

Forma do fuste de árvores de *Tectona grandis* em diferentes espaçamentos

Diogo Guido Streck Vendruscolo^{1*} Ronaldo Drescher¹ Samuel de Pádua Chaves e Carvalho¹ Hudson Santos Souza¹ Raiane Scandiane da Silva² Arthur Guilherme Schirmbeck Chaves³

¹Faculdade de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367, 78060-900, Cuiabá-MT, Brasil.

²Departamento de Agronomia, Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT) Campus Cáceres, Av. Tancredo Neves, 1095 - Cavalhada II, CEP: 78200-000, Cáceres-MT, Brasil.

³Faculdade de Engenharia Florestal, Setor de Engenharia Florestal, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso (IFMT) Campus Cáceres, Av. dos Ramires, s/n, CEP: 78200-000, Cáceres-MT, Brasil.

* Author for correspondence: diogoguido@hotmail.com

Received: 25 April 2016 / Accepted: 19 July 2016 / Published: 30 September 2016

Resumo

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do espaçamento de plantio na forma do fuste de árvores de *Tectona grandis*. Os dados foram obtidos de um experimento com teca composto por quatro espaçamentos de plantio sendo: 3x2 m, 4x2 m, 5x2 m e 6x2 m. Aos 15 anos de idade foram abatidas e cubadas 30 árvores por espaçamento que compuseram a base de ajuste do modelo polinomial de grau 5, proposto por Schöepfer (1966). O Modelo foi ajustado por espaçamento, resultando em quatro equações diferentes, que foram avaliadas por meio de indicadores estatísticos e análises gráficas de resíduos. Para verificar se há igualdade entre a forma dos fustes, foi aplicado testes de identidade de modelos. Independentemente do espaçamento de plantio, o modelo utilizado propiciou estimativas precisas dos diâmetros com casca ao longo do fuste nos quatro espaçamentos. Os resultados do teste de identidade de modelos indicaram que o perfil do fuste das árvores dos espaçamentos 3x2 m e 4x2 m pode ser expresso pela mesma equação de afilamento. Conclui-se ainda que espaçamentos menores apresentaram árvores mais cilíndricas em relação aos espaçamentos maiores.

Palavras-chave: Teca; Afilamento; Densidade de plantio; Identidade de modelos.

Stem form of *Tectona grandis* trees in different spacings

Abstract

The aim of this study was to evaluate the effect of planting space in the form of stem tree *Tectona grandis*. The data were obtained from an experiment with teak, consisting of four planting spacings being: 3x2 m, 4x2 m, 5x2 m and 6x2 m. At 15 years of age were felled and cubed 30 trees per spacing used for adjustment of the degree of polynomial model 5, proposed by Schöepfer (1966). The model was adjusted by spacing resulting in four different equations which were evaluated by statistical analysis and graphical indicators residues. To check for equality between the shape of the bole, model identity test was applied. Regardless of planting spacing, the used model has provided accurate estimates of diameter with bark along the bole in the four spacings. The results of the model identity test indicated that the shaft profile of the trees spacings 3x2 m and 4x2 m can be expressed by the same equation taper. It also concludes that smaller spacings showed more cylindrical trees over larger spacings.

Key words: Teak; Taper; Planting density; Identity models.

Introdução

Uma boa gestão florestal requer informações precisas sobre o estoque de crescimento atual e potencial de crescimento futuro dos povoamentos. Funções para descrever a forma do fuste de árvores em função do

diâmetro e da altura são ferramentas que podem ser utilizadas pelos gestores florestais para fornecer informações precisas e oportunas no planejamento florestal.

O rendimento de conversão de toras em madeira serrada dependente da presença de nós, protuberâncias e da forma do fuste das árvores (Grosser 1980; Nassur et al. 2013). Árvores mais cilíndricas resultam em maior rendimento de conversão em serrarias e em processos de laminação. Estudos revelam que em plantios mais adensados, as árvores tendem a ser mais cilíndricas (Baldwin et al. 2000; Nogueira et al. 2008; Campos e Leite 2013).

O afilamento de uma árvore é definido pela taxa de decréscimo do diâmetro (di), ao longo do tronco. A relação d/dap ao longo do fuste é conhecida no meio florestal como taper ou, no Brasil, como afilamento (Campos e Leite 2013). Essa relação pode variar de acordo com o material genético, idade, espaçamento, regime de corte, desbaste e da capacidade produtiva local (Nogueira et al. 2008; Campos e Leite 2013).

Diferentes modelos de regressão têm sido desenvolvidos e propostos para modelar o perfil do fuste, contemplando as mais variadas formas de fuste e espécies (Campos e Leite 2013). Esses tipos de modelos servem para estimar três características básicas: o diâmetro (di) em uma determinada altura (hi), para estimar a altura (hi) onde ocorre um diâmetro (di) qualquer e o volume (v) entre duas alturas quaisquer (hi e hn), e permitem modelar a forma do fuste da árvore ao longo de sua vida (Kozak et al. 1969).

No Brasil, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos para representar o perfil dos fustes para espécies dos gêneros *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. (Nogueira et al. 2008; Kohler et al. 2013; Müller et al. 2014; Souza et al. 2016). No entanto, pesquisas com *Tectona grandis* ainda são escassas destacando-se os trabalhos de Figueiredo et al. (2006) e Favalessa et al. (2012), porém estes trabalhos não avaliam o comportamento do afilamento em função do espaçamento inicial de plantio.

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito do espaçamento de plantio na forma do fuste de árvores de teca na região de Cáceres, Mato Grosso.

Material e métodos

Caracterização da área de estudo

A pesquisa foi realizada no Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Mato Grosso - IFMT, campus de Cáceres. O clima da região é caracterizado por uma estação seca com precipitação média mensal de 37,8 milímetros de abril a setembro. A precipitação total anual varia de 1.300 a 1.600 mm e a temperatura média de 24 a 26°C (Alvares et al. 2013; Ugulino et al. 2014). O relevo do terreno é plano e o solo é do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Passos et al. 2006).

O plantio de teca foi realizado em dezembro de 1998, utilizando mudas seminais, em covas de 40x40 cm, fertilizadas com 190 g de superfosfato simples e 10 g de Frited Trace Elements BR-15. No primeiro ano foram realizadas manualmente três capinas e duas adubações de cobertura, aos 60 e 270 dias, respectivamente, aplicando 95 g/cova de NPK 20-05-20 e 5 g/cova de FTE BR-15.

As desramas artificiais das árvores foram feitas aos 9, 14 e 22 meses de idade. Foram feitas três capinas: aos 30 e 90 dias e aos 14 meses, e roçada mecanizada aos 17 e 22 meses (Passos et al. 2006). Os povoamentos foram avaliados aos 16 anos, e foram caracterizados como completamente estocados por não ter sido aplicada nenhuma prática de desbaste na área.

Base de dados

Os dados foram coletados de um plantio com teca composto por quatro espaçamentos de plantio (tratamentos), sendo: 3x2 m, 4x2 m, 5x2 m e 6x2 m com três repetições em delineamento em blocos ao acaso. Cada parcela possui 150 covas, independente do espaçamento e desconsiderando uma linha de bordadura entorno de cada parcela.

Os diâmetros com casca à altura de 1,3 m do solo (DAP) de todas as árvores nos quatro tratamentos foram mensurados. Posteriormente agrupou-se os diâmetros em classes com amplitude fixa em 5 cm e abateu-se 30 árvores por classe de diâmetro e tratamento, totalizando 120 árvores (Tabela 1). Nas árvores abatidas foram realizadas medições da altura total (H) e das circunferências ao longo dos fustes nas seguintes posições: 0,1 m, 1,3 m e a partir deste ponto a cada dois metros até a primeira bifurcação (altura comercial). Determinado o ponto da primeira bifurcação as medições foram obtidas a cada 1 metro seguindo pelo fuste principal até o diâmetro mínimo de 5 cm.

Tabela 1. Número total de árvores amostradas por classe diamétrica e por espaçamento.

Classe de DAP (cm)	Espaçamento (m)			
	3x2	4x2	5x2	6x2
5 – 10	2	2	1	0
10 – 15	9	5	5	2
15 – 20	16	15	15	11
20 – 25	3	7	7	14
25 – 30	0	1	2	3
Total	30	30	30	30

Estudo da forma do fuste

Com os dados de diâmetros nas diferentes posições dos fustes das árvores, adotou-se como procedimento padrão o ajuste do modelo de afilamento proposto por Schöpfer (1966) (Eq. 1), para cada tratamento, resultando, portanto em quatro equações.

Optou-se pelo modelo polinomial de Schöpfer por ser amplamente empregado no meio florestal e em grande número de casos os mais diversos autores relataram sua eficiência em estimar o diâmetro ao longo do fuste de diferentes espécies (Souza et al. 2008; Yoshitani Junior et al. 2012; Kohler et al. 2013).

$$d_{ij} = DAP \left[\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_{ij}}{H} \right) + \beta_2 \left(\frac{h_{ij}}{H} \right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h_{ij}}{H} \right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h_{ij}}{H} \right)^4 + \beta_5 \left(\frac{h_{ij}}{H} \right)^5 \right] + \varepsilon \quad (1)$$

Em que: d_{ij} = diâmetro da i -ésima árvore na j -ésima posição do fuste (cm); DAP = diâmetro a 1,3 m do solo (cm); β_i = parâmetros a serem estimados; H = altura total (m); h_{ij} = altura da i -ésima árvore na j -ésima posição do fuste (m).

A precisão e acurácia do modelo foram avaliadas por meio do coeficiente de correlação múltipla entre os diâmetros observados e estimados, pela raiz quadrada do erro quadrático médio em porcentagem e complementadas pela análise gráfica dos resíduos.

A correlação entre os valores observados e estimados (Eq. 2) mede o grau de correlação entre o diâmetro observado (d_i) e o diâmetro estimado (\hat{d}_i) pela equação, embora não permita inferir diretamente sobre igualdade das unidades entre valores observados e estimados (Campos e Leite 2013). A correlação indica o grau de associação entre valores observados e estimados, que juntamente com a análise de resíduos, permite inferir sobre a qualidade da estimação, sendo S^2 a variância e cov a covariância.

$$r_{d_i \hat{d}_i} = \frac{cov(d_i, \hat{d}_i)}{\sqrt{S^2(d) S^2(\hat{d}_i)}} \quad (2)$$

A raiz do erro quadrado médio, RMSE, (Eq. 3) avalia a diferença quadrática média entre os valores observados e os valores estimados. Quanto menor o seu valor, melhor a precisão da estimativa (Mehntälto et al. 2006), sendo \bar{d}_i a média dos diâmetros na altura h_i observado e n é o número total de observações.

$$RMSE\% = \frac{100}{\bar{d}_i} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \hat{d}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

A análise gráfica consistiu na verificação estatística da dispersão dos erros (E) percentuais em relação aos valores observados e estimados pela equação (Eq. 4).

$$E\% = \frac{d_i - \hat{d}_i}{d_i} 100 \quad (4)$$

Posteriormente as quatro equações de afilamento foram comparadas pelo teste de identidade de modelos de Graybill (2000). A hipótese avaliada para esse teste foi de rejeição de H_0 somente se $F_{H0} \geq F_{\alpha}$, ao grau de confiabilidade de 95%. Para os ajustes das equações de afilamento e análises estatísticas deste trabalho utilizou-se o software R (R Core Team, 2015).

Resultados e discussão

Os parâmetros estimados e as estatísticas, $r_{d_i \hat{d}_i}$ e RMSE (%) obtidos nos ajustes do modelo de afilamento, para cada espaçamento, são apresentadas na Tabela 2. Devido a não significância do parâmetro β_5 este foi excluído do processo de modelagem.

Tabela 2. Parâmetros e estatísticas de ajustes das equações de afilamento para os quatro tratamentos para árvores de *Tectona grandis*.

Espaçamento (m)	Coeficientes					Estatísticas	
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	$r_{d_i \hat{d}_i}$	RMSE%
3x2	1,1770*	-2,8727*	6,7512*	-9,1124*	4,3538*	0,960	8,33
4x2	1,1767*	-3,0618*	8,6004*	-13,0240*	6,6621*	0,975	9,90
5x2	1,2247*	-3,3242*	9,2510*	-13,5210*	6,6511*	0,974	9,66
6x2	1,1746*	-2,9071*	8,4416*	-13,6993*	7,3863*	0,965	9,23

β_i = coeficientes de regressão; $r_{d_i \hat{d}_i}$ = coeficiente de correlação entre o diâmetro observado (d_i) e o diâmetro estimado (\hat{d}_i); RMSE% = raiz quadrada do erro médio em porcentagem e * significativo a 99% de confiabilidade.

Contudo, foi possível observar que o modelo apresentou ajuste satisfatório e semelhante entre os espaçamentos, com coeficiente de correlação alto ($>0,96$) e valores de raiz quadrada do erro médio baixos ($<10\%$). No entanto, as estatísticas avaliadas isoladamente não permitem inferir sobre a robustez do modelo uma vez que tratam-se de médias das variações das estimativas totais e são empregadas unicamente como um indicativo da qualidade do ajuste (Souza et al. 2016). Os gráficos de resíduos e de previsões (Figura 1) complementam os resultados das estatísticas utilizadas no estudo.

A boa qualidade obtida nos ajustes é confirmada pela análise gráfica. No geral, é possível perceber que os resíduos estão distribuídos uniformemente, o que indica boa precisão entre os valores estimados e observados, além de concentrados entre $\pm 3,0$ cm de erro, em todos os tratamentos. Observou-se ainda que houveram tendências da dispersão dos resíduos localizados na região mais próxima à base dos fustes (maiores diâmetros). Segundo Souza et al. (2008) e Souza et al. (2016) isso ocorre pois na porção basal da árvore ocorre uma variação brusca no diâmetro proporcionando maiores erros.

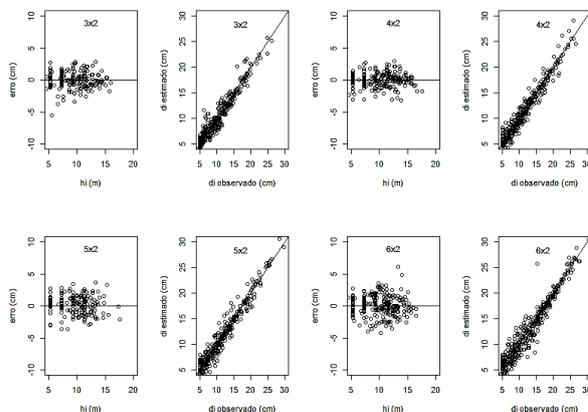


Figura 1. Distribuição dos resíduos e qualidade preditiva do modelo para os quatro tratamentos avaliados.

Com base nos resultados obtidos, é possível afirmar que o modelo empregado pode ser utilizado para a obtenção das estimativas dos diâmetros ao longo do fuste das árvores de teca. Segundo Souza et al. (2016) o modelo de Schöepfer é um polinômio de grau elevado, capaz de descrever curvas com as mais variadas formas, conferindo-lhe assim, bons resultados na maioria dos casos.

A aplicação do teste de identidade de modelos teve como finalidade verificar se a redução dos diâmetros (afilamento) ao longo do fuste das árvores é semelhante para dois ou mais tratamentos. Primeiramente o teste foi realizado para os quatro espaçamentos, e rejeitou-se a hipótese inicial de que não há diferença significativa entre as curvas, ou seja, pelo menos uma equação difere das demais, logo a soma de quadrados dos resíduos para os diferentes tratamentos não é estatisticamente igual à soma de quadrados do resíduo do modelo comum (Mc). Esses resultados apontam que um modelo único não pôde ser utilizado para o conjunto total de dados, que envolve plantios sob diferentes densidades, como também observado por Souza et al. (2016) para a espécie eucalipto. Em seguida foram conduzidos os testes aos pares de tratamentos para definição de quais os perfis de fustes diferem entre si (Tabela 3).

Nas combinações avaliadas entre os pares de tratamentos nos testes de identidade, foi aceita a hipótese de nulidade H_0 somente entre os tratamentos T1 (3x2) e T2 (4x2) indicando a igualdade da soma de quadrados dos

resíduos entre as equações. Portanto, a forma ou o afilamento dos fustes nesses espaçamentos não diferiram entre si.

Tabela 3. Resultados dos testes de identidade de modelos para as diferentes combinações de espaçamentos.

Condição	Rejeita-se H_0 se: $F_{H0} \geq F_{\alpha} (\alpha = 5\%)$		
	3x2	4x2	5x2
4x2	NS	S	S
5x2	S	S	S
6x2	S	S	S

NS = não significativo e S = significativo a 5% de probabilidade.

A Figura 2 ilustra o afilamento da árvore média de cada espaçamento conforme o resultado dos respectivos testes de identidade de modelos. Nota-se uma clara diferença do aumento do diâmetro conforme o acréscimo do espaçamento, como esperado do ponto de vista biológico e já relatado em diversos estudos (Rondon 2006; Leite et al. 2006; Pacheco et al. 2015). No entanto, observa-se que essa diferença de diâmetro tende a diminuir à medida que aumenta as alturas.

Segundo Campos e Leite (2013) no topo que os fustes tendem a apresentar as maiores diferenças quando submetidos a arranjos espaciais muito reduzidos. Schneider e Schneider (2008) afirmam que este evento ocorre em árvores dominadas sujeitas à competição intensa, pois nessas há uma tendência de ocorrer um maior incremento nas posições superiores do fuste, o que sustenta a teoria de que em espaçamento mais adensados as árvores tendem a apresentar forma mais cilíndrica.

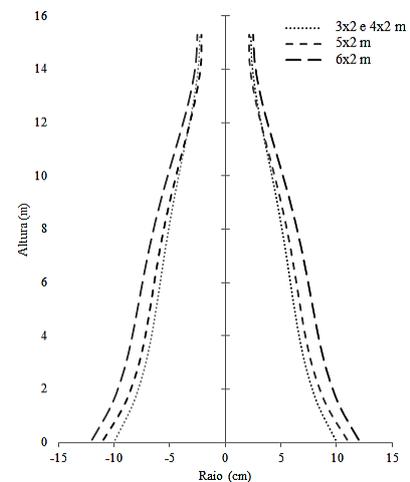


Figura 2. Perfis dos fustes de árvores de *Tectona grandis* em diferentes espaçamentos.

Resultados semelhantes foram encontrados por outros autores como em Rance et al. (2012), avaliando plantios de *Eucalyptus grandis*, submetidos a diferentes arranjos espaciais e sítios, na Austrália, observaram que árvores em idades juvenis apresentam fustes mais cilíndricos nos menores arranjos se comparados às árvores dos arranjos mais amplos. Nogueira et al. (2008) estudando o efeito do espaçamento na forma dos fustes de árvores de *Pinus taeda* no Planalto Serrano do Estado de Santa Catarina, verificaram que espaçamentos iniciais maiores resultam em maior conicidade do fuste de árvores.

Conclusões

O modelo de afilamento com 4 potências foi adequado para representar as variações do diâmetro nas alturas do fuste das árvores de *Tectona grandis* para os espaçamentos avaliados.

A forma das árvores nos espaçamentos 3x2 e 4x2 m se assemelham para o povoamento em estudo.

Agradecimentos

Ao IFMT campus Cáceres, pelo apoio e suporte técnico.

Referências

- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6):1-18. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- Baldwin VC, Peterson KD, Clark A, Ferguson RB, Strub MR, Bower DR (2000) The effects of spacing and thinning on stand and tree characteristics of 38-year-old loblolly pine. *Forest Ecology and Management*, 137(1):91-102. doi: 10.1016/S0378-1127(99)00340-0
- Campos JCC, Leite HG (2013) *Mensuração florestal: perguntas e respostas*. 4. ed. Viçosa: UFV. 605p.
- Favalessa CMC, Ubialli JÁ, Caldeira SF, Drescher R (2012) Funções de afilamento não segmentadas e segmentadas para *Tectona grandis* na região centro-sul matogrossense. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 32(72):373-387. doi: 10.4336/2012.pfb.32.72.373
- Figueiredo EO, Scolforo JRS, Oliveira AD (2006) Seleção de modelos polinomiais para representar o perfil e volume do fuste de *Tectona grandis* L. f. *Acta Amazonica*, 36(4):465-482. doi: 10.1590/S0044-59672006000400008
- Graybill FA (2000) *Theory and application of the linear model*. Belmont: Duxbury. 704p.
- Grosser D (1980) *Defeitos da madeira*. Curitiba: FUPEF. 63 p. (Serie Técnica, 2).
- Kohler, SV, Koehler HS, Figueiredo Filho A (2013) Modelos de afilamento para *Pinus taeda* por classes de idade. *Floresta e Ambiente*, 20(4):470-479. doi: 10.4322/loram.2013.039
- Kozak A, Munro DD, Smith JHG (1969) Taper function and their applications in forest inventory. *Forest Chronicle*, 45(4):278-283. doi: 10.5558/tfc45278-4
- Leite HG, Nogueira GS, Moreira AM (2006) Efeito do espaçamento e da idade sobre variáveis de povoamentos de *Pinus taeda* L. *Revista Árvore*, 30(4):603-612. doi: 10.1590/S0100-67622006000400013
- Mehtätalo L, Maltamo M, Kangas A (2006) The use of quantile trees in the prediction of the diameter distribution of a stand. *Silva Fennica*, 40(3):501-516. doi: 10.14214/sf.333
- Müller MD, Salles TT, Paciullo DSC, Brighenti AM, Castro RTC (2014) Equações de altura, volume e afilamento para eucalipto e acácia estabelecidos em sistema silvipastoril. *Floresta*, 44(3):473-484.
- Nassur OAC, Rosado LR, Rosado SCS, Carvalho PM (2013) Variações na qualidade de toras de *Toona ciliata* M. Roem. com dezoito anos de idade. *Cerne*, 9(1):43-49. doi: 10.1590/S0104-77602013000100006
- Nogueira GS, Leite HG, Reis GG, Moreira AM (2008) Influência do espaçamento inicial sobre a forma do fuste de árvores de *Pinus taeda* L. *Revista Árvore*, 32(5):855-860. doi: 10.1590/S0100-67622008000500010
- Pacheco JM, Figueiredo Filho A, Dias AN, Machado SDA, Lima R (2015). Efeito da densidade inicial no crescimento de *Pinus taeda* L. na região Centro Sul do Paraná. *Scientia Forestalis*, 43(106):353-365.
- Passos CAM, Bufulin L, Gonçalves MR (2006) Avaliação silvicultural de *Tectona grandis* L. f em Cáceres – MT. *Ciência Florestal*, 16(2):225-232.
- R Core Team (2015) *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Rance SJ, Mendham DS, Cameron DM, Grove TS (2012) An evaluation of the conical approximation as a generic model for estimating stem volume, biomass and nutrient content in young *Eucalyptus* plantations. *New Forests*, 43(1):109-128. doi: 10.1007/s11056-011-9269-5
- Rondon EV (2006) Estudo de biomassa de *Tectona grandis* L. f. sob diferentes espaçamentos no estado de Mato Grosso. *Revista Árvore*, 30(3):337-341. doi: 10.1590/S0100-67622006000300003
- Schneider PR, Schneider PSP (2008) *Introdução ao manejo florestal*. Santa Maria: FACOS-UFSM. 566p.
- Schöepfer W (1966) *Automatisierung des massen, sorten und wertberechnung stenender waldbestände schriftenreihe*. Bad.: Wurt-Forstl. n.p.
- Souza CAM, Chassot T, Finger CAG, Schneider PR, Fleig FD (2008) Modelos de afilamento para o sortimento do fuste de *Pinus taeda* L. *Ciência Rural*, 38(9):2506-2511. doi: 10.1590/S0103-84782008000900014
- Souza RR, Nogueira GS, Murta Junior LS, Pelli E, Oliveira MLR, Abrahão CP, Leite HG (2016) Forma de fuste de árvores de *Eucalyptus* em plantios com diferentes densidades iniciais. *Scientia Forestalis*, 44(109):33-40. doi: 10.18671/scifor.v44n109.03
- Ugulino B, Latorraca JVF, Tomazello Filho M (2014) Tree-ring growth response of teak (*Tectona grandis* L. f.) to climatic variables in central-west region of Brazil. *Scientia Forestalis*, 42(104):473-482.
- Yoshitani Junior M, Nakajima NY, Arce JE, Machado SDA, Druszcz JP, Hosokawa RT, Mello AAD (2012) Funções de afilamento para plantios desbastados de *Pinus taeda*. *Floresta*, 42(1):169-176. doi: 10.5380/ufv.v42i1.26315