_i + 1,873123 \log_e h_i \quad (r^2 = 0,966, \text{CV} = 1,35\%)$$

$$\log_e \text{pcsc} = 0,654418 + 1,776358 \log_e d_i + 1,909519 \log_e h_i \quad (r^2 = 0,964, \text{CV} = 1,37\%)$$

$$\log_e \text{ptfl} = 2,969795 + 3,660300 \log_e d_i - 1,550393 \log_e h_i \quad (r^2 = 0,820, \text{CV} = 5,54\%)$$

$$\log_e \text{ptr} = 6,500786 + 5,318455 \log_e d_i - 3,993786 \log_e h_i \quad (r^2 = 0,838, \text{CV} = 5,95\%)$$

$$\log_e \text{ptc} = 5,751615 + 4,642933 \log_e d_i - 2,997640 \log_e h_i \quad (r^2 = 0,842, \text{CV} = 4,98\%)$$

sendo os valores de peso expressos em gramas, os de diâmetro em centímetros e os de altura em metros.

VEIGA, R. A. de A.; CARVALHO, C. M. de & BRASIL, M. A. M. Seleção de modelos para estimar a biomassa de tronco, folhas e ramos de árvores de *Eucalyptus grandis* aos sete anos de idade na região de Botucatu - SP.

## 5 CONCLUSÕES

Conclui-se, para a espécie e condições em que foi conduzido o presente estudo, que o modelo correspondente à equação da variável combinada logarítmica de Schumacher-Hall

$$\log_e w_i = \beta_0 + \beta_1 \log_e d_i + \beta_2 \log_e h_i + \varepsilon$$

é indicado para estimativas da biomassa de árvores em termos de pesos totais de matéria seca de: tronco total com casca, tronco total sem casca, tronco comercial com casca, tronco comercial sem casca, peso total de folhas, peso total de ramos e peso total da copa como um todo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAMPOS, J. C. C. *et al.* 1990. Relações entre espaçamento, volume e peso da madeira de eucalipto. *Revista Árvore*, Viçosa, 14(20):119-133.
- FURNIVAL, G. M. 1961. An index for comparing equations used in constructing volume tables. *Forest Science*, Washington, 7(4):337-341.
- PINHEIRO, G. S.; PONTINHA, A. A. S. & SALES, L. M. A. B. 1986. Quantificação de biomassa de copas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden através de parâmetros dendrométricos. *Bol. Técn. IF*, São Paulo, 40-A:481-496. Pt.2. (Edição Especial)
- SOARES, C. P. B. *et al.* 1996. Modelos para estimar a biomassa da parte aérea em um povoamento de *Eucalyptus grandis* na região de Viçosa, Minas Gerais. *Revista Árvore*, Viçosa, 20(2):179-189.
- SPURR, S. H. 1952. *Forest inventory*. Nova York, Ronald Press. 476p.
- TIMONI, J. L.; VEIGA, R. A. A. & PINHEIRO, G. S. 1997. Determinação de equações para quantificação da biomassa da copa de árvores de *Eucalyptus saligna* Smith aos 22 anos. *Rev. Inst. Flor.*, São Paulo, 9(1):61-69.
- VEIGA, R. A. A. 1984. *Dendrometria e inventário florestal*. Botucatu, Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais. 108p.
- \_\_\_\_\_. 1992. Tree models for biomass estimation in *Eucalyptus* and *Pinus* inventories in Brazil. *The Finnish Forest Research Institute Research Papers*, Helsinki, (444):195-200.
- VEIGA, R. A. A. & BRASIL, M. A. M. 1980. Equações para estimativas de peso de matéria seca e de volume para *Eucalyptus propinqua* Deane ex Maiden. *Silvicultura*, São Paulo, 2(16):136.
- \_\_\_\_\_. 1981. Peso de matéria seca e volume de *Eucalyptus propinqua* Deane ex Maiden - equações. *Bol. Técn. IF*, São Paulo, 35(2):73-84.
- VEIGA, R. A. A.; BRASIL, M. A. M. & FERREIRA, M. 1980. Peso seco do tronco comercial para *Eucalyptus saligna* e *E. urophylla*. *Silvicultura*, São Paulo, 2(16):138.
- \_\_\_\_\_. 1981. Peso da parte comercial do tronco de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus urophylla* - estimativa no primeiro corte. *Bol. Técn. IF*, São Paulo, 35(2):85-92.
- VITAL, B. R. & LUCIA, R. M. 1987. Efeito do espaçamento na produção em peso e na qualidade de madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* aos 52 meses de idade. *Revista Árvore*, Viçosa, 11(2):132-145.