

Equações Volumétricas e Fator de Forma e de Casca para Florestas Secundárias do Litoral de Santa Catarina

Jean Correia¹, Alfredo Fantini¹, Geferson Piazza¹

¹Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis/SC, Brasil

RESUMO

As florestas secundárias, predominantes em Santa Catarina, apresentam alto potencial para produção sustentável de madeira, entretanto faltam informações para estimar sua produtividade. Este estudo teve o objetivo de gerar equações de volumes de fuste e total (incluindo galhos), além dos fatores de forma e de casca, para florestas secundárias da Floresta Ombrófila Densa do Estado. Foram cubadas 187 árvores pelo método de Smalian e testados seis modelos volumétricos, utilizando-se análise de regressão, todos com resultados satisfatórios, destacando-se o de Schumacher-Hall (linearizado). As equações recomendadas para estimar o volume total com e sem casca são, respectivamente, $\ln(vt) = -10,045586 + 2,349493 \cdot \ln(dap) + 0,640598 \cdot \ln(ht)$ e $\ln(vt) = -10,206982 + 2,348857 \cdot \ln(dap) + 0,634736 \cdot \ln(ht)$, e para os volumes do fuste com e sem casca, respectivamente, $\ln(vf) = -9,285656 + 2,100113 \cdot \ln(dap) + 0,665269 \cdot \ln(hf)$ e $\ln(vf) = -9,504432 + 2,140098 \cdot \ln(dap) + 0,637631 \cdot \ln(hf)$. O fator de forma normal estimado é 0,8027, enquanto o fator de casca é 0,9301.

Palavras-chave: volumetria, Mata Atlântica, dendrometria e inventário florestal.

Volume Equations and Form and Bark Factors for Coastal Secondary Forests of Santa Catarina State

ABSTRACT

Secondary forests prevalent in Santa Catarina State present high potential for sustainable production of timber. However, we lack information to estimate their productivity. This study aimed at generating equations to estimate the stem volume and total volume (including branches), in addition to the form and bark factors, for secondary forests of the Atlantic rainforest in the State. We scaled 187 trees by Smalian method and tested six volumetric models through regression analysis, all with satisfactory results, notably the Schumacher-hall (linearized). The recommended equations to estimate the total volume with and without bark are, respectively, $\ln(vt) = -10.045586 + 2.349493 \cdot \ln(dap) + 0.640598 \cdot \ln(ht)$ and $\ln(vt) = -10.206982 + 2.348857 \cdot \ln(dap) + 0.634736 \cdot \ln(ht)$, and to estimate the stem volume with and without bark, respectively, $\ln(vf) = -9.285656 + 2.100113 \cdot \ln(dap) + 0.665269 \cdot \ln(hf)$ and $\ln(vf) = -9.504432 + 2.140098 \cdot \ln(dap) + 0.637631 \cdot \ln(hf)$. The estimated form factor is 0.8027, while the bark factor is 0.9301.

Keywords: volume modeling, Atlantic forest, dendrometry and forest inventory.

1. INTRODUÇÃO

O histórico de má utilização dos recursos florestais e a substituição das florestas por outros usos da terra na região da Mata Atlântica são bem documentados (Dean, 1996), mas essa compreensão não tem evitado que o bioma continue perdendo grande parte da cobertura vegetal remanescente, como revelam dados recentes sobre o desmatamento (Fundação SOS Mata Atlântica, 2013). Em parte, o fenômeno pode ser explicado pela forte restrição ao manejo das florestas imposta pela “Lei da Mata Atlântica”, que levou muitos proprietários rurais a converter suas terras em plantios homogêneos de espécies florestais exóticas, com consequente perda de biodiversidade (Siminski & Fantini, 2010; Siminski et al., 2011b). A estratégia de restrição do uso dos recursos vem na contramão de forte movimento em favor da conservação pelo uso, que ganha espaço como proposta de conservação de florestas tropicais em todo o mundo (Redford & Richter, 1999; Barrance et al., 2009). A conservação pelo uso seria conveniente na região do bioma Mata Atlântica, onde predominam os pequenos agricultores, os quais poderiam manejar suas florestas secundárias como fonte alternativa de renda. Em Santa Catarina, estado com 29% de cobertura florestal original, esse tipo de ecossistema é predominante (Vibrans et al., 2012a), havendo florestas jovens, com alta produtividade e potencial para produzir madeiras de boa qualidade, além de outros produtos florestais (Fantini & Siminski, 2011).

A realização desse potencial depende de planejamento adequado. A determinação do volume de estoque de madeiras comerciais, por exemplo, é uma das informações básicas para planejar o manejo, visando a um correto ordenamento e dimensionamento da produção em níveis sustentáveis. O custo de obtenção dessa variável em florestas nativas é alto, mas pode ser reduzido com o uso de modelos matemáticos que permitem estimá-la, medindo-se variáveis de mais simples obtenção, como o diâmetro à altura do peito (DAP) (Silva & Paula, 1979; Finger, 1992).

A maioria dos estudos de volumetria de espécies nativas se restringe à Amazônia e ao Cerrado, pela possibilidade de manejo nesses biomas. Os estudos relacionados à Mata Atlântica estão restritos ao estado de São Paulo (SP) (em geral, florestas plantadas), e alguns relatos são descritos para o Paraná (PR), Rio Grande do Sul (RS) e Espírito Santo (ES). Destacam-se

os relacionados à Floresta Ombrófila Densa (FOD) no ES (Jorge, 1982; Souza & Jesus, 1991; Chichorro et al., 2003) e em SP (Nunes, 2013). Alguns outros exemplos para a Mata Atlântica são relatados por Scolforo et al. (1994) em estudos de Floresta Estacional Semidecidual (FES) de MG, Santos et al. (2009) para Floresta Ombrófila Mista (FOM) no PR, Borsoi (2005) para FOM do RS e por Durlo & Denardi (2009) para *Cabralea canjerana* em Floresta Estacional Decidual (FED) do RS.

Para Santa Catarina, há poucas publicações, sendo o mais recente estudo publicado no Inventário Florístico Florestal (Vibrans et al., 2012b) referente às principais formações do estado. Para a FOD, os poucos relatos são de estudos específicos para *Miconia cinnamomifolia* (Schuch et al., 2008) e *Tibouchina pulchra* (Oller, 2011), além de equações gerais (Silveira, 2008).

Nesse contexto, o presente estudo teve o objetivo de gerar equações de volumes de fuste e total das árvores, com e sem casca, além de fatores de forma e de casca, para florestas secundárias da FOD de Santa Catarina (SC). Os dados foram coletados de árvores abatidas em um projeto de pesquisa sobre o manejo de florestas secundárias. Trata-se, portanto, de uma oportunidade rara de coleta de dados com grande confiabilidade.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo e coleta de dados

A floresta estudada possui 42 ha de extensão e localiza-se no município de Guaramirim (SC) (Figura 1), local de execução de um projeto de pesquisa em manejo de florestas secundárias para produção de madeira, uma parceria entre universidades e a Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina (Fatma).

A formação florestal original do local é do tipo Floresta Ombrófila Densa (Klein, 1978), classificada como submontana conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2012). O clima da região é do Tipo Cfa - temperado úmido -, com verões quentes e sem estação seca definida, segundo a classificação de Köppen. O relevo é acidentado, com declividades entre 10% e 40%, e a altitude média é de 300 metros acima do nível do mar.

Foram cubadas 187 árvores de 40 diferentes espécies, com DAP entre 5,3 e 55,4 cm. O conjunto de árvores cubadas é típico das florestas secundárias da região, tanto em termos de diversidade de espécies como da

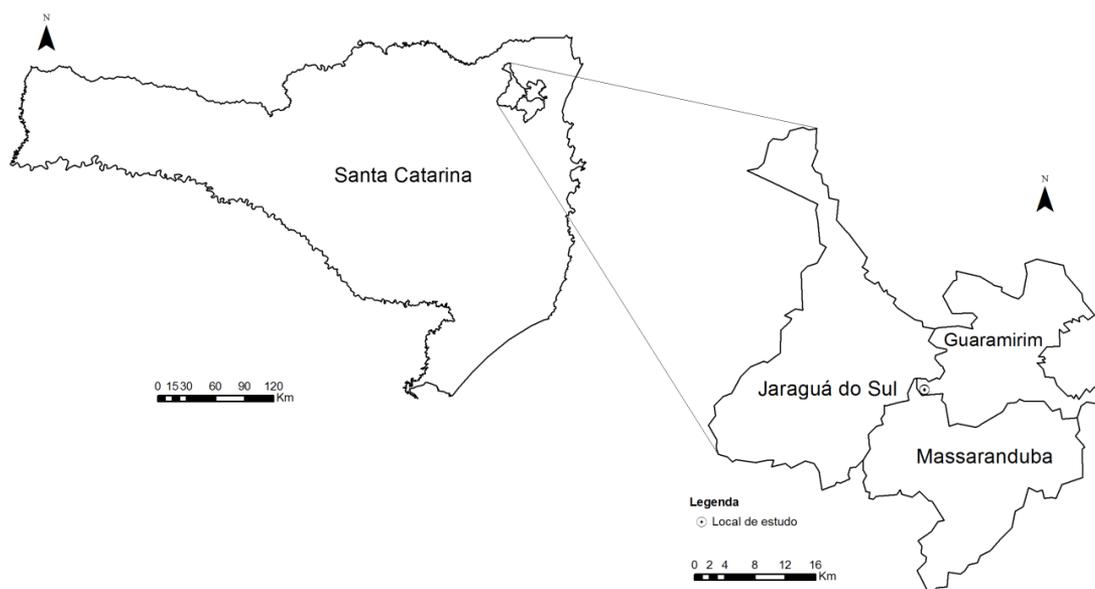


Figura 1. Localização da propriedade em estudo, no município de Guaramirim, na região norte do estado de Santa Catarina, Brasil.

Figure 1. Location of study site, in municipality of Guaramirim, north-eastern Santa Catarina state, Brazil.

estrutura da floresta, sendo encontrado em estudos realizados anteriormente (ex.: Siminski et al., 2004, 2011a). Após o abate de cada árvore, utilizou-se uma trena para medir a altura de fuste (H_f), definida como a altura até o início da copa (primeira bifurcação), e a altura total (H_t). Para determinar o volume do fuste de cada árvore, além da H_f , foram definidas secções delimitadas pelas alturas de 0,1 m, 0,3 m, 0,7 m, 1,0 m, 1,3 m, 2,0 m e, subsequentemente, a cada 1,0 m até a extremidade do fuste, sendo essa delimitada por bifurcações. Em cada uma das extremidades das secções, foram medidos o maior e o menor diâmetro. A partir da primeira bifurcação da árvore, foram medidos o maior e o menor diâmetro de cada galho, a cada 1,0 m, até o diâmetro limite de 5 cm. A cada ponto de medição do diâmetro do tronco e dos galhos, efetuou-se uma medida da espessura de casca simples (E_c) com um paquímetro digital. De todas as árvores foram coletados materiais vegetativos ou férteis, caso presentes, para identificar o nível de espécie. A nomenclatura botânica foi atualizada conforme a Reflora (2015).

2.2. Análise dos dados

As árvores amostradas foram divididas em classes diamétricas com intervalo de 5 cm, a fim de se observar a distribuição dos dados. Para estimar o volume de cada

secção do tronco e dos galhos, utilizou-se o método de cálculo do volume rigoroso de Smalian, conforme descrição de Finger (1992), por ser o mais aplicado em florestas nativas. De posse desses resultados, foram calculados para cada árvore: volume total com casca (VTCC), volume total sem casca (VTSC), volume de fuste com casca (VFCC) e volume de fuste sem casca (VFSC).

Os volumes das árvores individuais foram, então, submetidos à análise de regressão para testar o seu ajuste a seis modelos florestais clássicos de volumetria (Tabela 1), tendo como variáveis predictoras o DAP, a H_f e a H_t .

Nos modelos logarítmicos, utilizou-se o fator de Meyer para corrigir as estimativas (Urbano, 2007) e também para recalcular os resíduos. Obteve-se o fator de Meyer a partir da seguinte equação (Urbano, 2007):

$$\text{Fator de Meyer} = e^{0,5 \cdot QM_{\text{resíduo}}} \quad (1)$$

Em que $e = 2,718282$ e $QM_{\text{resíduo}}$ é o quadrado médio do resíduo.

Para selecionar a melhor equação, utilizaram-se a análise de variância da regressão e o teste t de Student comparando o valor de cada coeficiente a zero (Soares et al., 2011). Em seguida, foram analisados o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), o erro-padrão da

Tabela 1. Modelos testados para a estimativa do volume.**Table 1.** Tested models of the volume adjustments.

Modelos	Autores	Modelo matemático
1	HUSCH	$\ln(v) = b_0 + b_1 \ln(dap) + \varepsilon$
2	SPURR	$v = b_0 + b_1 \cdot dap^{2 \cdot h} + \varepsilon$
3	SCHUMACHER-HALL (linearizado)	$\ln(v) = b_0 + b_1 \ln(dap) + b_2 \ln(h) + \varepsilon$
4	MEYER	$v = b_0 + b_1 \cdot dap + b_2 \cdot dap^2 + b_3 \cdot dap \cdot h + b_4 \cdot dap^2 \cdot h + \varepsilon$
5	STOATE	$v = b_0 + b_1 \cdot dap^2 + b_2 \cdot dap^2 \cdot h + b_3 \cdot h + \varepsilon$
6	NASLUND	$v = b_0 + b_1 \cdot dap^2 + b_2 \cdot dap^2 \cdot h + b_3 \cdot dap \cdot h^2 + b_4 \cdot h^2 + \varepsilon$

\ln : logaritmo natural; v : volume (m^3); dap : diâmetro à altura do peito (cm); h : altura (m); b_0, b_1, b_2, b_3 e b_4 : coeficientes dos modelos; ε : erro aleatório.

estimativa absoluto (Syx) e em porcentagem ($Syx[\%]$), o critério de informação de Akaike (AIC) e o critério de informação bayesiano (BIC), seguindo o *ranking* adaptado de Bartoszeck (2000). Na etapa seguinte, realizou-se análise gráfica dos resíduos em forma percentual (Silva & Paula, 1979; Soares et al., 2011).

O R^2_{aj} possibilita mensurar o grau de ajuste ou capacidade de explicação de um modelo, por meio da medida da proporção total da variação em relação à média (Schneider et al., 2009). Em razão de os modelos testados apresentarem números diferentes de coeficientes, é necessário ajustar o R^2 para que as comparações sejam adequadas, resultando na seguinte expressão (Neter et al., 1996):

$$R^2_{aj} = 1 - (n-1/n-p-1) \cdot (SQ_{residuo}/SQ_{total}) \quad (2)$$

Em que R^2_{aj} é o coeficiente de determinação ajustado, n , o número de observações, p , o número de variáveis independentes do respectivo modelo, $SQ_{residuo}$, a soma de quadrados do resíduo e SQ_{total} , a soma de quadrados total.

O erro-padrão da estimativa (Syx) indica o erro médio associado ao uso da equação, podendo ser obtido da seguinte maneira (Soares et al., 2011):

$$Syx = \pm \sqrt{QM_{residuo}} \quad (3)$$

Em que $QM_{residuo}$ é o quadrado médio do resíduo.

Na forma percentual ($Syx(\%)$), o erro-padrão da estimativa foi obtido pela seguinte equação:

$$Syx(\%) = (Syx/\bar{Y}) \cdot 100 \quad (4)$$

Em que Syx é o erro-padrão da estimativa e \bar{Y} , o valor médio da variável dependente.

AIC demonstra a distância geral relativa entre o modelo gerado e o modelo real, sendo, portanto,

melhor quanto menor for seu valor, o qual foi obtido com a seguinte equação (Vismara, 2009):

$$AIC = -2 \ln(mv) + 2p \quad (5)$$

Em que mv é o valor de máxima verossimilhança apresentada pelo modelo e p , o número de parâmetros do modelo.

BIC foi desenvolvido de modo a complementar as deficiências do AIC , sendo, de mesma forma, melhor quanto menor for o seu valor (Schwarz, 1978), o qual foi definido como (Carvalho, 2013):

$$BIC = -2 \ln(mv) + \ln(n) \cdot p \quad (6)$$

Em que mv é o valor de máxima verossimilhança apresentada pelo modelo, p , o número de parâmetros do modelo e n , o número de observações.

A análise gráfica dos resíduos é muito relevante, pois possibilita identificar problemas como a heterocedasticidade de variâncias mesmo quando a equação demonstra ser precisa (Soares et al., 2011). Além disso, permite detectar tendências resultantes do uso da equação. Os resíduos foram calculados de forma percentual, de acordo com a seguinte equação:

$$Res(\%) = \frac{Vest - Vobs}{Vobs} \cdot 100 \quad (7)$$

Em que $Res(\%)$ é o resíduo percentual, $Vest$, o valor estimado e $Vobs$, o valor observado.

O fator de forma reduz o volume do cilindro formado pela área basal e altura para o volume verdadeiro representado pelo sólido de revolução, podendo ser calculado por diversos métodos (Finger, 1992). De acordo com Silva & Paula (1979), o fator de forma normal ($f_{1,30}$) pode ser obtido pela relação entre o volume rigoroso da árvore e o volume do cilindro

obtido a partir da área basal da árvore a 1,30 m do solo e da altura do fuste, resumindo-se na seguinte equação (Soares et al., 2011):

$$f_{1,30} = \frac{V_{\text{rigoroso}}}{V_{\text{cilindro}}} \tag{8}$$

Em que V_{rigoroso} é o volume obtido a partir da cubagem rigorosa e V_{cilindro} , o volume calculado a partir da área basal a 1,30 m do solo e da Hf.

O volume de cada árvore estimado pelo fator de forma foi comparado ao volume real obtido pela cubagem e também ao volume estimado pelo uso da equação de volume correspondente (adaptado de Jorge, 1982; Souza & Jesus, 1991; Scolforo et al., 1994). Essa comparação, feita por meio de análise de variância de fator único, é útil para testar a eficiência do uso do fator de forma.

A determinação da espessura de casca foi realizada nas mesmas posições determinadas para a cubagem rigorosa, por meio da diferença entre as medições de diâmetro com casca e a dupla espessura da casca. O fator de casca médio (K) pode ser obtido para uma série de dados a partir da seguinte equação (Husch et al., 1982):

$$K = \frac{\sum d_{sc}}{\sum d_{cc}} \tag{9}$$

Em que d_{sc} é o diâmetro sem casca e d_{cc} , o diâmetro com casca.

A partir das derivações dessa equação, é possível obter diversas informações, como volume sem casca, volume de casca, espessura de casca, entre outras muito úteis ao manejo florestal. De forma similar à análise realizada em relação ao fator de forma, utilizou-se análise de variância de fator único para testar se existem diferenças significativas entre o volume real de cada árvore e o volume estimado pelo fator de casca e pelo modelo correspondente (adaptado de Jorge, 1982; Souza & Jesus, 1991; Scolforo et al., 1994).

Mais detalhes sobre o histórico da área de estudo, metodologia de coleta e análise de dados, assim como informações na íntegra de todas as equações geradas, estão descritos em Correia (2015).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram amostradas 187 árvores, pertencentes a 40 espécies, detalhadas na Tabela 2, com seus respectivos diâmetros médios.

A distribuição nas classes diamétricas (Figura 2) se aproxima da forma de J-invertido, típica de florestas secundárias da região, segundo Siminski et al. (2004, 2011a). As estatísticas descritivas (Tabela 3) apresentam grande variabilidade, principalmente dos volumes, refletindo uma característica de florestas nativas.

Tabela 2. Número de árvores amostradas por espécie (Na) com os valores de DAP médio.
Table 2. Number of trees sampled by specie (Na), with their average DBH.

Espécie	Nome popular	Na	DAP
<i>Hyeronima alchorneoides</i> Allemão	Licurana ou Urucurana	35	25,7
<i>Miconia cinnamomifolia</i> (DC.) Naudin	Jacatirão	19	26,3
<i>Alchornea triplinervia</i> (Spreng.) Müll.Arg.	Tanheiro	12	21,6
<i>Allophylus petiolulatus</i> Radlk.	Chal-chal	12	9,3
<i>Annona neosericea</i> H. Rainer	Cortiça	12	15,4
<i>Clusia criuva</i> Cambess.	Figueirinha	7	19,0
<i>Guapira opposita</i> (Vell.) Reitz	Maria-mole	7	16,5
<i>Matayba intermedia</i> Radlk.	Camboatá	7	18,3
<i>Cupania oblongifolia</i> Mart.	Miguel-pintado	6	14,5
<i>Nectandra membranacea</i> (Sw.) Griseb.	Canela-branca	6	29,0
<i>Virola bicuhyba</i> (Schott ex Spreng.) Warb.	Bocuba ou virola	6	26,2
<i>Nectandra oppositifolia</i> Nees	Canela-garuva	5	29,7
<i>Casearia decandra</i> Jacq.	Cafezeiro	4	10,8
<i>Citharexylum myrianthum</i> Cham.	Tucaneira	4	29,7
<i>Miconia cabucu</i> Hoehne	Pau-ferro	4	15,2
<i>Myrcia spectabilis</i> DC.	Guamirim	4	6,9
Demais espécies (24)	-	37	19,2
Total		187	20,7

A dispersão dos volumes em relação ao DAP (Figura 3) apresenta tendência exponencial tanto para valores com casca quanto sem casca.

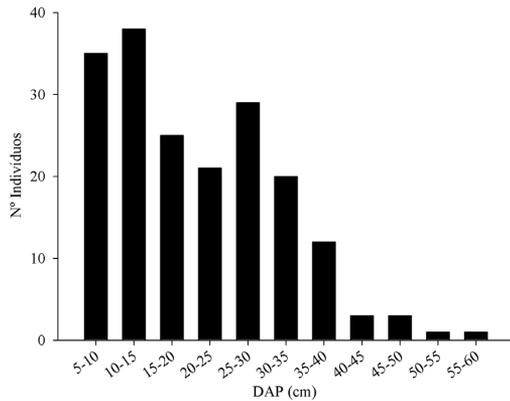


Figura 2. Distribuição do número de árvores amostradas por classe diamétrica.

Figure 2. Distribution of the number of sampled trees by diameter class.

3.1. Modelos de volume total

Todos os modelos testados apresentaram alto R^2_{aj} e baixos valores de $Syx(\%)$ e ambos os valores dessas estatísticas em todos os modelos foram semelhantes entre si (Tabela 4). Segundo esses critérios de avaliação, tanto os modelos com casca quanto os sem casca seriam adequados para estimar os volumes correspondentes. Diferenças mais evidentes foram obtidas nas avaliações dos modelos usando como critérios AIC e BIC , que revelam superioridade dos modelos 1 e 3. Com base no *ranking* dessas estatísticas, tais modelos foram os melhores para VTCC e o modelo 1 foi o melhor para VTSC, porém muito próximo ao modelo 3. Como o modelo 1 se refere ao de Husch e o modelo 3, ao de Schumacher-Hall (linearizado), pode-se concluir previamente que houve melhor ajuste dos dados aos modelos logarítmicos (variáveis preditoras e respostas transformadas). Tanto para o volume com casca quanto para o sem casca, os modelos 1 e 3 apresentaram todos os coeficientes significativos (Tabela 5) e a escolha

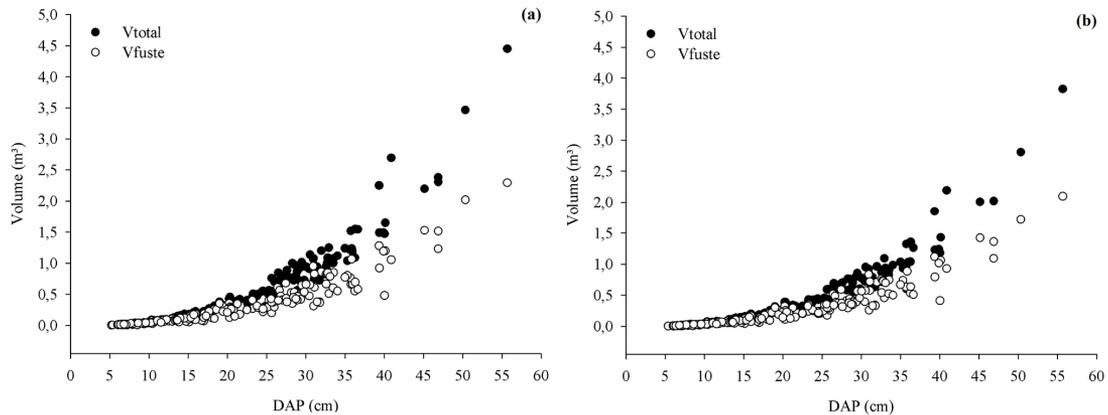


Figura 3. Dispersão dos volumes com casca (a) e sem casca (b) em função do diâmetro à altura do peito (DAP).

Figure 3. Dispersion of volume with bark (a) and without bark (b) as a function of the Diameter at Breast Height (DBH).

Tabela 3. Estatísticas descritivas para as árvores cubadas.

Table 3. Descriptive statistics for the scaled trees.

Estatística	DAP (cm)	Ht (m)	Hf (m)	Ec (mm)	VFCC (m³)	VTCC (m³)	VFSC (m³)	VTSC (m³)
Mediana	19,1	16,1	8,0	6,00	0,2160	0,2795	0,1907	0,2409
Média	20,7	15,9	8,7	6,49	0,3236	0,5142	0,2834	0,4352
Variância	115,8	26,3	14,6	9,41	0,1369	0,4099	0,1077	0,2941
Desvio-padrão	10,8	5,1	3,8	3,07	0,3700	0,6402	0,3281	0,5423
Coefficiente de variação (%)	52,2	32,1	43,7	47,3	114,3	124,5	115,8	124,6

Tabela 4. Critérios de seleção dos modelos de volume avaliados.**Table 4.** Selection criteria of the volume models evaluated.

Volume	Modelo	Syx	Syx (%)	C*	R ² _{aj.}	C*	AIC	C*	BIC	C*	Rank.
Total com casca	1	0,1518	29,5	6	0,97	2	16,79	1	26,49	1	10
	2	0,1406	27,3	4	0,95	4	-198,35	3	-188,66	3	14
	3	0,1483	28,8	5	0,98	1	-41,24	2	-28,31	2	10
	4	0,1276	24,8	2	0,96	3	-232,52	5	-213,13	5	15
	5	0,1291	25,1	3	0,96	3	-229,11	4	-212,95	4	14
	6	0,1247	24,3	1	0,96	3	-240,89	6	-221,50	6	16
Total sem casca	1	0,1141	26,2	6	0,98	1	2,38	1	12,05	1	9
	2	0,1102	25,3	4	0,96	3	-287,10	3	-277,44	3	13
	3	0,1118	25,7	5	0,98	1	-57,04	2	-44,16	2	10
	4	0,0990	22,7	2	0,97	2	-323,76	5	-304,44	5	14
	5	0,1008	23,2	3	0,97	2	-318,21	4	-302,10	4	13
	6	0,0967	22,2	1	0,97	2	-332,61	6	-313,29	6	15
Fuste com casca	1	0,1142	35,3	6	0,95	4	105,62	1	115,31	1	12
	2	0,0768	23,7	5	0,96	3	-425,19	3	-415,50	3	14
	3	0,0507	15,7	2	0,99	1	-196,64	2	-183,72	2	7
	4	0,0527	16,3	3	0,98	2	-563,02	5	-543,64	5	15
	5	0,0543	16,8	4	0,98	2	-552,79	4	-536,64	4	14
	6	0,0483	14,9	1	0,98	2	-595,48	6	-576,09	6	15
Fuste sem casca	1	0,0959	33,8	6	0,95	3	95,75	1	105,41	1	11
	2	0,0728	25,7	5	0,95	3	-440,22	3	-430,56	3	14
	3	0,0468	16,5	2	0,99	1	-166,95	2	-154,06	2	7
	4	0,0489	17,3	3	0,98	2	-584,78	5	-565,45	5	15
	5	0,0516	18,2	4	0,98	2	-565,55	4	-549,44	4	14
	6	0,0445	15,7	1	0,98	2	-619,38	6	-600,06	6	15

*C: classificação do modelo no critério avaliado. Em negrito, os modelos de destaque.

do melhor entre eles se baseou, então, na análise dos resíduos do modelo ajustado (Figura 4).

Tanto no modelo 1 quanto no modelo 3, a maioria dos resíduos se apresentou bem distribuída em relação às classes diamétricas, estando concentrados entre -40% e 40% (Figura 4a, b). Há tendência de superestimar o volume nas classes de diâmetro inferiores (DAP < 30 cm) em ambos os modelos, com resíduos alcançando valores próximos a 120%. No modelo 3 (Figura 4b), há menos ocorrências de superestimação do volume nas classes de menor DAP, sendo, por isso, superior ao modelo 1 para prever valores de VTCC, resultando na equação em destaque na Tabela 5.

Comportamento similar foi observado para os modelos de estimativa do volume total sem casca (Figura 4c, d) e, novamente, o modelo 3 apresentou menor número de casos de superestimativa do volume, sendo, assim, o recomendado (em destaque na Tabela 5).

Em um dos poucos estudos que relatam descrições de modelos de volume total com casca (até o limite de 5 cm de diâmetro, incluindo galhos) para espécies nativas da FOD de SP, Nunes (2013) obteve também um bom ajuste, com $R^2_{aj} = 0,97$, valor próximo ao verificado no presente estudo. No caso de modelos de VTSC, não foram encontrados estudos similares que possibilitassem comparações.

3.2. Modelos de volume de fuste

Em relação ao volume do fuste com casca, também houve bom ajuste dos dados aos modelos testados, com baixos valores de Syx(%) e altos valores de R^2_{aj} (Tabela 4). Novamente, destacou-se o modelo 3, com bons valores de AIC e BIC. Os resultados para o volume do fuste sem casca foram similares, com bons ajustes, particularmente para o modelo 3. Todos os coeficientes foram significativos para o modelo 3 em ambos os volumes (Tabela 5). Os resíduos do modelo 3

Tabela 5. Coeficientes dos modelos de volume avaliados.**Table 5.** Coefficients for the volume models evaluated.

Volume	Modelo	b0	b1	b2	b3	b4
Total com casca	1	-9,353161	2,710278	-	-	-
	2	0,010669 ^{NS}	0,000047	-	-	-
	3	-10,045586	2,349493	0,640598	-	-
	4	0,020121 ^{NS}	-0,002416 ^{NS}	0,000696	-0,000450 ^{NS}	0,000031
	5	0,049422 ^{NS}	0,000497	0,00003	-0,008108	-
	6	-0,045741 ^{NS}	0,000191 ^{NS}	0,000068	-0,000064	0,000680 ^{NS}
Total sem casca	1	-9,495131	2,698192	-	-	-
	2	0,003505 ^{NS}	0,00004	-	-	-
	3	-10,206982	2,348857	0,634736	-	-
	4	0,033057 ^{NS}	-0,004325 ^{NS}	0,000613	-0,000350 ^{NS}	0,000027
	5	0,049941 ^{NS}	0,000382	0,000027	-0,007538	-
	6	-0,038219 ^{NS}	0,000118 ^{NS}	0,00006	-0,000055	0,000576
Fuste com casca	1	-8,839886	2,419584	-	-	-
	2	0,01876	0,000056	-	-	-
	3	-9,285656	2,100113	0,665269	-	-
	4	0,043718 ^{NS}	-0,008695	0,000467	0,000304 ^{NS}	0,000027
	5	-0,010852 ^{NS}	0,000252	0,000037	-0,000647 ^{NS}	-
	6	-0,018057	0,000118	0,000065	-0,000075	0,000947
Fuste sem casca	1	-9,029642	2,431297	-	-	-
	2	0,011545 ^{NS}	0,000049	-	-	-
	3	-9,504432	2,140098	0,637631	-	-
	4	0,053711	-0,009812	0,000471	0,000259 ^{NS}	0,000022
	5	-0,006918 ^{NS}	0,000226	0,000033	-0,001835 ^{NS}	-
	6	-0,019814	0,000089	0,000061	-0,000077	0,000929

^{NS} Coeficiente não significativo pelo teste t a um nível de probabilidade de 5%. b0, b1, b2, b3 e b4 se referem aos coeficientes dos modelos. Em negrito, os modelos selecionados.

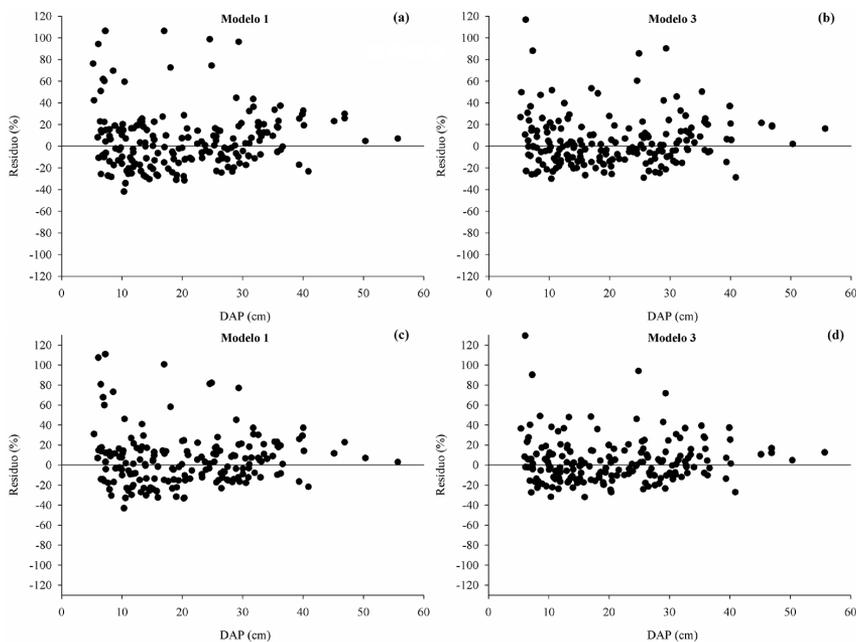


Figura 4. Resíduos percentuais dos modelo 1 (a) e 3 (b) para estimar o volume total com casca e dos modelos 1 (c) e 3 (d) para estimar o volume total sem casca em função do DAP.

Figure 4. Percent residuals of Model 1 (a) and Model 3 (b) for the estimation of the total volume with bark, and of Model 1 (c) and Model 3 (d) for the estimation of the total volume without bark, as a function of the DBH.

para o volume de fuste com casca se mostraram bem distribuídos, com valores entre -20% e 40% (Figura 5a), resultando, portanto, na recomendação desse modelo para a estimativa proposta (Tabela 5).

Os resíduos do modelo 3 ajustado para estimativa do volume do fuste sem casca apresentaram comportamento similar (Figura 5b), sendo, novamente, a equação recomendada para esse propósito (Tabela 5).

Em pesquisas para FOD do ES, Jorge (1982) também obteve o modelo de Schumacher-Hall (linearizado) entre os de melhor ajuste para volume comercial com casca, com valores de R^2_{aj} acima de 0,90, $Syx(\%) = 12\%$, inferior ao encontrado neste estudo, e com resíduos distribuídos de forma próxima, entre -30 e 30%. Chichorro et al. (2003) ajustaram o modelo de Schumacher-Hall (linearizado) para esse mesmo tipo florestal do ES e obtiveram $R^2_{aj} = 0,98$. De forma similar, em estudos de FOD do ES, Souza & Jesus (1991) obtiveram o modelo de Schumacher-Hall (linearizado) como o mais adequado, embora os autores estivessem trabalhando com modelos de espécies individuais. Vibrans et al. (2012b) também encontraram o modelo de Schumacher-Hall (linearizado e adaptado) como o mais adequado para estimativas de VFCC para a FOD de SC, com $R^2_{aj} = 0,93$ e $Syx(\%) = 2,19\%$. Da mesma forma, Silveira (2008) obteve bons ajustes para modelos de volume comercial com casca em FOD de SC, com $R^2_{aj} = 0,97$ e $Syx(\%)$ de aproximadamente 13%, porém com modelo não logarítmico (Stoate).

Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo corroboram os poucos relatos encontrados na literatura, sendo um indicativo da qualidade das equações ante a escassez de literatura para comparações. Salienta-se, ainda, a precisão dos dados coletados neste estudo, cujas fontes de erros foram reduzidas por conta de serem utilizadas árvores abatidas.

3.3. Fator de forma

O fator de forma é uma informação útil em avaliações expeditas de volume aproveitável de árvores para produção de madeira serrada, e não havia estudo para essa variável para florestas secundárias da FOD. O cálculo do fator forma normal médio ($f_{1,3}$) resultou no valor de 0,8027. Outros estudos relatam um fator de forma de 0,77 para a FOM do RS (Borsoi, 2005) e de 0,827 para a FES de Minas Gerais (Scolforo et al., 1994). Outros estudos foram feitos para espécies individualmente: Schuch et al. (2008), em SC, que estimaram fator de forma de 0,92 para *M. cinnamomifolia*; Souza & Jesus (1991), que relataram fator de forma, respectivamente, de 0,6293, 0,6137, 0,7027 e 0,6792 para *Cordia trichotoma*, *Cariniana legalis*, *Bowdichia virgilioides* e *Joannesia princeps*, no ES, e Durló & Denardi (2009), que estimaram fator de forma de 0,84 para *Cabralea canjerana* na FED do RS. Mesmo com diferenças na metodologia utilizada, tais resultados denotam, como esperado para espécies nativas, grande variabilidade dos valores de fatores de forma.

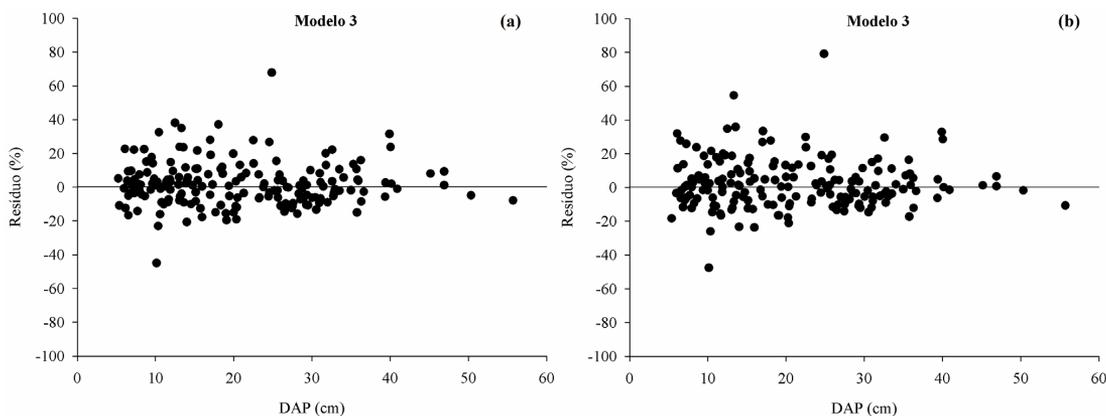


Figura 5. Resíduos percentuais do modelo 3 para estimar os volumes de fuste com casca (a) e sem casca (b) em função do DAP.

Figure 5. Percent residuals of Model 3 for the estimation of the stem volume with bark (a) and without bark (b), depending on the DBH.

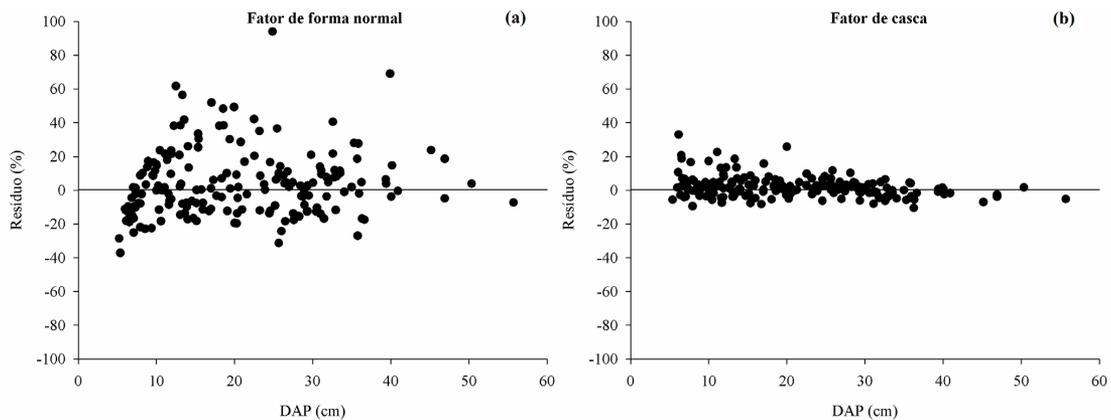


Figura 6. Resíduos percentuais da medição do volume obtido por meio de cubagem rigorosa em relação à estimativa do volume de fuste com casca obtido a partir do fator de forma normal (a) e do volume de fuste sem casca obtido a partir do fator de casca (b), em função do DAP.

Figure 6. Percent residuals of the volume measured and the estimated stem volume with bark obtained with the normal form factor (a), and the stem volume without bark obtained with the bark factor (b), as a function of the DBH.

Por meio de análise de variância, compararam-se o volume com casca do fuste de cada árvore estimado pelo modelo selecionado (Tabela 5), as estimativas obtidas utilizando-se o fator de forma ($f_{1,3}$) e os valores da cubagem rigorosa, tendo se constatado que não houve diferença estatística entre os valores ($F_{\text{calc}} = 0,17$; $p = 0,85$). Souza & Jesus (1991) e Scolforo et al. (1994) também realizaram teste semelhante e igualmente não verificaram diferenças significativas entre estimativas de volume. Além disso, foram plotados os resíduos percentuais da estimativa do volume de fuste com casca obtido a partir do fator de forma normal e o volume correspondente obtido através da cubagem rigorosa, em função do DAP (Figura 6a). A comparação desses resíduos com os resíduos das estimativas de volume do fuste com casca do modelo selecionado (Figura 5a) evidencia que o fator de forma apresentou desempenho inferior, com maior número de volumes superestimados.

Os resultados aqui apresentados sugerem que o fator de forma pode ser usado para estimativas expeditas de volume do fuste. Entretanto, quando estimativas mais precisas são necessárias, recomenda-se a aplicação das equações de volume.

3.4. Fator de casca

O fator de casca (K) obtido em relação ao volume de fuste foi de 0,9301. Os poucos relatos dessa variável para espécies nativas da Mata Atlântica são de

Schuch et al. (2008), para *M. cinnamomifolia* (0,91), e de Borsoi (2005), para a FOM do RS (0,9456). Apesar de escassos, os valores comparativos estão próximos, salientando-se que o mais adequado seria a comparação entre formações florestais similares e entre espécies, sempre que possível.

A análise de variância revelou que não há diferença estatística significativa ($F_{\text{calc}} = 0,01$; $p = 0,99$) entre o volume do fuste sem casca da cubagem rigorosa, o volume estimado pelo modelo selecionado (Tabela 5) e o volume estimado pelo uso de K (relacionando o VFCC real e o K). A maioria dos desvios dos volumes estimados com uso do fator de casca, em relação aos volumes obtidos na cubagem rigorosa, oscila entre -10% e 20% (Figura 6b), amplitude menor que os resíduos gerados pelo modelo selecionado para estimar o volume do fuste sem casca (Figura 5b). Portanto, apesar de o fator de casca apresentar tendência em superestimar os volumes nas classes de diâmetro abaixo de 20 cm, com pontos ultrapassando 30%, seu uso é recomendado.

4. CONCLUSÕES

Todos os modelos testados apresentaram bom ajuste para as estimativas de volumes total e de fuste, tanto com casca quanto sem casca, com destaque para o modelo de Schumacher-Hall (linearizado), sendo esse, portanto, recomendado para estimar o volume

de florestas secundárias da FOD da região sul da Mata Atlântica.

As diferenças entre as estimativas obtidas por meio do uso dos modelos e as obtidas pelo uso do fator de forma e do fator de casca não foram diferentes estatisticamente. Entretanto, a análise dos resíduos revelou que a equação de volume selecionada apresentou desempenho superior ao fator de forma, sendo, portanto, preferível para estimar o volume do fuste com casca. No caso da estimativa do volume do fuste sem casca, o fator de casca apresentou menor amplitude dos resíduos quando comparado ao modelo selecionado, sendo por isso preferível.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi realizado no âmbito do termo de cooperação técnico-científica (nº 10/2003) entre Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e Fundação do Meio Ambiente (FATMA), teve financiamento da Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnológica do Estado de Santa Catarina (FAPESC) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (5287/2011-6). O primeiro e terceiro autores foram bolsistas de mestrado do CNPq e o segundo autor, bolsista de produtividade do CNPq. Os autores agradecem a dois revisores anônimos pelas contribuições que melhoraram significativamente o artigo.

STATUS DA SUBMISSÃO

Recebido: 16 mar., 2016

Aceito: 7 set., 2016

AUTOR(ES) PARA CORRESPONDÊNCIA

Jean Correia

Departamento de Fitotecnia,
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC,
Rodovia Admar Gonzaga, 1346, Itacorubi,
CEP 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil
e-mail: jeancorreia@florestal.eng.br

REFERÊNCIAS

Barrance A, Schreckenberg K, Gordon J. *Conservation through use: lessons from the mesoamerican dry forest*. London: Overseas Development Institute; 2009.

Bartoszeck A. *Evolução da distribuição diamétrica e da relação hipsométrica em função dos fatores idade, sítio e densidade inicial em bracingais da região metropolitana de Curitiba* [dissertação]. Curitiba: Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná; 2000.

Borsoi, GA. *Subsídios para o manejo de uma floresta ombrófila mista em estágio avançado de regeneração natural* [tese]. Santa Maria: Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria; 2005.

Carvalho SDPC. *Estimativa volumétrica por modelo misto e tecnologia laser aerotransportado em plantios clonais de Eucalyptus sp.* [tese]. Piracicaba: Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de São Paulo; 2013.

Chichorro JF, Resende JLP, Leite HG. Equações de volume e de taper para quantificar multiprodutos da madeira em floresta atlântica. *Revista Árvore*. 2003; 27(6): 799-809. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622003000600006>.

Correia J. *Modelos volumétricos para florestas secundárias do litoral de Santa Catarina* [dissertação]. Florianópolis: Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Catarina; 2015.

Dean W. *A ferro e fogo: a história e a devastação da Mata Atlântica brasileira*. São Paulo: Companhia das Letras; 1996.

Durlo MA, Denardi L. Morfometria de Cabralea canjerana, em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul. *Ciência Florestal* 2009; 8(1): 55-66.

Fantini AC, Siminski A. Espécies madeireiras nativas da Região Sul do Brasil. In: Coradin L, Siminski A, Reis A. *Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro – Região Sul*. Brasília: MMA; 2011.

Finger CAG. *Medição de árvores: fundamentos de biometria florestal*. Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC; 1992.

Fundação SOS Mata Atlântica. *Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica: período 2011-2012*. São Paulo; 2013.

Husch B, Miller CI, Beers TW. *Forest mensuration*. Florida: Krieger Publishing Company; 1982.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. *Manual técnico da vegetação brasileira*. Brasília; 2012.

Jorge LAB. Equações de volume comercial com casca em floresta tropical pluvial no norte do Espírito Santo. In: *Anais do Congresso Brasileiro sobre Essências Nativas*; 1982, Campos do Jordão. São Paulo: Instituto Florestal; 1982. p. 456.

Klein RM. Mapa fitogeográfico do Estado de Santa Catarina. In: Reitz R, editor. *Flora ilustrada catarinense*. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues; 1978.

Neter J, Wasserman W, Kutner MH. *Applied linear statistical models*. Chicago: Irwin; 1996.

Nunes MH. *Stem profile modeling in Cerrado and tropical forests formations in Brazil* [dissertação]. Piracicaba:

