

EQUAÇÕES TRADICIONAIS E SIMULTÂNEAS PARA BIOMASSA DE COMPARTIMENTOS AÉREOS DE *CRYPTOMERIA JAPONICA* (L.F.) D. DON.

Vinicius Morais COUTINHO¹
Carlos Roberto SANQUETTA¹
Mateus Niroh Inoue SANQUETTA¹
Aurélio Lourenço RODRIGUES¹
Ana Paula Dalla CORTE¹

- RESUMO: O presente trabalho teve como objetivo desenvolver equações matemáticas para a predição da biomassa aérea individual total e dos compartimentos: fuste com casca e copa para *Cryptomeria japonica* (L.F.) D. DON. Adicionalmente, de forma a garantir aditividade entre os compartimentos da biomassa, foi ajustado um sistema de equações aparentemente não relacionadas (SUR) ou sistema de equações simultâneas. Recorrendo ao método destrutivo, foram medidas e pesadas 34 árvores oriundas de um plantio experimental localizado no município de Rio Negro, PR. A compartimentação da biomassa foi realizada individualmente, bem como sua pesagem. Amostras foram tomadas para determinação da fração de umidade e, em seguida, determinou-se a sua biomassa seca. Foram testados 11 modelos tradicionais que continham como variáveis independentes o diâmetro à altura do peito (dap) e altura total (ht). Os modelos de dupla entrada (d, h) foram os que obtiveram melhor desempenho para a biomassa total e para a biomassa do fuste. Dentre os modelos testados para a biomassa aérea total, biomassa do fuste e biomassa da copa, os que obtiveram ajustes mais precisos foram os modelos 3, 4 e 5, respectivamente. A aplicação do método de ajuste por equações simultâneas garantiu as propriedades da aditividade entre os compartimentos de biomassa e a biomassa total, evitando distorções entre a somatória das equações individuais para cada compartimento e da equação total.
- PALAVRAS-CHAVE: Ajuste simultâneo; biomassa arbórea; biomassa aérea; modelagem.

1 Introdução

A *Cryptomeria* (*Cryptomeria japonica* (L.F.) D. Don.) é uma espécie florestal conífera, pertencente à família Taxodiaceae e originária de regiões temperadas do Japão e da China. Regiões estas que apresentam altitudes entre 600 m e 1.800 m (SHIMIZU e MAIOCHI, 2007). Segundo os autores retrocitados, em suas origens, esta espécie pode atingir entre 20 m e 30 m de altura, podendo chegar até 50 m em sítios excepcionais. No

¹ Universidade Federal do Paraná - UFPR, Departamento de Ciências Florestais, CEP: 80210-170, Curitiba, PR, Brasil. E-mail: viniciusmorais@ufpr.br; sanquetta@ufpr.br; mateus.sanquetta@hotmail.com; alourencorodrigues@gmail.com; anapaulacorte@gmail.com.

Brasil, onde é conhecida, também, como cedro-japonês ou pinheiro-japonês, a *cryptomeria* pode atingir um incremento médio anual de até 45m³/ha em sítios adequados (CARPANEZZI *et al.*, 1988). Para Carvalho (2001), *C. japonica* é uma das espécies arbóreas alternativas para plantios florestais no Brasil. Santos *et al.* (2000) comentam que a espécie possui grande potencial para plantios nas regiões altas e frias do Brasil, caracterizado pelo seu rápido crescimento, boa qualidade da madeira e boa adaptação ao clima e solo do Sul do país. No estado do Paraná, o plantio é recomendado em locais acima de 800 m de altitude (CARPANEZZI *et al.*, 1986; CARPANEZZI, 1988).

Segundo Sanquetta *et al.* (2011) as florestas têm recebido crescente atenção no que se refere ao seu potencial para contribuir com a redução do efeito estufa por meio de sua capacidade de armazenar carbono durante o processo natural de produção de biomassa. A expansão da cobertura florestal global e o estabelecimento de florestas podem contribuir de forma significativa com o aumento dos estoques de carbono e com a produção de bens duráveis com a madeira dessas florestas (ROCHADELLI, 2001). Desse modo, as florestas são importantes para o equilíbrio do balanço global de gás carbônico, pois os diferentes tipos de florestas armazenam diferentes quantidades de carbono em função dos estágios de sucessão, da idade, do regime de manejo e da composição de espécies (WATZLAVICK *et al.*, 2014).

Segundo Rezende (2000) a quantificação da biomassa de uma árvore pode ser feita por dois métodos, a saber: direto e indireto. O método direto implica na derrubada da árvore para a determinação exata de seu peso e medidas. As determinações de biomassa em árvores utilizando o método direto são imprescindíveis para um primeiro conhecimento das características da espécie de interesse. Porém, tão logo se obtenha um número significativo de determinações, pode-se lançar mão dos métodos indiretos, tais como os modelos de regressão. Utilizando esse método, é possível abranger grandes extensões florestais e reduzir significativamente a magnitude dos recursos financeiros necessários para esse tipo de trabalho.

Segundo Salati (1994), os métodos indiretos são utilizados para se estimar a biomassa de áreas florestais de grande extensão e, dependendo das informações disponíveis, são usadas relações empíricas entre a biomassa e algumas outras variáveis tais como diâmetro à altura do peito, a altura e o volume. A partir dessas relações são desenvolvidos modelos matemáticos que permitem a estimativa da biomassa individual e por unidade de área.

Usualmente, a modelagem da biomassa arbórea tem sido feita com base em modelos independentes para cada componente da árvore. Entretanto, o ajuste simultâneo por meio da aditividade de equações é um recurso crescentemente empregado nos estudos de biomassa, pois permite compatibilizar as estimativas da biomassa dos componentes com a estimativa da biomassa total (BEHLING *et al.*, 2012; SANQUETTA *et al.*, 2014). A aditividade de equações consiste em um conjunto de equações que são ajustadas simultaneamente com restrições. Cada componente possui um modelo com suas próprias variáveis independentes e o modelo para o total é uma função de todas as variáveis independentes utilizadas para modelar os componentes. As restrições são impostas pela regressão do total, de modo a forçar e garantir um sistema de equações aditivas (ZELLNER, 1962; DONG e ZHANG e LI, 2014; ZHAO *et al.*, 2015).

Desse modo, este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de equações alométricas para estimar a biomassa seca total da porção acima do solo e a biomassa seca

de dois compartimentos da árvore (fuste com casca e copa), sendo esta a última composta pelo conjunto de galhos vivos, galhos mortos, folhas e miscelâneas (material reprodutivo), para a espécie *Cryptomeria japonica*. Adicionalmente, este estudo teve como objetivo também desenvolver a avaliação do ajustamento simultâneo para as estimativas integradas dessas biomassas, de maneira compatível.

2 Material e métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados 34 indivíduos da espécie *Cryptomeria japonica*, com 34 anos de idade, plantados em um delineamento experimental com 4.500 m² de área e espaçamento de 3,0 m × 2,0 m, localizado na Fazenda Experimental de Rio Negro, Rio Negro – PR, Brasil. O município está situado à latitude de 26°06' S, longitude de 49°48' W e altitude de 847 m. Este experimento foi instalado entre fevereiro e abril de 1980, com sementes originárias das províncias japonesas de Miyagi, Toyama, Shimane, Akita e Nara. Também foram utilizadas sementes originárias de Camanducaia (Minas Gerais), com a finalidade inicial de se realizar teste de procedência das mesmas. A seleção dos indivíduos representativos ocorreu dentro da amplitude diamétrica 14,7 a 35,4 cm e alturas variando de 12,8 m a 27,7 m. Após a seleção, os indivíduos foram objeto de medições dendrométricas e quantificação de biomassa pelo método direto por meio de determinação de seu peso verde em campo.

2.2 Dados utilizados

Após a escolha dos indivíduos, procedeu-se à mensuração do diâmetro à altura do peito (dap). Em seguida, os indivíduos foram derrubados e a altura total da árvore (ht) foi medida utilizando uma fita métrica. A variável idade foi determinada por meio da contagem dos anéis de crescimento das árvores e dos registros históricos.

Durante a pesagem em campo, cada árvore foi separada em 2 compartimentos, sendo estes: fuste com casca e copa. O compartimento copa englobou as folhas, os galhos mortos, galhos vivos e miscelânea da árvore. Os procedimentos de determinação de biomassa fresca seguiram as recomendações do IPCC (2006). De cada compartimento, obteve-se a biomassa verde, determinada com balança mecânica com capacidade de até 40 quilos e precisão de 10 gramas. Foram selecionadas porções amostrais representativas da biomassa por compartimento, com o objetivo de realizar as determinações de biomassa seca. Para tais determinações, as amostras foram secas em estufa com renovação de ar à temperatura de 65 °C, por aproximadamente 20 dias, até atingirem peso constante. As porções amostrais secas foram pesadas em balança eletrônica de precisão de 1 g e os percentuais de biomassa seca de cada compartimento foram calculados com base na relação:

$$MS(\%) = \frac{(PS)}{(PV)} * 100 \quad (1)$$

em que: *MS*= matéria seca (%); *PS*= peso da massa seca total do compartimento (g) e *PV*= peso da massa verde total do compartimento (g).

A equação (1) foi empregada para determinar os pesos das massas secas totais de cada compartimento, pesados frescos em campo.

Após a determinação do teor de umidade das amostras, foi possível relacioná-la com a biomassa verde em campo, desse modo, obteve-se a biomassa seca estimada para os compartimentos de cada árvore.

2.3 Análise estatística e ajuste de modelos matemáticos

Objetivando-se a construção de modelos para a estimativa das biomassas aérea seca total, do fuste e da copa das árvores, foi construída uma matriz de correlação linear simples com as informações de dap e ht obtidas das 34 árvores amostradas. Foram selecionados 11 modelos matemáticos encontrados na literatura florestal aplicados para estimativa de biomassa e volume do fuste.

2.4 Ajustes de modelos alométricos tradicionais para estimativa da biomassa total e por compartimentos

Após a realização da tabulação dos dados relativos à biomassa seca, foram testados 11 modelos alométricos, sendo três modelos lineares e oito não lineares (incluindo modelos biológicos de crescimento), tanto para a estimativa da biomassa total como para os compartimentos da árvore, totalizando assim, 33 modelos ajustados (Tabela 1). Os modelos biológicos de crescimento testados foram os de Weibull (WEIBULL, 1951), Logístico (NELDER, 1961), Gompertz (LAIRD, 1965), Schumacher (SCHUMACHER, 1939), Silva-Bailey (SILVA, 1986) e Richards (RICHARDS, 1959). Estes modelos têm por finalidade estimar a biomassa seca total e de cada compartimento em função de variáveis de fácil obtenção, como dap e ht.

A avaliação dos modelos foi realizada utilizando cinco diferentes critérios de avaliação de desempenho. Foram empregados os coeficientes de determinação (R^2) e coeficiente de determinação de Schlaegel (R^2_{aj}), bem como o erro padrão da estimativa (S_{yx}), critério de informação de Akaike (AIC) e erro padrão da estimativa percentual ($S_{yx}\%$). Esses critérios são apresentados na Tabela 2.

Tabela 1 - Modelos testados para a estimativa da biomassa seca total e de compartimentos de *Cryptomeria japonica* em Rio Negro, PR

	Número Modelo	Modelo
Modelos lineares e não lineares	[1]	$y = \beta_0 + \beta_1.dap + \varepsilon$
	[2]	$y = \beta_0 + \beta_1.dap + \beta_2.ht + \varepsilon$
	[3]	$y = \beta_0 + \beta_1.(dap^2.ht) + \varepsilon$
	[4]	$y = \beta_0.dap^{\beta_1} + \varepsilon$
	[5]	$y = \beta_0.dap^{\beta_1}.ht^{\beta_2} + \varepsilon$
Modelos biológicos de crescimento	[6] Weibull	$f(x) = \beta_0.(1 - e^{-\beta_1.x^{\beta_2}}) + \varepsilon$
	[7] Logística	$f(x) = \frac{\beta_0}{1 + \beta_1.e^{-\beta_2.x}} + \varepsilon$
	[8] Gompertz	$f(x) = \beta_0.e^{\beta_1.e^{-\beta_2.x}} + \varepsilon$
	[9] Schumacher	$f(x) = \beta_0.e^{-\beta_1.\frac{1}{x}} + \varepsilon$
	[10] Silva-Bailey	$f(x) = \beta_0.e^{(\beta_1.(\beta_2^x))} + \varepsilon$
	[11] Richards	$f(x) = \beta_0.(1 - e^{-\beta_1.x})^{\beta_2} + \varepsilon$

em que: Y = biomassa seca de cada compartimento (kg); dap = diâmetro a altura do peito (cm); ht = altura total (m); β_0 , β_1 , β_2 e β_3 = coeficientes de regressão; $f(x)$ = biomassa seca total ou de compartimentos (kg); ε = exponencial; x = dap (cm).

Tabela 2 - Formulação dos indicadores estatísticos adotados para avaliar os modelos da biomassa individual de árvores de *Cryptomeria japonica* em Rio Negro, PR

Critério	Formulação
Coeficiente de determinação	$R^2 = 1 - \frac{SQ_{reg}}{SQ_{tot}}$
Índice de Schlaegel	$IA = 1 - \frac{(n-1)}{(n-k)} (1 - R^2)$
	$S_{yx}\% = \frac{S_{yx}}{P_{obs}} \cdot 100$
Erro padrão da estimativa em percentagem	Em que: $S_{yx} = \sqrt{\frac{SQ_{res}}{n-k}}$
Critério de Informação de Akaike	$AIC = -2 \left(\frac{-n}{2} \ln \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 \right) \right) + 2k$
Análise de resíduos	$resíduo\% = \left(\frac{P_{obsi} - P_{esti}}{P_{obsi}} \right) \cdot 100$

em que: n = número de observações; k = número de parâmetros; \ln = logaritmo neperiano; P_{obs} = biomassa observada do compartimento (kg); P_{est} = biomassa estimada do compartimento (kg); SQ = soma dos quadrados (resíduos, regressão e total).

A análise gráfica dos resíduos, um indicador fundamental para a avaliação de ajustes, foi empregada objetivando-se visualizar os desvios existentes entre os valores reais e os valores estimados, bem como identificar a possível presença de tendências na distribuição dos resíduos da equação. A independência dos resíduos foi verificada através do teste de Durbin-Watson, de modo a verificar se os erros estão correlacionados em série.

2.5 Ajustamento simultâneo do sistema de equações

A fim de garantir a aditividade das componentes de biomassa da árvore, Parresol (1999) sugere a estimação simultânea por um sistema de equações. Essa técnica permite compatibilizar as estimativas, em que o resultado do somatório das equações de cada compartimento é o mesmo que o da equação para biomassa total. Desta forma, procedeu-se ao ajustamento simultâneo das equações selecionadas para cada componente de biomassa. Para tal, seguiu-se o procedimento sugerido por Parresol (2001), que consiste

no método dos mínimos quadrados generalizados designado por “Nonlinear Seemingly Unrelated Regressions” (NSUR). A biomassa de cada componente é calculada por uma regressão com as suas próprias variáveis independentes, no tocante a regressão para a biomassa total, o valor final é resultante do somatório das funções utilizadas para as outras componentes. Cada regressão foi ajustada utilizando as biomassas determinadas no ajustamento independente (Fórmulas 4, 5 e 6). O referido procedimento foi aplicado recorrendo à opção ITSUR do procedimento MODEL do SAS, com a seguinte especificação:

$$Y_{fuste} = f_1(X_{1j}, \beta_{1j}) + \varepsilon_1 \quad (4)$$

$$Y_{copa} = f_2(X_{2j}, \beta_{2j}) + \varepsilon_2 \quad (5)$$

$$Y_{total} = f_{total}(X_{1j}, X_{2j}, \beta_1, \beta_2) + \varepsilon_{total} \quad (6)$$

em que: y = biomassa de cada compartimento da árvore (kg); f = em função de; x = variáveis; β coeficientes de regressão e e = erro aleatório dos modelos (e_1 , e_2 e e_{total}), respectivamente.

A análise do desempenho deu-se pela aplicação dos critérios estatísticos apontados anteriormente na Tabela 2.

2.6 Comparação dos ajustes independentes e simultâneos

Realizou-se a comparação entre as equações obtidas pela estimação independente e simultânea para a estimativa das biomassas totais e dos compartimentos. Esta avaliação foi realizada mediante a comparação entre os indicadores de qualidade de ajuste citados anteriormente.

3 Resultados e discussão

A Tabela 3 apresenta medidas descritivas de posição (média aritmética simples e mediana) e de dispersão (desvio padrão, variância, coeficiente de variação, erro padrão e amplitude total) para as variáveis de dap e ht e para as determinações das biomassas do fuste, da copa e total das árvores-amostra de *Cryptomeria japonica*. Há grande amplitude na variação da biomassa individual entre as árvores dominantes e as dominadas, pois se trata de um povoamento não manejado.

As árvores amostras apresentaram diâmetro médio de 25,18 cm com desvio padrão de 5,85 cm, com valor mínimo de 14,70 cm e máximo de 35,40 cm. A altura total média foi de 22,22 m, tendo variado entre 12,80 m e 27,65 m, com desvio padrão de 3,49 m. Para essa mesma área de estudo, Shimizu e Maiochi (2007) encontraram valores médios de dap e altura total de 17,96 cm e 12,16 m, respectivamente, para *cryptomeria* aos 16 anos de idade e dap médio de 24,26 cm aos 25 anos de idade. Esses mesmos autores, em uma área experimental localizada em Colombo-PR, encontraram, aos 16 anos de idade, dap médio de 11,55 cm e altura total média de 17,19 m para a mesma espécie. Nesta

mesma área Dobner Jr. e Vagaes e Higa (2013) encontraram valor de dap médio de 27,18 cm, com mínimo de 7,2 cm e máximo de 56,9 cm aos 31 anos de idade. Nesse último trabalho, foram encontrados, aos 25 anos de idade, valores médios de dap (27,2 cm) e altura total (24,2 m) maiores do que os encontrados no presente trabalho, ou seja, aos 34 anos. Tais resultados podem ser atribuídos ao fato de que no estudo em questão objetivou-se mensurar as variáveis dendrométricas somente dos indivíduos que seriam abatidos para determinação da biomassa seca. Em um povoamento de *Cryptomeria japonica* de 25 anos de idade localizado no município de Campo Belo do Sul, SC, Dobner Jr. e Trazzi e Higa (2014) encontraram valor de dap médio de 27,2 cm variando entre 14,0 cm e 39,1 cm e altura média de 24,2 m com variação entre 16,6 m e 28,7 m.

A biomassa seca individual total média foi de 267,26 kg, tendo variado entre 66,34 kg e 568,16 kg. Já a biomassa seca média do fuste foi de 203,16 kg, variando entre 49,10 kg e 413,92 kg. Para a biomassa seca da copa, o valor médio foi de 64,10 kg, tendo amplitude de 12,12 kg e 205,20 kg (mínimo e máximo) (Tabela 3).

Tabela 3 - Estatísticas descritivas para variáveis dendrométricas e para valores de biomassa entre os compartimentos em árvores de plantio experimental de *Cryptomeria japonica*, no município de Rio Negro, PR

Variável	N	Méd.	D. Pad.	Var.	CV (%)	E. Pad.	Mín.	Máx.
<i>dap (cm)</i>	34	25,18	5,85	34,24	23,24	1,00	14,70	35,40
<i>Altura Total(m)</i>	34	22,22	3,49	12,18	15,71	0,60	12,80	27,65
<i>Biomassa Fuste (kg)</i>	34	203,16	108,81	11838,84	53,56	18,66	49,10	413,92
<i>Biomassa Copa (kg)</i>	34	64,10	43,50	1892,25	67,87	7,46	12,12	205,20
<i>Biomassa Total (kg)</i>	34	267,26	145,64	21211,28	54,49	24,98	66,34	568,16

em que: N = número de observações; Méd. = média aritmética simples; D. Pad. = desvio padrão; Var. = variância; CV (%) = coeficiente de variação; E. Pad. = erro padrão.

O fuste foi o compartimento que apresentou maior participação na biomassa total individual, representando em média 76,02% da biomassa aérea total, seguido pela biomassa da copa com 23,98% da biomassa aérea total. Valores semelhantes a esses foram encontrados por Witschoreck (2008) para um plantio de *Pinus taeda* com 27 anos de idade localizado no município de Cambará do Sul, RS, no qual a porção do fuste com casca representou 75,8% da biomassa aérea total e a copa representou 24,2% da biomassa aérea total. Sanquetta et al. (2014) observaram em plantios de *Acacia mearnsii*, aos 7 anos de idade, localizados em duas regiões do Rio Grande do Sul, valores semelhantes às proporções encontradas neste trabalho, sendo 80% da biomassa aérea presente no fuste com casca e 20% presente na porção da copa.

Outros estudos também observaram maior volume de biomassa concentrado no fuste, entre eles o trabalho de Rezende et al. (1983), com *Eucalyptus grandis*; de Valeri (1988) com *Pinus taeda*; e de Caldeira et al. (2000) com *Acacia mearnsii*. Embora a biomassa do fuste da árvore esteja em maior proporção quando se analisa a variável biomassa total da

árvore, fica explícita a importância e a representatividade dos outros compartimentos, além do fuste, na estimativa da biomassa total, como é o caso da copa. Observando a biomassa aérea das árvores, Rondon (2002) notou que a biomassa aérea se concentra principalmente no fuste, ou seja, na porção do tronco.

3.1 Análise de correlação entre as variáveis envolvidas

Efetuiu-se a análise de correlação linear simples entre as variáveis envolvidas na modelagem, considerando um nível de significância de 95%. Com esta análise foi possível perceber que a biomassa aérea total, biomassa do fuste e biomassa da copa foram mais fortemente correlacionadas com o dap (0,97; 0,86; 0,95, respectivamente) do que com a altura total (0,81; 0,59; 0,84, respectivamente) (Tabela 4). As variáveis ht e dap possuem correlação aproximada, indicando similaridade dessas variáveis na explicação da biomassa. Valerio *et al.* (2007) estudando *Hovenia dulcis* (uva do Japão) encontraram valores de correlação semelhantes aos presentes neste trabalho, com dap tendo forte correlação com a biomassa aérea total e biomassa do fuste (0,94; 0,94), respectivamente. Já a correlação entre dap e altura total apresentou valores iguais (0,77), a altura teve correlação ligeiramente melhor com a biomassa aérea total e biomassa do fuste (0,81; 0,84), respectivamente. Valerio *et al.* (2007) também observaram forte correlação entre as variáveis dependentes, com maior correlação observada entre a biomassa aérea total e a biomassa do fuste, o que também foi observado no presente trabalho. Schikowski *et al.* (2013) estudando *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, encontraram valores de correlação entre dap e altura total de 0,97, superior ao encontrado neste trabalho. Já a correlação entre o dap e a biomassa aérea total foi ligeiramente inferior ao encontrado no presente trabalho, com 0,92. Já a correlação entre a altura total e a biomassa total, foi ligeiramente superior, chegando a uma correlação de 0,91.

O diâmetro à altura do peito apresentou as maiores correlações entre as variáveis independentes, sendo altamente significativo, permitindo o desenvolvimento de equações que possibilitarão a estimativa das variáveis dependentes de forma rápida e eficiente para *Cryptomeria japonica*, devido a sua alta correlação.

Tabela 4 - Correlação entre os distintos componentes analisados de *Cryptomeria japonica*, localizada em Rio Negro, PR

	dap (cm)	ht (m)	Biomassa Fuste (kg)	Biomassa Copa (kg)	Biomassa Total (kg)
dap (cm)	1				
ht (m)	0,77*	1			
Biomassa Fuste (kg)	0,95*	0,84*	1		
Biomassa Copa (kg)	0,86*	0,59 ^{ns}	0,79*	1	
Biomassa Total (kg)	0,97*	0,81*	0,98*	0,89*	1

em que: * Significativo ao nível de 95% de significância; ns = não significativo ao nível de 95% de significância.

Os resultados mostraram uma alta correspondência da biomassa aérea total com a biomassa dos compartimentos do fuste e copa (Tabela 4). Isso se deve ao fato do caráter acumulativo dos mesmos, em que no decorrer do crescimento da árvore são incorporados ao indivíduo.

3.2 Ajuste de modelos alométricos tradicionais

A seguir (Tabela 5) estão representados os resultados dos ajustes tradicionais para biomassa seca individual total e para os compartimentos fuste e copa. Nota-se que, em geral, todos os modelos ajustados apresentaram boas estatísticas de precisão, e que os modelos para biomassa seca total e para biomassa do compartimento fuste em função de dap e altura foram os modelos que obtiveram os ajustes mais precisos. O coeficiente de determinação desses modelos oscilou entre 0,938 e 0,958 e o erro padrão da estimativa entre 11,14% e 13,54% para a biomassa total, coeficiente de determinação entre 0,925 e 0,954 e erro padrão da estimativa entre 11,51% e 14,68% para biomassa do fuste

Os modelos testados para a biomassa seca individual total apresentaram coeficientes de determinação elevados, que variaram de 0,927 a 0,958, e erros padrão da estimativa oscilando entre 11,14% a 14,70%. O modelo com melhor desempenho para a estimativa de biomassa individual total foi o modelo 3, que teve indicadores melhores e distribuição gráfica dos resíduos balanceada (Figura 1), com um coeficiente de determinação de 0,958, erro padrão da estimativa de 11,14% e AIC de 232,72. Os modelos 2 e 5 também mostraram bons resultados, próximos daqueles obtidos com o ajuste do modelo 3.

Comparando os modelos 3 e 5 para a estimativa da biomassa seca do fuste, embora apresentassem estatísticas de precisão bastante semelhantes, o que se mostrou mais adequado foi o modelo 5, devido aos indicadores de ajuste e à distribuição mais balanceada dos resíduos (Figura 1), com coeficiente de determinação de 0,954, erro padrão da estimativa de 11,51% e AIC de 217,22.

Já para a estimativa da biomassa seca da copa, o desempenho dos modelos testados foi menos satisfatório em comparação aos ajustes para biomassa total e para biomassa do fuste, com erro padrão da estimativa oscilando entre 33,23 % e 37,02 %, e coeficiente de determinação oscilando entre 0,702 e 0,760. Com relação à distribuição gráfica dos resíduos, todos os modelos apresentaram expressiva dispersão dos valores, o modelo 4 foi o que apresentou melhor desempenho para a estimativa de biomassa seca da copa, com coeficiente de determinação de 0,760, erro padrão da estimativa de 33,23%; AIC de 209,93 e melhor distribuição gráfica dos resíduos (Figura 1).

Em todos os casos, a distribuição dos resíduos, aplicando o teste de Durbin-Watson, se mostraram independentes, o que significa que os resíduos não estão correlacionados em série, garantido a precisão das estimativas.

Tabela 5 - Resultados dos ajustes dos modelos para a biomassa seca individual total e dos compartimentos fuste e copa em *Cryptomeria japonica*, em Rio Negro, PR

Compar.	Modelos	β_0	β_1	β_2	$R^2_{ajustado}$	S_{yx}	$S_{yx}\%$	AIC
Fuste	[1]	-240,45404	17,61788		0,891	35,91	17,68	246,37
	[2]	-333,10219	13,66136	8,65235	0,925	29,82	14,68	233,74
	[3]	9,09789	0,01246		0,946	25,40	12,50	221,89
	[4]	0,14742	2,22079		0,894	35,40	17,43	244,48
	[5]	0,01009	1,61256	1,48881	0,954	23,39	11,51	217,22
	[6] - Weibull	876,13099	0,00008	2,48890	0,893	35,52	17,48	245,63
	[7] - Logística	483,05403	108,75336	0,17095	0,899	34,60	17,03	243,84
	[8] - Gompertz	690,72736	8,62312	0,07658	0,898	34,67	17,06	243,98
	[9] - Schumacher	2085,05453	59,27609		0,901	34,27	16,87	242,27
	[10] - Silva-Bailey	690,71792	-8,62322	0,92628	0,898	34,67	17,06	243,98
	[11] - Richards	793,72758	0,06004	5,58579	0,898	34,72	17,09	244,08
Copa	[1]	-97,21869	6,40647		0,729	22,65	35,34	215,03
	[2]	-75,42317	7,33725	2,03547	0,743	22,04	34,38	213,16
	[3]	-3,28018	0,00433		0,705	23,61	36,84	216,94
	[4]	0,00896	2,71502		0,760	21,30	33,23	209,93
	[5]	0,00358	2,33061	0,37752	0,702	23,73	37,02	218,20
	[6] - Weibull	31930,84543	0,00000	2,71810	0,752	21,64	33,77	211,94
	[7] - Logística	2225,19985	517,21770	0,10219	0,752	21,68	33,83	212,07
	[8] - Gompertz	17263,41209	9,04582	0,01810	0,753	21,64	33,76	211,92
	[9] - Schumacher	1084,33877	73,10606		0,751	21,70	33,85	211,18
	[10] - Silva-Bailey	2,57E-13	30,62215	1,00296	0,751	21,70	33,86	212,13
	[11] - Richards	4542790,05690	0,00065	2,73889	0,752	21,64	33,77	211,94
Total	[1]	-337,67366	24,02437		0,927	39,28	14,70	252,47
	[2]	-408,53074	20,99843	6,61730	0,938	36,18	13,54	246,88
	[3]	5,81707	0,01679		0,958	29,78	11,14	232,72
	[4]	-2,65189	2,52311		0,930	38,66	14,47	250,46
	[5]	-4,08136	1,91645	1,09150	0,956	30,42	11,38	235,09
	[6] - Weibull	893,47571	0,00002	2,94466	0,937	36,57	13,68	247,60
	[7] - Logística	731,48994	98,51006	0,15656	0,936	36,96	13,83	248,32
	[8] - Gompertz	1188,54814	7,73891	0,06401	0,937	36,53	13,67	247,53
	[9] - Schumacher	3069,87453	62,35860		0,938	36,19	13,54	245,97
	[10] - Silva-Bailey	1188,54471	-7,73892	0,93800	0,937	36,53	13,67	247,53
	[11] - Richards	1632,51732	0,04204	4,36607	0,937	36,49	13,65	247,45

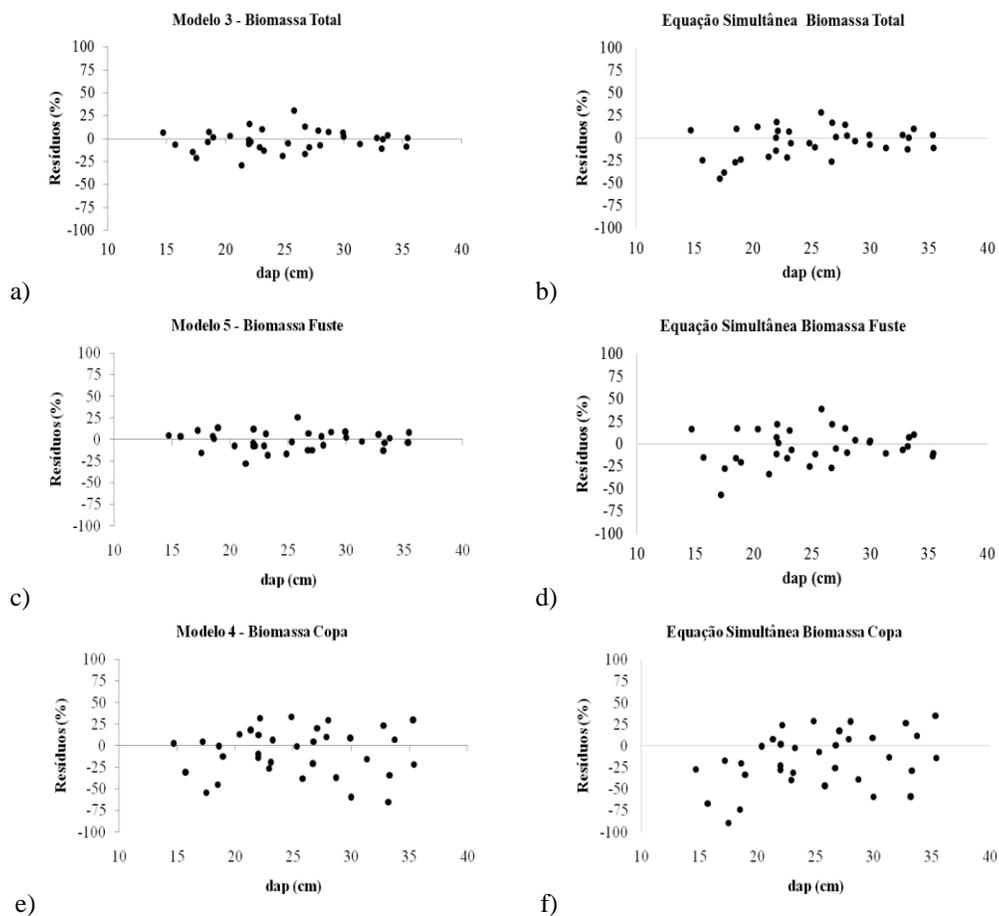


Figura 1- Análise dos resíduos das melhores opções de ajustes para as diferentes biomassas de *Cryptomeria japonica* em Rio Negro, PR.

Em estudo realizado no centro sul do estado do Paraná, só que para indivíduos de *Eucalyptus benthamii*, com idades oscilando entre 1 e 4 anos, Silva *et al.* (2004) obtiveram ajustes satisfatórios para a biomassa seca do fuste, onde o modelo selecionado foi $\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \ln(ht)$, resultando em um coeficiente de determinação de 0,997 e erro padrão da estimativa de 3,24. Schumacher *et al.* (2011), estudando biomassa em *Araucaria angustifolia*, obtiveram as melhores estimativas para biomassa seca individual total através do modelo $\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \ln(ht)$, sendo o mais preciso, com coeficiente de determinação de 0,965 e erro padrão da estimativa de 1,91 %.

Giongo *et al.* (2011), estudando a biomassa seca para *Pinus elliottii* na região de Rio Branco do Sul - PR, com idade de 23 anos, também obtiveram ajustes muito bons para a biomassa seca do fuste e biomassa seca total individual, com R^2 elevado e S_{yx} baixos. Esses autores selecionaram para a biomassa seca do fuste o modelo $Y = \beta_0 + \beta_1 (dap^2 ht)$,

que apresentou coeficiente de determinação de 0,90 e erro padrão da estimativa de 11,14. O mesmo modelo foi selecionado para representar a biomassa seca total individual, apresentando coeficiente de determinação de 0,91 e erro padrão da estimativa de 11,98, sendo o mesmo modelo selecionado para estimar a biomassa seca total individual selecionado no presente trabalho.

Barbeiro *et al.* (2009), ao estudarem equações para estimativa da biomassa individual de *Nectandra grandiflora*, no sudeste do Paraná, selecionaram o modelo $\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \ln(ht)$, para representar a biomassa individual total e biomassa do fuste, em que para a biomassa individual total obtiveram coeficiente de determinação de 0,946 e erro padrão da estimativa de 19,69 % e para a biomassa do fuste o coeficiente de determinação foi de 0,947 e erro padrão da estimativa de 21,37 %

Na tabela 6, apresentam-se os sistemas de equações ajustado pelo método SUR, os coeficientes estimados, bem como as estatísticas de ajuste obtidas na fase de ajustamento.

Tabela 6 - Resultados dos ajustes de equações simultâneas para a biomassa seca individual total e dos compartimentos fuste e copa em *Cryptomeria japonica*, em Rio Negro, PR

Modelo	β_0	β_1	$R^2_{aj.}$	S_{yx}	$S_{yx}\%$
$bsfuste = \beta_0 \cdot dap^{\beta_1} + \varepsilon$	0,10103	2,33228	0,892	35,69	17,57
$bscopa = \beta_0 \cdot dap^{\beta_1} + \varepsilon$	0,03285	2,33264	0,749	21,80	34,02
$bstotal = bsfuste + bscopa$			0,932	38,03	14,23

em que: bsfuste = biomassa seca do fuste com casca; bscopa = biomassa seca da copa; bstotal = biomassa seca total.

Nota-se que o melhor resultado obtido através do ajuste simultâneo reúne equações de simples entrada, em que somente o dap é considerado para a realização do ajuste. A partir dos resultados do ajuste simultâneo apresentados acima e através da análise gráfica da distribuição dos resíduos é possível constatar que o ajuste simultâneo não proporcionou melhoras no desempenho das equações, mas é vantajosa ao compatibilizar as estimativas de biomassa por compartimento e para o total, outra vantagem é a não necessidade de inclusão da variável altura, variável de mais difícil obtenção em campo. Essa técnica permite garantir a qualidade global da estimativa de biomassa para cada árvore, em que o resultado da somatória das equações de cada compartimento é o mesmo que da equação aplicada para o total. Desta forma, se evita distorções entre o somatório da biomassa obtida por meio das equações individuais de cada compartimento e da equação para o total, que pode acontecer no ajuste independente utilizando os modelos tradicionais. Assim, a biomassa total de cada árvore pode ser obtida pela soma das funções de cada compartimento.

No Brasil, atualmente há poucos trabalhos na literatura que utilizam o sistema de equações simultâneas para a estimativa de biomassa, porém equações simultâneas têm sido desenvolvidas para a biomassa de *Acacia mearnsii* (BEHLING *et al.*, 2012; SANQUETTA *et al.*, 2014), onde a utilização de equações simultâneas garantiu qualidade global para as estimativas de biomassa em plantios comerciais em regiões do Rio Grande do Sul, RS.

Na literatura internacional, Viana *et al.* (2013), estudando povoamentos de *Pinus pinaster* na região central de Portugal, obtiveram estatísticas de ajustamento simultâneo de boa qualidade preditiva para a biomassa aérea total. Correia *et al.* (2008) verificaram, de um modo geral, que os erros padrão diminuíram com o ajustamento simultâneo resultando por isso numa melhoria da qualidade dos modelos finais para estimativa da biomassa total e para compartimentos aéreos de *Pinus pinea*, localizados na região sul de Portugal. Equações simultâneas para predição da biomassa também vêm sendo desenvolvidas para *Quercus suber* e *Quercus ilex* (PAULO *et al.*, 2002; PAULO e TOMÉ, 2006).

Conclusões

As determinações de biomassa mostraram que o compartimento fuste foi sempre o que apresentou uma maior participação na biomassa total individual representando, em média, cerca de 76,02 % da biomassa total individual.

No que se refere às correlações entre as variáveis envolvidas na modelagem, pôde-se concluir que os valores de biomassa individual total e dos compartimentos do fuste e copa foram mais fortemente correlacionados com o dap, as variáveis dendrométricas dap e ht tiveram correlação ligeiramente aproximadas. Percebeu-se alta correspondência da biomassa aérea total com a biomassa dos compartimentos do fuste e copa, isto se deve ao caráter acumulativo dos mesmos.

Dentre os modelos tradicionais, todos os modelos para predição da biomassa ajustados apresentaram boas estatísticas de precisão, os modelos para biomassa seca total e para biomassa do fuste em função do dap e ht foram os modelos que obtiveram os ajustes mais precisos. Embora todos os modelos testados tenham apresentado bons ajustes, os modelos com melhor desempenho para a predição da biomassa seca individual total, biomassa do fuste e biomassa da copa foram os modelos 3, 5 e 4, respectivamente.

O sistema de equações para estimar a biomassa dos compartimentos de *Cryptomeria japonica*, ajustados simultaneamente, apresentaram resultados satisfatórios. A aplicação do método SUR garante as propriedades da aditividade entre os compartimentos da biomassa e a biomassa total, evitando-se distorções entre o somatório das equações individuais para cada compartimento e da equação total, como acontece com o uso de equações tradicionais. Deste modo, o ajustamento simultâneo das biomassas possibilitou a estimativa compatível das mesmas, possibilitando assim, melhores referências para um planejamento integrado dessas variáveis.

COUTINHO, V. M.; SANQUETTA, C. R.; SANQUETTA, M. N. I.; RODRIGUES, A. L.; CORTE, A. P. D. Traditional and simultaneous equations for aerial biomass compartments of *Cryptomeria japonica* (L.F.) D. DON. *Rev. Bras. Biom. Lavras*, v.35, n.1, p.58-75, 2017.

▪ **ABSTRACT:** *The aim of this paper is to develop mathematical equations for the prediction of both the total individual aerial biomass and the following compartments: stem with bark and canopy for Cryptomeria japonica (L.F.) D. DON. In addition, in order to guarantee additivity between biomass compartments, a system of apparently unrelated equations (SUR) or simultaneous equations system was fitted. Using the destructive method, 34 trees were planted and weighed from an experimental plant located in the municipality of Rio Negro, PR, Brazil. The biomass compartmentalization was performed individually, as well as its weighing. Samples*

were taken to determine the moisture fraction and then determined their dry biomass. We tested 11 traditional models that contained as independent variables the diameter at breast height (dap) and total height (ht). The double input models (d, h) were the ones that obtained the best performance for the total biomass and for the bole biomass. Among the models tested for total aerial biomass, stem biomass and canopy biomass, models 3, 4 and 5, respectively, were the most accurate. The application of the simultaneous equation adjustment method ensured the properties of the additivity between the biomass compartments and the total biomass, avoiding distortions between the sum of the individual equations for each compartment and the total equation.

- **KEYWORDS:** Simultaneous fit; tree biomass; aboveground biomass; modeling.

Referências

- BARBEIRO, L.S.S.; VIEIRA, G.; SANQUETTA, C.R.; Equações para estimativa da biomassa individual de *Nectandra grandiflora* Ness (Canela-amarela). *Floresta*, Curitiba, v.39, n.4, p.833–843, 2009.
- BEHLING, A.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; SIMON, A. A.; NUNES, G. S. Equações simultâneas para estimativa da biomassa em plantios comerciais de Acácia-Negra. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v.8, n.15, p.853, 2012.
- CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; TEDESCO, N.; DOS SANTOS, E. M. Ciclagem de nutrientes em *Acacia mearnsii* De Wild. V. Quantificação do conteúdo de nutrientes na biomassa aérea de *Acacia mearnsii* De Wild. procedência australiana. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.30, n.6, p.977-982, 2000.
- CARPANEZZI, A. A. (Coord.). *Zoneamento ecológico para plantios florestais no Estado do Paraná*. Brasília, DF: EMBRAPA-DDT; Curitiba: EMBRAPA-CNPf, 1986. 89 p. (EMBRAPA-CNPf. Documentos, 17).
- CARPANEZZI, A. A.; PEREIRA, J. C. D.; CARVALHO, P. E. C.; REIS, A.; VIEIRA, A. R. R.; ROTTA, E.; STURION, J. A.; RAUEN, M. D. E. J.; SILVEIRA, R. A. S. *Zoneamento ecológico para plantios florestais no Estado de Santa Catarina*. Curitiba: EMBRAPA-CNPf, 1988. 113 p. (EMBRAPA-CNPf. Documentos, 21).
- CARVALHO, P. E. R. Novas alternativas para reflorestamento. *Revista da Madeira*, v.11, n.60, p.66-67, 2001.
- CORREIA, A.; FAIAS, S.; TOMÉ, M.; EVANGELISTA, M.; FREIRE, J.; DE CARVALHO, P. O. Ajustamento Simultâneo de Equações de Biomassa de Pinheiro Manso no Sul de Portugal. *Silva Lusitana*, Oeiras, v.16, n.2, p.197-205, 2008.
- DOBNER JÚNIOR, M.; TRAZZI, P. A.; HIGA, A. R. Dendroecologia de um Povoamento de *Cryptomeria japonica* (L.F.) Don. com 25 Anos de Idade no Sul do Brasil. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v.24, n.2, p.413-420, 2014.
- DOBNER JÚNIOR, M.; VAGAES, T. C.; HIGA, A. R. Aproveitamento do germoplasma de *Cryptomeria japonica* da Estação Experimental de Rio Negro, PR, visando a produção de sementes. *Floresta*, Curitiba, v.43, n.3, p.363-372, 2013.
- DONG, L.; ZHANG, L.; LI, F. A compatible system of biomass equations for three conifer species in Northeast, China. *Forest Ecology and Management*, v.329, p.306-317, 2014.

GIONGO, M.; DA SILVA, D. B.; KOEHLER, H. S.; MARCHETTI, M. Inventário de biomassa em um plantio de *Pinus elliottii* Engelm aos 23 anos de idade. *J. Biotec Biodivers.* v.2, p. 81 – 86, 2011.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Em CD ou no site: www.ipcc.ch. Guia de Boas Práticas. 2006.

LAIRD, A. K. Dynamics of relative growth. *Growth, Bar Harbor*, v.29, p. 249-263, 1965.

NELDER, J.A. The fitting of a generalization of the logistic curve. *Biometrics*, v.17, n.1, p.89-110, 1961.

PAULO, J. A.; TOMÉ, J.; TOMÉ, M. Ajustamento simultâneo de equações de biomassa de azinheira. In: ACTAS DO X CONGRESSO DA SOCIEDADE PORTUGUESA DE ESTATÍSTICA. 2002, Portugal. *Anais...* Portugal: Sociedade Portuguesa de Estatística, 2002. p.501.

PAULO, J. A., TOMÉ, M. 2006. Equações para estimação do volume e biomassa de duas espécies de carvalhos: *Quercus suber* e *Quercus ilex*. Publicações GIMREF. RC1/2006. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Agronomia. Centro de Estudos Florestais. Lisboa. 21 p.

PARRESOL, B. R. Assessing Tree and Stand Biomass: A Review with Examples and Critical Comparisons, *Forest Science*, Bethesda, v.45, n.4, p.573-593, 1999.

PARRESOL, B. R. Additivity of nonlinear biomass equations, *Canadian Journal of Forest Research*, Ottawa, v.31, n.5, p.865-878, 2001.

REZENDE, D. *Seqüestro de carbono: uma experiência concreta*. Goiânia: Terra, 2000. 105 p.

REZENDE, G. C.; BARROS, N. F.; MORAES, T. S. A.; MENDES, C. J. Produção e macronutrientes em florestas de eucalipto sob duas densidades de plantio. *Revista Árvore*, Viçosa, v.7, p.165-196, 1983.

RICHARDS, J. F. A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v.10, n.2, p.290-301, 1959.

ROCHADELLI, R. *A estrutura de fixação dos átomos de carbono em reflorestamento: estudo de caso: Mimosa scabrella Bentham, Bracatinga*. 2001. 86 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

RONDON, E. V. Produção de biomassa e crescimento de árvores de *Schizolobium amazonicum* sob diferentes espaçamentos na região da mata. *Revista Árvore*, Viçosa, MG, v. 26, n. 5, p.573-576, 2002.

SALATI, E. Emissão x Seqüestro de CO₂ - uma nova oportunidade de negócios para o Brasil In: SEMINÁRIO EMISSÃO × SEQUESTRO DE CO₂: UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, 1994, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, p 15-37, 1994.

SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; MAAS, G. C. B. The role of forests in climate change. *Quebracho*, Santiago del Estero, v. 19, p.84-96, 2011.

- SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; DALLA CORTE, A. P.; SIMON, A.; PSCHEIDT, H.; RUZA, M. S.; MOCHIUTTI, S. Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 42, n. 103, p.361-370, 2014.
- SANTOS, C. B.; LONGUI, S. J.; HOPPE, J. M.; MOSCOVICH, S. A. Efeito do volume de tubetes e tipos de substratos na qualidade de mudas de *Cryptomeria japonica* (L. F.) D. Don. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v.10, n.2, p.1-15, 2000.
- SCHIKOWSKI, A. B.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R. Modelagem do crescimento e de biomassa individual de Pinus. *Revista Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v.33, n.75, p.269-278, 2013.
- SCHUMACHER, F. X. A new growth curve and its application to timber yield studies. *Journal of Forestry*, Washington, v.37, p.819-820, 1939.
- SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F. N.; LOPES, V. G.; VIEIRA, M. Produção de biomassa no corte raso em plantio de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze de 27 anos de idade em Quedas do Iguaçu, PR. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v.21, n.1, p.53 – 62, 2011.
- SHIMIZU, J. Y.; MAIOCHI, R. A. Criptoméria como espécie alternativa para produção de madeira do Paraná. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, n.54, p.63-70, 2007.
- SILVA, H. D.; FERREIRA, C. A.; CORRÊA, R. S.; BELLOTE, A. F. J.; TUSSOLINI, E. L. Alocação de biomassa e ajuste de equações para estimativa de biomassa em compartimentos aéreos de *Eucalyptus benthamii*. *Boletim de Pesquisa Florestal*, Colombo, n.49, p.89 – 95, 2004.
- SILVA, J. A. A. *Dynamics of stand structure in fertilized slash pine plantations*. Athens. 1986. 133f. Thesis (Doctor of Philosophy) - University of Georgia, 1986.
- VALERI, S. V. *Exportação de biomassa e nutrientes de povoamentos de Pinus taeda L., desbastados em diferentes idades*. 1988. 164f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1988.
- VALERIO, A. F.; WATZLAWICK, L. F.; DOS SANTOS, R. T.; SILVESTRE, R.; KOEHLER, H. S. Ajuste de modelos matemáticos para estimativa de biomassa nos distintos componentes de uva do Japão (*Hovenia dulcis* Thunb.). *Revista Ambiente*. Guarapuava, v.3 n.3, p.325-336, 2007.
- VIANA, H.; MARQUES, C. P.; FONSECA, T. Predição da Biomassa Aérea da *Pinus pinaster* Aiton por um Sistema de Equações Aditivas Integrado no Simulador Open Source ModisPinaster. *Silva Lusitana*, Oeiras, Portugal. n. especial; p.77-86, 2013.
- WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; SANQUETA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W. Teores de carbono em espécies da floresta ombrófila mista. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO SOBRE FIXAÇÃO DE CARBONO, 2004, Curitiba. *Anais...* Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2004. p. 95-109.
- WEIBULL, W. A. A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics*, New York, v.18, n.1, p.293-297, 1951.
- WITSCHORECK, R. *Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de Pinus taeda L. de 17 anos de idade no município de Cambará do Sul – RS*. 2008. 80 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

ZELLNER, A. An efficient method of estimating seemingly unrelated regressions and tests for aggregation bias. *Journal of the American Statistical Association*, v.57, n.298, p.348-368, 1962.

ZHAO, D.; KANE, M.; MARKEWITZ, D.; TESKEY, R.; CLUTTER, M. Additive tree biomass equations for mid-rotation Loblolly Pine plantations. *Forest Science*, Bethesda, v.61, n.4, p. 613-623, 2015.

Recebido em 17.11.2015

Aprovado após revisão em 23.09.2016