

MODELOS PARA VOLUME COMERCIAL DO FUSTE COM E SEM CASCA DE EUCALIPTO CITRIODORA

Valdir Carlos Lima de Andrade^{1*}, David Lucas Camargo Vieira Terra²,
Ana Carolina de Albuquerque Santos³, Helio Garcia Leite⁴

SAP 21060 Data de envio: 16/11/2018 Data de aceite: 27/01/2019
Sci. Agrar. Parana., Marechal Cândido Rondon, v. 18, n. 2, abr./jun., p. 106-116, 2019

RESUMO - O eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora* (Hook.) K.D.Hill & L.A.S. Johnson), apesar de ter um potencial de investimentos em plantios comerciais no Brasil, é pouco estudado, principalmente, quanto à estimativa do volume de árvores individuais. Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho avaliar alguns modelos volumétricos de dupla entrada, a fim de estimar o volume de madeira do fuste comercial com e sem casca de árvores individuais de eucalipto citriodora. Para isso, inicialmente, foram avaliados 18 modelos de dupla entrada por meio de critérios estatísticos, como erro padrão residual, coeficiente de determinação ajustado e análise gráfica da distribuição dos resíduos. Nesta oportunidade, utilizando o modelo que mais se destacou, fez-se o seu ajuste para gerar uma única equação volumétrica, tanto para volume com casca, como para sem casca. Neste caso, incluiu-se neste ajuste, a variável binária $Tx = 0$ para volume com casca e $Tx = 1$ para volume sem casca. Na avaliação das estimativas com e sem casca empregou-se a média dos erros absolutos, raiz quadrada do erro médio e soma dos quadrados dos resíduos relativos. Concluiu-se pelo uso de um modelo volumétrico com melhor desempenho que o de Schumacher e Hall e que, este modelo selecionado, ao ser adaptado ao uso da variável binária Tx , gerou uma única equação para estimar volume com e sem casca tendo um comportamento similar ao emprego da forma usual, onde são geradas duas equações volumétricas em separado para volume com e sem casca.

Palavras-chave: *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D.Hill & L.A.S. Johnson, variável binária, biometria florestal, cubagem por Huber.

MODELS FOR COMMERCIAL VOLUME OF THE STEM WITH AND WITHOUT BARK OF *Corymbia citriodora*

ABSTRACT - The *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D.Hill & L.A.S. Johnson, despite having a potential for investments in commercial plantations in Brazil, is little studied, mainly, in the estimation of the volume of individual trees. In this way, the objective of this study was to evaluate some double entry volumetric models to estimate the volume of wood of the commercial stem with and without bark of individual trees of *C. citriodora*. For this purpose, the residual data, capacity determination coefficients and graphic data of the waste distribution were analyzed. On this occasion, using the model that most stood out, the adjustment was made to generate a single volumetric equation for both volume with bark and without bark. In this case, including in this adjustment, the binary variable $Tx = 0$ for volume with bark and $Tx = 1$ for volume without bark, the estimation of the with and without bark was evaluated using: mean absolute error, square root of mean error and sum of the squares of relative residues. It was concluded by the use of a volumetric model with better performance than the one of Schumacher and Hall and that, this selected model, when being adapted to the use of the variable Tx , generated a unique equation to estimate volume with and without bark having a similar behavior to employment in the usual way, where two separate volumetric equations are generated for volume with and without bark.

Keywords: *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D.Hill & L.A.S. Johnson, binary variable, forest biometrics, stem measurements by Huber.

INTRODUÇÃO

O eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora*), apesar de ter potencial para atender demandas de vários produtos florestais, tais quais, óleos essenciais, madeira serrada, mourões, carvão vegetal, dormentes, aglomerados

e construção civil, não se tornou uma espécie prioritária na maioria das empresas do setor florestal brasileiro, as quais preferiram envidar esforços em pesquisas sobre produtividade e qualidade da madeira de outras espécies, como o *Eucalyptus urophylla*, *E. saligna*, *E. grandis* e

¹Docente do curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Tocantins (UFT), Rua Badejos, L7, Chácaras 69/72, Gurupi, Tocantins, Brasil. E-mail: vclandrade@uft.edu.br. *Autor para correspondência.

²Mestre em Ciências Florestais e Ambientais. Rua da Perca, Jardim Atlântico, CEP: 74343470, Goiânia, Goiás, Brasil. E-mail: davidlcv7@hotmail.com.

³Doutoranda em Ciências Florestais, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Avenida Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário, CEP: 36570-900, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. E-mail: anaflorestaufv@gmail.com.

⁴Doutorado em Ciências Florestais, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Avenida Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário, CEP: 36570-900, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. E-mail: hgleite@ufv.br.

E. camaldulensis (VITTI; BRITO, 1999; ANDRADE; GOMES, 2000; SOUZA et al., 2009; BRISOLA; DEMARCO, 2011; TORRES et al., 2016).

Embora nos últimos anos, o eucalipto citriodora tenha chamado a atenção de muitos estudos, em sua maioria, quanto às propriedades físicas e mecânicas da madeira, condições de viveiros florestais para produção de mudas e da madeira tratada (varas, mourões, postes) e extração de óleos essenciais (OLIVEIRA et al., 2005; ARAUJO et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2014 e SANTOS et al., 2016), poucos estudos dão enfoque à quantificação do seu volume de madeira em árvores individuais (MARTINS et al., 2016; TERRA et al., 2018). Neste contexto, pode-se observar certa escassez de conhecimentos sobre a volumetria do eucalipto citriodora na literatura, comprometendo assim a tomada de decisões quanto ao uso do seu potencial de produção.

Apesar do cenário desfavorável em pesquisa sobre a volumetria do eucalipto citriodora, dos cerca de 7,85 milhões de hectares plantados no Brasil (IBA, 2017), parte se insere em áreas com esta espécie, sendo nestes plantios, imprescindível quantificar o estoque existente de madeira para melhor balizar o planejamento de sua produção. Isso se faz por meio da aplicação de equações volumétricas nas árvores que compõem as parcelas de inventário. Este procedimento, que proporciona bons níveis de ajuste e precisão das equações volumétricas geradas, permite também bons níveis de acurácia no processamento do inventário volumétrico, com expressiva redução de custos, obtendo-se volume de árvores individuais sem precisar do uso de cubagem rigorosa, que é feita separadamente em algumas árvores-amostra do povoamento inventariado.

As árvores-amostra cubadas são empregadas no ajuste de alguns modelos volumétricos, preferencialmente, de dupla entrada, dos quais, se destacam os modelos de Schumacher e Hall, Meyer, Stoate, Naslund, Spurr e Takata (ANDRADE, 2017), conforme constam as suas

referências bibliográficas em Loetsch et al. (1973) e Miguel et al. (2014).

Nesta preferência por modelos volumétricos de dupla entrada, ressalta-se sua elevada superioridade frente aos modelos locais, conforme destaque dado nos trabalhos feitos por Couto e Bastos (1987), Leite e Andrade (2003), Rolim et al. (2006), Azevedo et al. (2011), Melo et al. (2013) e Miguel et al. (2014), com diversas espécies florestais, excluindo-se o eucalipto citriodora.

Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho avaliar o ajuste de modelos volumétricos de dupla entrada para a estimativa do volume de madeira com e sem casca do fuste de árvores individuais de eucalipto citriodora.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

Os dados utilizados neste estudo são provenientes de um plantio de eucalipto citriodora (*C. citriodora*) localizado próximo ao município de Gurupi, Tocantins. A região está localizada a uma altitude de aproximadamente 225 m, onde, segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima é do tipo Aw, com temperaturas médias mensais de 24°C e precipitação pluviométrica média anual em torno de 1.600 mm entre outubro e maio, com maior quantidade entre dezembro e fevereiro (INMET, 1992).

Coleta de dados e modelos avaliados

O plantio de eucalipto citriodora foi realizado em espaçamento inicial de 3,0 x 2,0 m, a partir de mudas formadas por sementes. No momento da coleta dos dados, as plantas tinham 5,6 anos de idade. Para a cubagem, foram abatidas 24 árvores-amostra, distribuídas em classes de diâmetro de 4 cm de amplitude cada, proporcionando seis árvores por classe diamétrica (Tabela 1), conforme Andrade e Leite (2001), que afirmam que são suficientes entre 5 a 7 indivíduos por classe diamétrica.

TABELA 1 - Distribuição de frequência das 24 árvores cubadas em um plantio de eucalipto citriodora com 5,6 anos de idade.

Classes de diâmetros (cm)	Classes de alturas (m)								Total
	9	11	13	15	16	18	20	22	
≤ 5	3	2	1						6
5 a ≤ 9			1	2	2	1			6
9 a ≤ 13						3	3		6
13 a ≤ 17					1		2	3	6
Total	3	2	2	2	3	4	5	3	24

Nas árvores cubadas, mediu-se o diâmetro a 1,3 m, altura total e diâmetros com casca (cc) e respectiva espessura de casca, nas posições 0,1 m; 0,2 m; 0,4 m; 0,7 m; 1,3 m; 2,7 m e, sucessivamente, a cada 2 m, até um diâmetro em torno de 3 cm cc. Em seguida, após obter o

volume comercial do fuste, empregando-se a fórmula de Huber, de forma sucessiva ao longo do tronco de cada árvore cubada, empregou-se o programa R for Windows (R CORE TEAM, 2015) no ajuste e avaliação dos seguintes modelos volumétricos de dupla entrada:

$$\ln(v) = \beta_0 + \beta_1 \ln(D) + \beta_2 \ln(H) + \ln(\varepsilon) \quad (\text{modelo 1})$$

$$(v) = \beta_0 + \beta_1 (D^2 H) + \varepsilon \quad (\text{modelo 2})$$

$$\ln(v) = \beta_0 + \beta_1 \ln(D^2 H) + \ln(\varepsilon) \quad (\text{modelo 3})$$

$$(v) = \beta_0 + \beta_1(D) + \beta_2(D^2) + \beta_3(DH) + \beta_4(D^2H) + \varepsilon \quad (\text{modelo 4})$$

$$(v) = \frac{(D^2H)}{\beta_0 + \beta_1(D)} + \varepsilon \quad (\text{modelo 5})$$

$$(v) = \beta_0 + \beta_1(D^2) + \beta_2(D^2H) + \beta_3(DH^2) + \beta_4(H^2) + \varepsilon \quad (\text{modelo 6})$$

$$(v) = \delta_1(D)^{(\delta_1-1)} \exp[\delta_2 + (H-1)^{\delta_3}] + \varepsilon \quad (\text{modelo 7})$$

$$(v) = (1+D)^{\delta_1} \exp\left[\delta_2 + \delta_3\left(\frac{D}{H}\right)\right] + \varepsilon \quad (\text{modelo 8})$$

$$(v) = \delta_1(1+D)^{\delta_2} \exp\left[1 - \left(\frac{D}{H}\right)^{\delta_3}\right] + \varepsilon \quad (\text{modelo 9})$$

$$(v) = \delta_1(1+D)^{\delta_2} \exp(H^{\delta_3}) + \varepsilon \quad (\text{modelo 10})$$

$$\sqrt{(v)} = \left(\frac{\delta_1}{\delta_2}\right) - \left\{\delta_1(D + \delta_3) + \delta_2[1 - (D^2H)^{\delta_4}]\right\} + \varepsilon \quad (\text{modelo 11})$$

$$\sqrt{(v)} = \frac{[\delta_1(D^2H) - \delta_2]^{\delta_3}}{\exp[1 - \delta_4(1/D)]} + \varepsilon \quad (\text{modelo 12})$$

$$\sqrt{(v)} = \frac{[\delta_1(D^2H) - \delta_2]^{\delta_3}}{1 + \exp[-\delta_4(1/D)]} + \varepsilon \quad (\text{modelo 13})$$

$$\sqrt{(v)} = [\delta_1 + (H-1)^{\delta_2}] \exp\left\{1 - \exp\left[\delta_3\left(\frac{H}{D}\right)^{\delta_4}\right]\right\} + \varepsilon \quad (\text{modelo 14})$$

$$\left(\frac{v}{D}\right) = \delta_1[D^{(\delta_2-1)}] [1 + \exp(-\delta_3H)]^{(-1/\delta_4)} + \varepsilon \quad (\text{modelo 15})$$

$$\left(\frac{v}{D}\right) = \delta_1[D^{(\delta_2-1)}] [\delta_3 + (\delta_4 - \delta_3)\exp(-\delta_5H)] + \varepsilon \quad (\text{modelo 16})$$

$$\left(\frac{v}{D}\right) = [D^{(\delta-1)}] [-\delta_2 + \exp(\delta_3H)] + \varepsilon \quad (\text{modelo 17})$$

$$\left(\frac{v}{D}\right) = [D^{(\delta_1-1)}] [\delta_2 + \exp(-\delta_3 + H^{\delta_4})] + \varepsilon \quad (\text{modelo 18})$$

Em que:

v = volume real do fuste comercial até um diâmetro em torno de 3 cm com casca (m^3),

D = DAP (cm),

H = altura total (m),

\ln = logaritmo neperiano, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \delta_1, \delta_2,$

δ_3, δ_4 e δ_5 = coeficientes de regressão à serem estimados,

ε = erro do modelo e \exp = inverso de \ln .

Os modelos 1 a 6 são os modelos volumétricos de Schumacher e Hall, Spurr, Meyer, Takata e Naslund, respectivamente. Tais modelos foram escolhidos para este estudo, tendo como base trabalhos realizados por Couto e Vettorazzo (1987), Leite e Andrade (2003), Rolim et al. (2006), Azevedo et al. (2011), Melo et al. (2013), Drescher et al. (2014) e Miguel et al. (2014). Os modelos de 7 a 18, foram desenvolvidos por Andrade (2017) e ainda não

havia sido testados para plantios de eucalipto citriodora no Brasil.

Critérios de avaliação dos modelos

Em uma avaliação preliminar dos modelos 1 a 18, visando reduzir esta quantidade de modelos para volume do fuste comercial com casca (vcc), utilizou-se o erro padrão residual (syx), o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) e a análise gráfica da distribuição de resíduos (AGR).

$$syx\% = \left(\frac{syx}{\bar{y}}\right) 100; \text{ sendo: } syx = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y-\hat{y})^2}{(n-p)}} \quad (\text{modelo 19})$$

$$R^2_{aj} = 1 - (1 - R^2) \left[\frac{(n-1)}{(n-p)}\right] \quad (\text{modelo 20})$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y-\hat{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y-\bar{y})^2} \quad (\text{modelo 21})$$

Em que:

y = volume real do fuste comercial com e sem a casca (m^3),

\hat{y} = volume estimado do fuste comercial com e sem a casca (m^3),

\bar{y} = volume real médio do fuste comercial com e sem a casca (m^3),

n = número de árvores cubadas,

p = número de coeficientes do modelo,

R^2 = coeficiente de determinação.

Ressalta-se que, para os modelos volumétricos lineares 1 e 3, ambos R^2 , R^2_{aj} e syx foram recalculados por serem modelos que utilizam a variável dependente transformada em $\ln(v)$ (SOUZA, 1998; SCHENEIDER et al., 2009). Para todos os modelos de ajuste não linear (modelos 5 e modelos 7 a 18), devido ao emprego de um método iterativo na estimativa dos coeficientes de regressão, usou-se também R^2 , R^2_{aj} e syx, ambos recalculados para comparar com os modelos lineares como realizados em outro trabalhos, cabendo citar: Miguel et al. (2014), Sales et al. (2015), Andrade (2017), Gama et al. (2017).

Apesar de ser recomendado o uso do R^2 ou da correlação linear ($r_{y\hat{y}}$) para comparar modelos não lineares

$$MEA = \frac{|\sum_{i=1}^n (y-\hat{y})|}{n} \quad (\text{modelo 22})$$

$$RQEM = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (y-\hat{y})^2}{n}\right]} \quad (\text{modelo 23})$$

$$SQRR = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y-\hat{y}}{y}\right)^2 \quad (\text{modelo 24})$$

Em que:

MEA = média dos erros absolutos,

RQEM = raiz quadrada do erro médio e

SQRR = soma dos quadrados dos resíduos relativos.

Visando facilitar a avaliação das duas equações de vcc e vsc e aquela que foi gerada, empregando-se a

Em seguida, considerando somente os modelos que mais se destacaram quanto a estes critérios estatísticos, ajustaram-se os melhores modelos para volume do fuste comercial sem casca (vsc), sendo estes também avaliados conforme syx, R^2_{aj} e AGR. Como resultado, a partir do modelo selecionado para eucalipto citriodora, foram geradas duas equações volumétricas (uma para vcc e outra para vsc). Neste caso, para obter syx e R^2_{aj} , empregou-se:

(SOUZA, 1998), utilizou-se o R^2_{aj} devido a existência de modelos com diversas quantidades de coeficientes. Se fosse feito a comparação dos modelos lineares usando AGR, R^2_{aj} e syx, em separado dos não lineares, nos quais se usariam AGR, R^2 (ou $r_{y\hat{y}}$) e syx, poder-se-ia correr o risco de não selecionar alguns modelos, tanto lineares como não lineares, excluindo-se modelos que poderiam ter um melhor nível de estimativa do volume quanto a uma comparação dentre todos. Por isso, inicialmente, optou-se por avaliar todos os modelos simultaneamente para selecionar, dentre 18 modelos volumétricos, os de melhor ajuste em vcc e, somente dentre estes, se decidir pelo modelo volumétrico de maior destaque no ajuste para vsc.

Após a decisão pelo melhor modelo volumétrico, este foi ajustado com a inclusão da variável binária TX, sendo TX = 0 para vcc e TX = 1 para vsc (CAMPOS; LEITE, 2013). Esse procedimento permitiu gerar uma única equação para quantificar tanto vcc como vsc por árvore individual de eucalipto citriodora, isto é, utilizando a mesma equação ajustada, diferente do que se faz usualmente, com o emprego de duas equações em separado para vcc e vsc. Nesta etapa, realizou-se a avaliação das equações volumétricas, geradas para vcc e vsc, empregando-se as equações:

variável binária TX, os critérios estatísticos MEA, RQEM e SQRR foram englobados em um único valor, o qual representou o total de notas obtidas pela classificação de cada critério utilizado, sendo nota 1 ao melhor resultado e, subsequentemente, ao pior resultado em cada equação analisada. Neste caso, aliado ao critério AGR, a melhor

equação volumétrica foi definida como sendo aquela de menor soma de notas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise dos modelos volumétricos

Os resultados obtidos para vcc mostram syx variando de 7,44% a 13,05%, sendo os modelos 4 (8,39%), 6 (7,44%) e 12 (8,13%) aqueles com menores valores (Tabela 2). Também, maiores valores de R^2_{aj} foram obtidos para os modelos 4, 6 e 12, ambos maiores que 0,990.

TABELA 2 - Estatísticas obtidas para 18 modelos volumétricos ajustados de eucalipto citriodora com casca, com plantas de 5,6 anos de idade.

md	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$\hat{\beta}_4$	syx(%)	R^2	R^2_{aj}
1	-10,68916	2,14127	1,02938			13,05	0,979	0,977
2	0,00145	0,00004				10,03	0,987	0,986
3	-10,73596	1,06145				12,73	0,979	0,978
4	0,05214	-0,02716	0,00185	0,00106	-4,842E-05	8,39	0,992	0,990
5	22490,8	362,5				9,21	0,989	0,988
6	0,00877	0,00098	-5,694E-05	5,824E-05	-3,956E-04	7,44	0,994	0,992
md	$\hat{\delta}_1$	$\hat{\delta}_2$	$\hat{\delta}_3$	$\hat{\delta}_4$	$\hat{\delta}_5$	syx(%)	R^2	R^2_{aj}
7	3,02147	-10,61278	0,26839			9,32	0,989	0,988
8	2,81799	-9,02727	-0,81742			9,58	0,988	0,987
9	4,877E-05	2,84499	0,83023			9,61	0,988	0,987
10	3,823E-05	2,17612	0,27892			9,75	0,988	0,987
11	-0,01222	0,00813	119,13514	0,41834		8,82	0,991	0,989
12	0,00114	-0,20800	0,29952	-6,14806		8,13	0,992	0,991
13	4,205E-05	0,00141	0,51879	47,15112		9,26	0,990	0,988
14	-3,67620	0,96430	1,44030	0,15390		9,16	0,990	0,988
15	6,594E-04	2,08183	0,20259	0,13020		9,30	0,990	0,988
16	0,01021	2,09427	0,06694	-0,07424	0,12166	9,65	0,989	0,987
17	2,01807	0,99996	3,199E-05			10,18	0,987	0,986
18	2,03398	-0,50772	1,67950	9,857E-04		9,74	0,989	0,987

Em que: md = modelo volumétrico, $\hat{\beta}$ e $\hat{\delta}$ = coeficientes estimados de regressão, syx = erro padrão residual, R^2 = coeficiente de determinação e R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado.

Pela AGR (Figura 1), onde se apresentam os seis melhores modelos quanto a esta análise preliminar, nota-se que, apesar de se sobressaírem nos critérios R^2_{aj} e syx, os modelos 4 e 6 resultaram em tendência muito mais dispersa para árvores, com diâmetro menor que 12 cm, aproximadamente, sendo excluídos da análise. Portanto, considerando R^2_{aj} e syx (Tabela 2) e a AGR (Figura 1), selecionaram-se os modelos 11, 12 e 14 (Figuras 1D, 1E e 1F) para quantificar vcc de eucalipto citriodora na área amostrada.

Apesar do modelo 1 ter sido menos eficiente nos critérios R^2_{aj} e syx, foi selecionado devido melhor distribuição de resíduos que os modelos 4 e 6 (Figura 1A), mesmo sendo pior, se comparada à distribuição obtida pelos modelos 11, 12 e 14 (Figuras 1D, 1E e 1F), com resíduos oscilando entre 37% \pm 5% (modelo 1); 58,3% (modelo 11); 66,7% (modelo 11) e 50% (modelo 14). Deve-se considerar para o modelo 1, que este é considerado um dos modelos mais difundidos no Brasil (LEITE; ANDRADE, 2003; ROLIM et al., 2006; MELO et al., 2013; ANDRADE, 2017).

Ao comparar os resultados do modelo 1 com Melo et al. (2013), os quais obtiveram R^2_{aj} de 0,975 e syx de 16,8%, pode-se observar que ocorreram melhores

resultados no presente trabalho (R^2_{aj} de 0,977 e syx de 13,05%). Comparando com Rolim et al. (2006), estes autores obtiveram R^2_{aj} de 0,994 e syx de 4,68%, o modelo 1 apresentou os piores resultados neste trabalho. No entanto, em comparação com Andrade (2017), o modelo 1 apresentou melhor resultado que neste trabalho, com R^2_{aj} de 0,989 e syx de 8,3%. No trabalho de Andrade (2017), o modelo 12 teve melhores resultados que no presente trabalho com R^2_{aj} de 0,991 e syx de 7,9%.

Visando complementar a análise anterior e também decidir por um modelo volumétrico para quantificar vsc, procedeu-se ao ajuste dos modelos 1, 11, 12 e 14, usando vsc no lugar de v. Os resultados permitiram observar que o critério R^2_{aj} , por apresentar excelentes valores (acima de 0,980 - Tabela 3), não permite uma base conclusiva para inferir sobre o modelo de melhor nível de ajuste aos dados de eucalipto citriodora. Quanto a AGR (Figura 2), se observa uma similar distribuição de resíduos, oscilando entre 50,00 \pm 5% (modelo 1), 66,7% (modelo 11), 54,2% (modelo 12) e 58,3% (modelo 14).

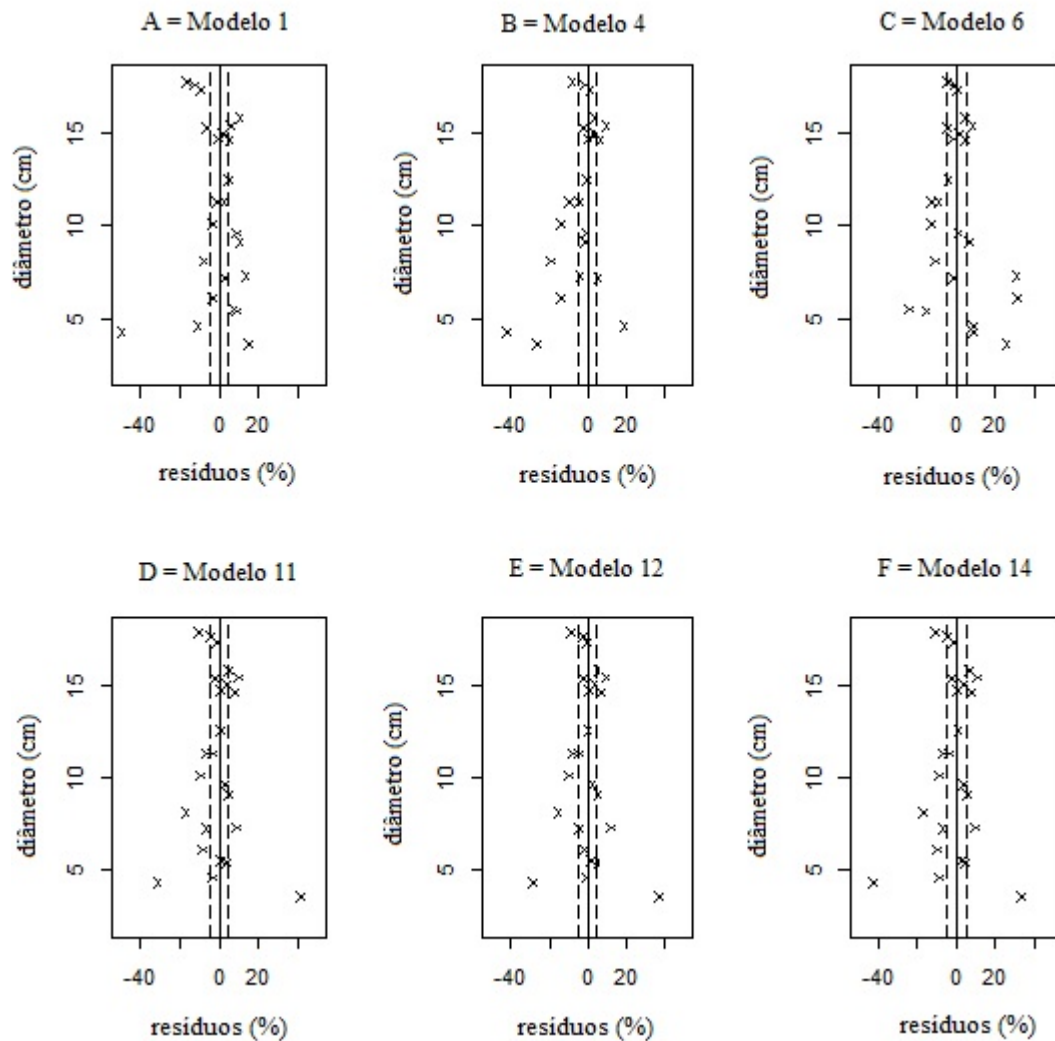


FIGURA 1 - (A, B, C, D, E, F) Distribuição de resíduos de seis modelos volumétricos para eucalipto citriodora, considerando o volume do fuste com casca.

TABELA 3 - Estatísticas obtidas para o ajuste sem casca dos modelos volumétricos 1, 11, 12 e 14 em um plantio de eucalipto citriodora com 5,6 anos de idade.

md	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$		syx (%)	R ²	R ² _{aj}
1	-11,06153	2,19142	1,03825		11,23	0,985	0,983
md	$\hat{\delta}_1$	$\hat{\delta}_2$	$\hat{\delta}_3$	$\hat{\delta}_4$	Syx (%)	R ²	R ² _{aj}
11	-0,01138	0,00428	230,58037	0,47444	7,93	0,993	0,992
12	0,00064	-0,12057	0,33914	-5,71611	7,40	0,994	0,993
14	-3,8635	1,06478	1,53938	0,13809	8,25	0,992	0,991

Em que: md = modelo volumétrico, $\hat{\beta}$ e $\hat{\delta}$ = coeficientes estimados de regressão, syx = erro padrão residual, R² = coeficiente de determinação, R²_{aj} = coeficiente de determinação ajustado.

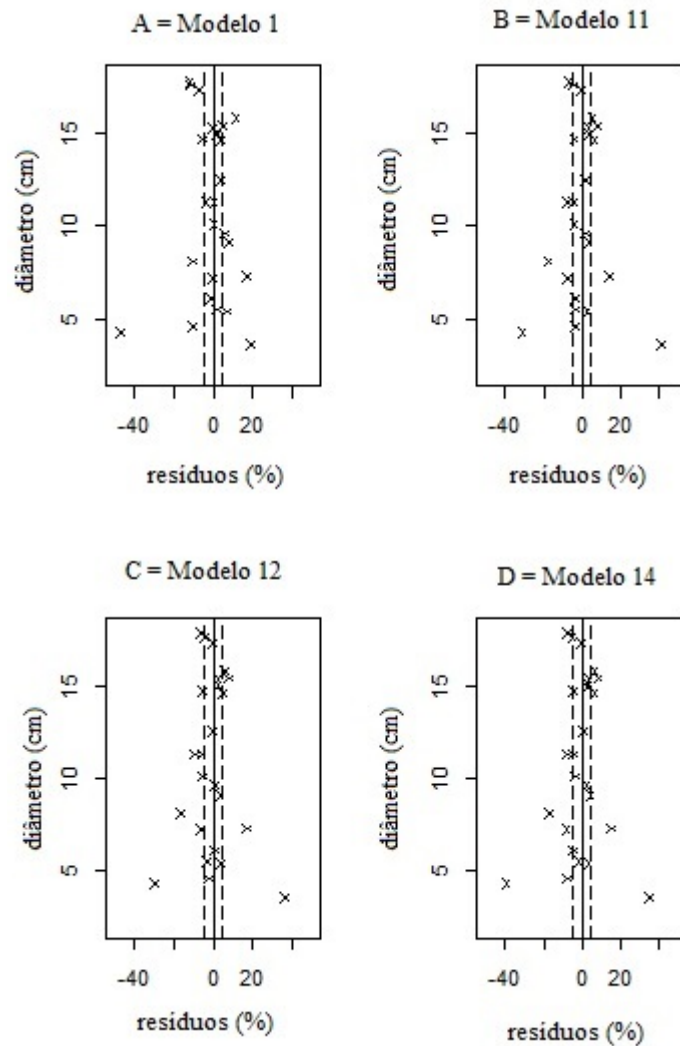


FIGURA 2 - (A, B, C, D) Distribuição de resíduos dos melhores modelos volumétricos ajustados para eucalipto citriodora, considerando o volume do fuste sem casca.

Diante disso, na avaliação de vcc e vsc com syx e AGR, se decidi pelo modelo 12 com syx de 8,13% (vcc) e de 7,40% (vsc). Dessa decisão, utilizando-se os

coeficientes de regressão estimados do modelo 12 (Tabelas 2 e 3), foram geradas as seguintes equações volumétricas:

$$\widehat{vcc} = \left\{ \frac{[0,00114(D^2H)+0,20800]^{0,29952}}{e^{[1+6,14806(\frac{1}{D})]}} \right\}^2 \quad (\text{com casca}) \quad (\text{modelo 25})$$

$$\widehat{vsc} = \left\{ \frac{[0,00064(D^2H)+0,12057]^{0,33914}}{e^{[1+5,71611(\frac{1}{D})]}} \right\}^2 \quad (\text{sem casca}) \quad (\text{modelo 26})$$

Nota-se que as equações 25 e 26 foram geradas a partir do modelo 12 ajustado de forma separada, o que pode elevar o banco de equações dado ao ajuste necessário para atender diferentes situações de idade, solo, espécie, dentre outros e, com isso, comprometer a seleção de equações e o processamento do inventário. Como precaução a este fato, exige-se gerar uma única equação para quantificar tanto vcc como vsc no mesmo ajuste, o que propicia reduzir pela metade o banco de equações

volumétricas. Para isso, ajustou-se o modelo 12 com a inclusão da variável binária Tx utilizando-se três diferentes formas, quais sejam: $e^{[\theta(Tx)]}$, $e^{[\theta(Tx)(\frac{1}{D})]}$ e $e^{[\theta(Tx)(\frac{H}{D})]}$. Como resultado, obteve-se as três seguintes opções de equações volumétricas para quantificar, tanto vcc como vsc com a mesma equação, alterando-se apenas o valor de Tx:

$$\hat{v} = \left\{ \frac{[0,0010(D^2H)+0,1849]^{0,3173}}{e^{[1+5,9502(\frac{1}{D})]}} e^{[-0,1043(Tx)]} \right\}^2 ; R^2_{aj} = 0,992 \text{ e } syx = 7,62\% \quad (\text{modelo 27})$$

$$\hat{v} = \left\{ \frac{[0,0009(D^2H)+0,1623]^{0,3130}}{e^{[1+5,4717(\frac{1}{D})]}} e^{[-1,3216(Tx)(\frac{1}{D})]} \right\}^2 ; R^2_{aj} = 0,993 \text{ e } syx = 7,43\% \quad (\text{modelo 28})$$

$$\hat{v} = \left\{ \frac{[0,00086(D^2H)+0,0996]^{0,3214}}{e^{[1+5,2955(\frac{1}{D})]}} e^{[-0,0742(Tx)(\frac{H}{D})]} \right\}^2 ; R^2_{aj} = 0,993 \text{ e } syx = 7,38\% \quad (\text{modelo 29})$$

Na Tabela 4, as estatísticas MEA, RQEM e SQRR foram englobadas na nota geral (TG) que, dentre as equações 27, 28 e 29, indicou a equação 29 por resultar no menor valor (TG = 13) e a equação 28 a de pior resultado, com TG = 22 pontos. O valor que foi obtido pelo modelo 12 com ajuste sem TX (equações 25 e 26), foi de TG = 9. Ao se incluir a AGR (Figura 3), pode-se verificar uma distribuição similar entre não usar Tx (equações 25 e 26) e usar Tx como representada pelas equações 27 e 29.

Embora a equação 29 tenha resultado em uma nota geral de 13 pontos, suas estatísticas são muito

próximas das equações geradas pelo modelo 12 sem a variável TX (equações 25 e 26) e equação 27 (uso da variável TX). Além disso, pela equação 29, a proporção do volume de madeira sem a casca (TX = 1), é expressa individualmente por $e^{[-0,074(\frac{H}{D})]}$, enquanto que a equação 27 o expressa por $e^{(-0,1043)}$. Portanto, a equação 29 é a mais indicada para quantificar tanto o volume com casca, como o volume sem casca do fuste de eucalipto citriodora.

TABELA 4 - Critérios estatísticos utilizados para avaliar as equações volumétricas 25 e 26 e 27, 28 e 29 geradas a partir do modelo 12.

Modelos	MEA	RQEM	SQRR	TN	TG	EMA	RQEM	SQRR
Volume do fuste com casca								
25	0,08493	0,00701	0,30855	4	9	1	1	2
27 (Tx = 0)	0,08504	0,00731	0,29948	9	16	4	4	1
28 (Tx = 0)	0,08499	0,00719	0,41256	10	22	3	3	4
29 (Tx = 0)	0,08494	0,00710	0,31358	7	13	2	2	3
Volume do fuste sem casca								
26	0,08491	0,00517	0,19673	5		2	2	1
27 (Tx = 1)	0,08498	0,00507	0,21686	7		3	1	3
28 (Tx = 1)	0,08504	0,00545	0,28384	12		4	4	4
29 (Tx = 1)	0,08490	0,00523	0,19909	6		1	3	2

Em que: MEA = média dos erros absolutos, RQEM = raiz quadrada do erro médio, SQRR = soma dos quadrados dos resíduos relativos, TN = total de notas e TG = total geral das notas incluindo volume com e sem casca.

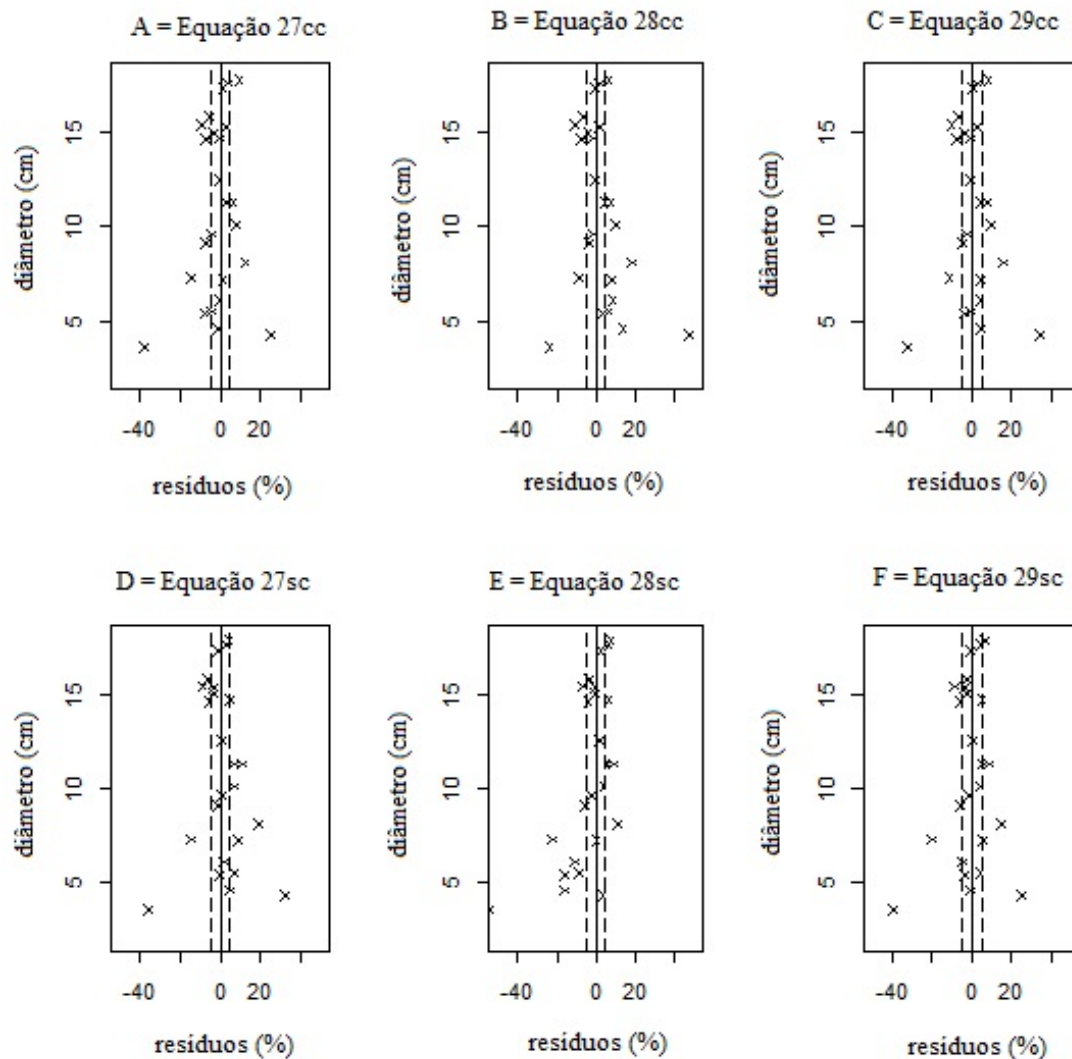


FIGURA 3 - (A, B, C, D, E, F) Distribuição de resíduos do modelo 12 ajustado com a variável binária Tx para eucalypto citriodora.

CONCLUSÕES

O modelo 12, da forma funcional $\sqrt{\hat{v}} = \frac{[\delta_1(D^2H) - \delta_2]^{\delta_3}}{\exp[-\delta_4(1/D)]} + \sqrt{\varepsilon}$, é o mais indicado para estimação do volume de árvores individuais de eucalypto citriodora. Dentre os modelos considerados usuais no Brasil, o modelo de Schumacher e Hall apresentou melhor ajuste.

Para quantificar o volume com e sem casca, empregando-se uma única equação, deve-se utilizar a variável binária Tx na forma: $e^{[\beta_{TX}(\frac{H}{D})]}$, o que, aplicado no modelo 12, permitiu concluir pela seguinte equação volumétrica para eucalypto citriodora:

$$\hat{v} = \left\{ \frac{[0,0009(D^2H) + 0,999]^{0,321}}{e^{[1+5,287(\frac{1}{D})]}} e^{[-0,074(Tx)(\frac{H}{D})]} \right\}^2; \text{ com } Tx = 0$$

para volume com casca e Tx = 1 para volume sem casca.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, V.C.L. Modelos volumétricos de dupla entrada para aplicar em povoamentos florestais brasileiros. **Floresta e Ambiente**, v.24, e00135415, 2017.
- ANDRADE, V.C.L.; LEITE, H.G. Uso da geometria analítica para descrever o taper e quantificar o volume de árvores individuais. **Revista Árvore**, v.25, n.4, p.481-486, 2001.
- ANDRADE, A.M.; GOMES, S.S. Influência de alguns fatores não genéticos sobre o teor de óleo essencial em folhas de *Eucalyptus citriodora* Hook. **Floresta e Ambiente**, v.7, n.1, p.181-189, 2000.
- ARAUJO, H.J.B.; MAGALHÃES, W.L.E.; OLIVEIRA, L.C. Durabilidade de madeira de eucalypto citriodora (*Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson) tratada com CCA em ambiente amazônico. **Acta Amazonica**, v.42, n.1, p.49-58, 2012.

- AZEVEDO, G.B.; SOUSA, G.T.O.; BARRETO, P.A.B.; CONCEIÇÃO JUNIOR, V. Estimativas volumétricas em povoamentos de eucalipto sob regime de alto fuste e talhadia no sudoeste da Bahia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.31, n.68, p.309-318, 2011.
- BRISOLA, S.H.; DEMARCO, D. Análise anatômica do caule de *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla* e *E. grandis* x *urophylla*: desenvolvimento da madeira e sua importância para a indústria. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 91, p.317-330, 2011.
- CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4a. ed., Viçosa: UFV, 2013. 605p.
- COUTO, H.T.Z.; BASTOS, N.L.M. Modelos de equações de volume e relações hipsométricas para plantações de *Eucalyptus* no Estado de São Paulo. **Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais**, v.37, p.42-49, 1987.
- COUTO, H.T.Z.; VETTORAZZO, S.C. Seleção de equações de volume e peso seco comercial para *Pinus taeda*. **Revista Cerne**, v.5, n.1, p.69-80, 1999.
- DRESCHER, R.; GAVA, F.H.; PELISSARI, A.L.; ACOSTA, F.C.; SILVA, V.S.M. Equações volumétricas para *Tectona grandis* Linn F. em povoamentos jovens no estado de Mato Grosso. **Advances in Forestry Science**, v.1, n.1, p.65-70, 2014.
- GAMA, J.R.V.; SOUZA, A.L.; VIEIRA, D.S.; LEITE, H.G. Equações de volume para uma floresta ombrófila aberta, município de Codó, estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.12, n.4, p.535-542, 2017.
- IBA. INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES: **Relatório IBÁ 2017 ano base 2016**. Disponível em: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf. Acesso em: 08 mai. 2019.
- INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais Climatológicas - 1961 a 1990**. INMET. Brasília, 1992.
- LEITE, H.G.; ANDRADE, V.C.L. Importância das variáveis altura dominante e altura total em equações hipsométricas e volumétricas. **Revista Árvore**, v.27, n.3, p.301-310, 2003.
- LOETSCH, F.; ZOHRER, F.; HALLER, K.E. **Forest Inventory**. 2a. ed. Manchem: BLV. 1973. 479p.
- MARTINS, A.P.M.; CARVALHO, D.E.; SCHMIDT, L.N.; GORENSTEIN, M.R.; CYSNEIROS, V.C. Eficiência de métodos para estimativa do volume total de *Corymbia citriodora*. **Scientia Agraria Paranaensis**, v.15, n.2, p.178-184. 2016.
- MELO, L.C.M.; BARRETO, P.A.B.; OLIVEIRA, F.G.R.B.; NOVAES A.B. Estimativas volumétricas em povoamento de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* no sudoeste da Bahia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.33, n.76, p.379-386, 2013.
- MIGUEL, E.P.; LEAL, F.A.; ONO, H.A.; LEAL, U.A.S. Modelagem na predição do volume individual em plantio de *Eucalyptus urograndis*. **Revista Brasileira de Biometria**, v.32, n.4, p.584-598, 2014.
- OLIVEIRA, J.T.S.; HELLMEISTER, J.C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, v.29, n.1, p.115-127, 2005.
- OLIVEIRA, K.F.; SOUZA, A.M.; SOUSA, G.T.O.; COSTA, A.L.M.; FREITAS, M.L.M. Estabelecimento de mudas de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia citriodora* em diferentes substratos. **Floresta e Ambiente**, v.21, n.1, p.30-36, 2014.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2015. Disponível em: <<http://www.r-project.org>>. Acesso em: 10 mar. 2018.
- ROLIM, S.G.; COUTO, H.T.Z.; JESUS, R.M.; FRANÇA, J.D. Modelos volumétricos para a Floresta Nacional do Tapirapé-Aquirí, Serra dos Carajás (PA). **Acta Amazonica**, v.36, n.1, p.107-114, 2006.
- SALES, F.C.V.; SILVA, J.A.A.; FERREIRA, R.L.C.; GADELHA, F.H.L. Ajustes de modelos volumétricos para o clone *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* cultivados no agreste de Pernambuco. **Floresta**, v.45, n.4, p.663-670, 2015.
- SANTOS, P.V.; SILVA, M.A.; DIAS-JÚNIOR, A.F.; CARVALHO, A.M.; NASCIMENTO, A.M. Qualidade tecnológica da madeira de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson submetida ao processo de termorreificação. **Scientia Forestalis**, v.44, n.110, p.343-350, 2016.
- SCHNEIDER, P.R.; SCHNEIDER, P.S.P.; SOUZA, C.A.M. **Análise de regressão aplicada à engenharia florestal**. 2a. ed., Santa Maria: FACOS-UFSM, 2009. 294p.
- SOUZA, G.S. **Introdução aos modelos de regressão linear e não linear**. Brasília: EMBRAPA, 1998. 505p.
- SOUZA, M.O.A.; SILVA, J.C., DELLA LUCIA, R.M.; EVANGELISTA, W.V. Avaliação da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* dehn e *Eucalyptus urophylla* s.t. blake em ensaios de usinagem, visando à produção moveleira. **Revista Árvore**, v.33, n.4, p.751-758, 2009.
- TERRA, D.L.C.V.; ANDRADE, V.C.L.; FREITAS, B.C. Identidade de modelos volumétrico e de afilamento para *Corymbia citriodora*. **Advances in Forestry Science**, v.5, n.1, p.269-274. 2018.
- THOMAS, C.; ANDRADE, C.M.; SCHNEIDER, P.R.; FINGER, C.A.G. Comparação de equações volumétricas ajustadas com dados de cubagem e análise de tronco. **Ciência Florestal**, v.16, n.3, p.319-327, 2006.
- TORRES, C.M.M.E., OLIVEIRA, A.C., PEREIRA, B.L.C., JACOVINE, L.A.G., OLIVEIRA NETO, S.N., CARNEIRO, A.C.O.; TORRES, C.M.M.E. Estimativas da produção e propriedades da madeira de eucalipto em Sistemas Agroflorestais. **Scientia Forestalis**, v.44, n.109, p.137-148, 2016.
- VITTI, M.A.S.; BRITO, O.J. Avaliação do rendimento e o teor de citronela do óleo essencial de procedências e raças locais de *Eucalyptus citriodora*. **Scientia Forestalis**, v.1, n.56, p.145-154, 1999.