



Modelos hipsométricos para eucalipto em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta

Hudson Santos SOUZA^{1*}, Antonio de Arruda TSUKAMOTO FILHO¹, Diogo Guido Streck VENDRUSCOLO¹, Arthur Guilherme Schirmbeck CHAVES², Alessandro Soares da MOTTA²

¹ Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.

² Departamento de Engenharia Florestal, Instituto Federal de Mato Grosso, Cáceres, Mato Grosso, Brasil.

* E-mail: hudson.ssh@hotmail.com

Recebido em outubro/2015; Aceito em janeiro/2016.

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi testar 10 modelos hipsométricos para eucalipto em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. O experimento foi implantado no município de Cáceres –MT em novembro de 2010. O plantio do eucalipto foi realizado em fileiras triplas (renques), com espaçamento de 3x3 m nos renques e 23 m entre os renques. Os valores do coeficiente de correlação múltipla (r_{yy}) variaram entre 0,6773 e 0,8239, sendo o maior valor pertencente à equação gerada pelo modelo 5. O modelo 5 também apresentou a menor raiz quadrada do erro médio em porcentagem (RQEM_%) de 7,78, sendo o mais acurado para estimativa da altura de eucalipto em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta.

Palavras-chave: sistema agroflorestal, altura total, modelos de regressão.

Hypsometric models for eucalyptus in a system for integrating crop-livestock-forest

ABSTRACT: The objective of this study was to test 10 hypsometric models for eucalyptus in a system for integrating crop-livestock-forest. The experiment was implemented in the city of Cáceres, MT, Brazil, in November 2010. The planting of eucalyptus was held in triple lines (rows), with distances of 3x3 m in the rows and 23 m among the rows. The multiple correlation coefficient values (r_{yy}) ranged from 0.6773 to 0.8239, where the highest value belongs to the equation generated by the model 5. The model 5 also showed the lowest square root of average error in terms of percentage (RQEM_%), totaling 7.78, and it was the most accurate value for estimating the height of eucalyptus in the system for integrating crop-livestock-forest.

Keywords: agroforestry system, total height, regression models.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui extensas áreas de florestas nativas e plantadas, onde grande parte de sua produção é destinada ao abastecimento do mercado interno e o restante exportada a outros países (MIRANDA et al., 2013). Segundo dados da IBÁ (2014), no país, a área de floresta plantada atingiu 7,60 milhões de hectares em 2013, crescimento de 2,8% na comparação com os 7,39 milhões de hectares de 2012. Os plantios de eucalipto representaram 72,0% desse total e de pinus 20,7%. De ocorrência natural na Austrália, o eucalipto possui cerca de 600 espécies adaptadas a diversas condições de solo e clima. A maioria das espécies conhecidas são árvores típicas de florestas altas, atingindo alturas que variam de 30 a 50 metros e de florestas abertas, com árvores menores, atingindo alturas entre 10 e 25 metros (MORA; GARCIA, 2000).

O eucalipto, por ser uma espécie florestal de rápido crescimento, também tem sido muito utilizado para compor sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta – iLPF (MACEDO et al., 2010). A iLPF é uma estratégia de produção sustentável, que integra atividades agrícolas, pecuárias e florestais, realizadas na mesma área (BALBINO et al., 2011). Nesse

cenário, estudos sobre a avaliação de variáveis dendrométricas da espécie do eucalipto em sistemas de iLPF são importantes para quantificação dos recursos disponíveis no plantio.

A altura das árvores é uma variável dendrométrica fundamental para a estimativa do volume de madeira em povoamentos florestais. Todavia, sua medição pelo uso de instrumentos é um procedimento que demanda muito tempo, recursos financeiros e que está sujeita a erros. Nesse contexto, o uso de relações hipsométricas constitui uma importante ferramenta para tornar as atividades dos inventários florestais mais econômicas e precisas, pois permitem estimar a altura das árvores por meio do diâmetro, que é uma variável de fácil obtenção (MANFREDI et al., 2013). Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi testar modelos hipsométricos para eucalipto em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no município de Cáceres – MT.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização do experimento

A pesquisa foi realizada em um sistema de iLPF no município de Cáceres - MT. Segundo Ugulino et al. (2014), o clima regional

é caracterizado por uma estação seca com precipitação média mensal de 37,8 milímetros de abril a setembro. A precipitação média anual varia de 1300 a 1600 mm e a temperatura média de 24 a 26 °C (ALVARES et al., 2013). O relevo do terreno é plano e o solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (PASSOS et al., 2006).

2.2. Implantação do experimento

O experimento foi implantado em novembro de 2010, sendo o plantio do eucalipto realizado em fileiras triplas (renques), com espaçamento de 3x3 m nos renques e 23 m entre os renques. O preparo de solo foi pelo método convencional (gradagem pesada + niveladora) e nas linhas de plantio foi feito um sulco de profundidade média de 50 cm. O plantio foi realizado manualmente. A cultura agrícola plantada entre os renques do eucalipto foi o milho, e atualmente pastagem do tipo braquiária.

2.3. Coleta dos dados

Os dados foram obtidos por meio de inventário florestal, sendo mensurado o diâmetro com casca a 1,3 m de altura (dap) e a altura (h) total de 451 árvores. As principais características descritivas dos dados de dap e h estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1. Estatística descritiva do diâmetro a 1,3 m de altura em cm (dap) e altura total em m (h) do eucalipto aos 48 meses de idade

Variável	Min.	Méd.	Max.	D.P.
dap	4,07	14,45	21,48	3,41
h	5,50	11,90	15,00	1,63

Min = Mínimo; Méd = Média; Máx = Máximo; D.P. = Desvio Padrão

2.4. Modelos testados

Foram testados 10 modelos hipsométricos da literatura florestal (Tabela 2). Para os ajustes dos modelos a base de dados foi dividida em dois conjuntos, sendo 78% dos dados empregados para os ajustes dos modelos, e 22% para a validação. Os ajustes foram feitos utilizando o software Excel para os modelos lineares, e para os não-lineares o programa CurveExpert versão 1.4 (HYAMS, 1993).

Tabela 2. Modelos de relação hipsométrica utilizados

Número	Modelo
1	$\ln h = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{dap} + \varepsilon_i$
2	$\ln h = \beta_0 + \beta_1 (1/\text{dap}) + \varepsilon_i$
3	$h = \beta_0 + \beta_1 (1/\text{dap}) + \beta_2 (1/\text{dap}^2) + \varepsilon_i$
4	$h = \beta_0 + \beta_1 \text{dap} + \beta_2 \text{dap}^2 + \varepsilon_i$
5	$h = \beta_0 + \beta_1 \text{dap} + \beta_2 \text{dap}^2 + \beta_3 \text{dap}^3 + \varepsilon_i$
6	$h = \beta_0 + \beta_1 (1/\text{dap}^2) + \varepsilon_i$
7	$h = \beta_0 / [1 + \beta_1 \exp(-\beta_2 \text{dap})] + \varepsilon_i$
8	$h = \beta_0 / [1 + \exp(\beta_1 - \beta_2 \text{dap})]^{(1/\beta_3)} + \varepsilon_i$
9	$h = \beta_0 \exp(-\exp(\beta_1 - \beta_2 \text{dap})) + \varepsilon_i$
10	$h = \beta_0 - \beta_1 \exp(-\beta_2 \text{dap}^{\beta_3}) + \varepsilon_i$

dap = diâmetro a 1,3 m (cm); h = altura total (m); β_0 , β_1 , β_2 e β_3 = coeficientes.

2.5. Critérios de avaliação de modelos

A qualidade dos ajustes, para escolha da melhor equação foi avaliada pelas seguintes estatísticas: coeficiente de correlação múltipla - r_{yy} (Equação 1), raiz quadrada do erro médio em percentagem - RQEM_% (Equação 2) e análise gráfica da altura total observada versus altura total estimada.

$$r_{yy} = n^{-1} \left[\sum_{i=1}^n (\hat{h}_i - \hat{h}_m)(h_i - \bar{h}) \right] / \sqrt{\left[n^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{h}_i - \hat{h}_m)^2 \right] \left[n^{-1} \sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2 \right]} \quad (1)$$

$$RQEM_{\%} = \frac{100}{\bar{h}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \hat{h}_i)^2}{n}} \quad (2)$$

em que: h = altura total observada; \hat{h} = altura total estimada; \bar{h} = média das alturas totais observadas; e n = número de casos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros dos modelos estão apresentados na Tabela 3.

Avaliando os resultados dos coeficientes de correlação múltipla (r_{yy}) (Tabela 4), de maneira geral houve pouca variação dos valores, denotando que os modelos avaliados apresentaram bom ajuste para a estimativa da variável altura em função do dap. No entanto, de acordo com Scolforo (1998), tratando-se de relações hipsométricas, é comum que o valor de R²aj não ultrapasse 0,8, uma vez que a correlação altura/diâmetro não é tão forte quanto a altura/volume. Todos os modelos avaliados apresentaram valores de r_{yy} maiores que 0,8, exceto o modelo 6, que apresentou o menor r_{yy} e a maior raiz quadrada do erro médio em percentagem. O modelo 5 foi o que apresentou o maior coeficiente de correlação múltipla (r_{yy}) e menor raiz quadrada do erro médio em percentagem.

No trabalho realizado por Neto et al. (2010) com modelos hipsométricos para eucalipto em sistema agrossilvipastoril, os valores de coeficiente de determinação ajustado variaram de 0,32 a 0,98. A raiz quadrada do erro médio em percentagem variou de 13,5 a 25,6. Mendonça et al. (2015), ao avaliarem modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* encontraram valores de R²aj. para os modelos que variaram de 0,5515 até 0,8078. No trabalho desenvolvido por Sousa et al. (2013) com relações hipsométricas para *Eucalyptus urophylla* conduzidos sob regime de alto fuste e talhadia, no povoamento em alto fuste os valores de R²aj em sua maior parte foram inferiores a 0,5000, já no povoamento

Tabela 3. Estimativa de parâmetros dos modelos hipsométricos para eucalipto em sistema de iLPF em Cáceres – MT

Modelo	β_0	β_1	β_2	β_3
1	1,2568	0,4586	-	-
2	2,8281	-4,8536	-	-
3	17,9460	-98,9709	215,8181	-
4	5,2045	0,5556	-0,0060	-
5	-0,9098	2,1575	-0,1347	0,0032
6	13,0706	-188,2673	-	-
7	17,9043	2,0219	0,0974	-
8	18,9341	-27385	0,0705	0,0504
9	19,0029	0,2237	0,0691	-
10	108,9360	110,0954	0,0406	0,4284

Tabela 4. Coeficiente de correlação múltipla (r_{yy}) e raiz quadrada do erro médio em percentagem (RQEM_%) para os modelos avaliados para eucalipto

Modelo	r_{yy}	RQEM _%
1	0,8182	7,99
2	0,8080	8,33
3	0,8019	8,20
4	0,8110	8,03
5	0,8239	7,78
6	0,6773	10,10
7	0,8089	8,07
8	0,8101	8,05
9	0,8102	8,05
10	0,8137	7,98

sob regime de talhadia, os modelos ajustados apresentaram maior variação dos valores, variando de 0,1791 a 0,9382. Ao

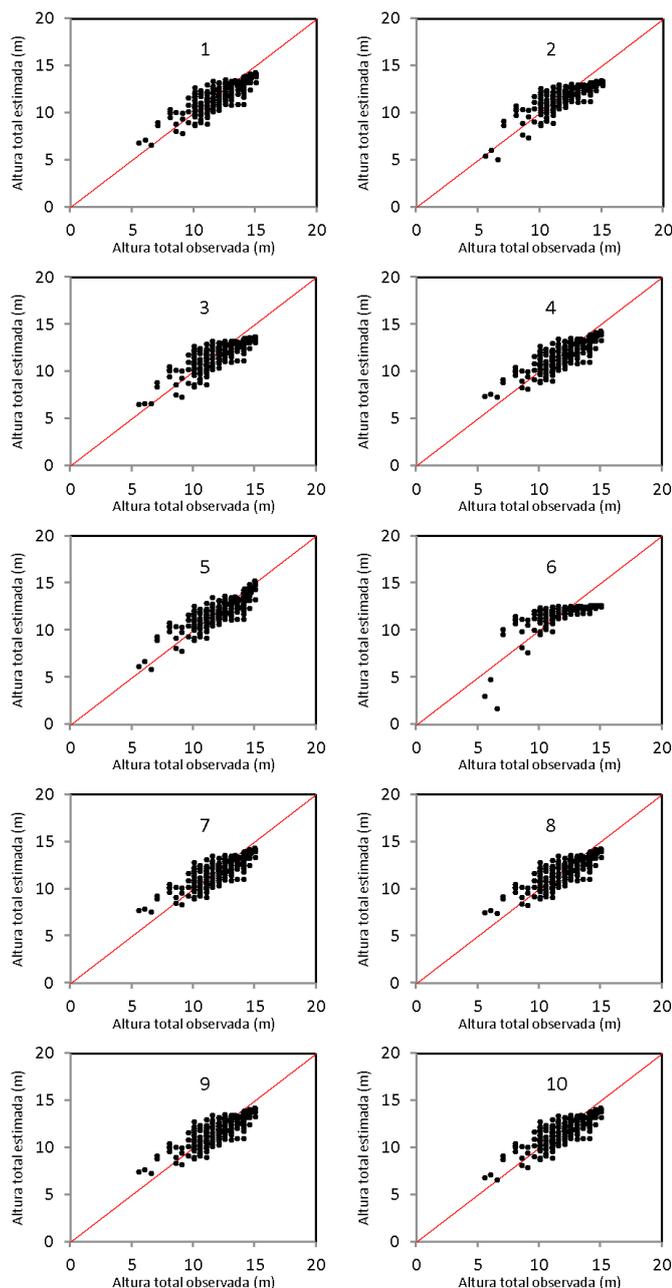


Figura 1. Altura total observada versus altura total estimada pelos modelos hipsométricos

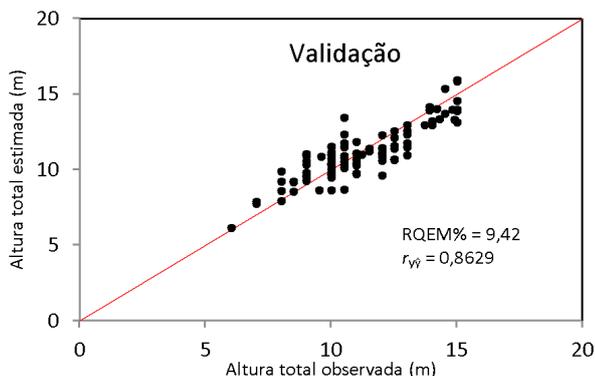


Figura 2. Altura total observada versus altura total estimada pelo modelo 5 aplicado nas árvores tiradas para validação das equações

analisar a altura total observada versus altura total estimada pelos modelos hipsométricos (Figura 1) o modelo 5 apresentou a distribuição com menor tendenciosidade dos dados, já o modelo 6 foi o que apresentou uma acentuada tendência em subestimar a altura das árvores.

Verificou-se dentre os modelos testados que o modelo 5 foi o mais acurado para estimar a altura de eucalipto aos 4 anos de idade, nisto, foi aplicado o modelo nas árvores tiradas para a validação (Figura 2) das equações.

4. CONCLUSÕES

O modelo hipsométrico 5 foi o mais acurado para estimativa da altura de eucalipto em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta.

5. AGRADECIMENTO

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de mestrado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONCALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Stuttgart, v. 22, p. 1-18, 2013. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. **Marco referencial em integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF)**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011.
- HYAMS, D. *CurveExpert 1.4*. Microsoft Corporation, 1993. Disponível em: <<http://www.curveexpert.net/curveexpert-basic>>. Acesso em 20 agosto 2015.
- IBÁ - **Indústria Brasileira de Árvores**. Disponível em: <http://www.iba.org/images/shared/iba_2014_pt.pdf>. Acesso em: 20 agosto 2015.
- MACEDO, R. L. G.; VALE, A. B.; VENTURIN, N. **Eucalipto em sistemas agroflorestais**. 1 ed. Lavras: UFLA, 2010, 331p.
- MANFREDI, C.; ALVES, T. F.; BARRETO, P. A. B. Modelos hipsométricos para *Genipa americana* L. em plantio homogêneo no município de vitória da conquista, Bahia. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v. 9, n. 16, p. 1495-1502, 2013.
- MENDONÇA, R. A. DE; CORANDIN, M. C.; PACHECO, G. R.; VIEIRA, G. C.; ARAÚJO, M. DA S.; INTERAMNENSE, M. T. Modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v. 35, n. 81, p. 47-54, 2015. <http://dx.doi.org/10.4336/2015.pfb.35.81.710>
- MIRANDA, D. L. C.; AZEVEDO, F. F.; SANTOS, J. P. Determinação do volume de toras da espécie *Mezilaurus itauba* (Meissn.) Taub. *Scientia Plena*, São Cristóvão, v. 9, n. 8(a), p. 2013.
- MORA, A. L.; GARCIA, C. H. A. **Cultura do Eucalipto no Brasil**. São Paulo, SP: Sociedade Brasileira de Silvicultura. 114 p. 2000.
- NETO, S. P. DE M.; PULROLNIK, K.; VILELA, L.; MUNHOZ, D. J. DE M.; GUIMARÃES JUNIOR, R.; MARCHÃO, R. L. Modelos Hipsométricos para *Eucalyptus cloeziana* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em Sistema Agrossilvipastoril. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento** 286. Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, 2010.
- PASSOS, C. A. M.; BUFULIN, L.; GONÇALVES, M. R. Avaliação silvicultural de *Tectona grandis* L.f em Cáceres – MT. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 16, n. 2, p. 225-232, 2006.
- SCOLFORO, J. R. S. **Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. v. 1. 443 p.

- SOUSA G. T. O.; AZEVEDO G. B.; BARRETO P. A. B.; JÚNIOR V. C. Relações hipsométricas para *Eucalyptus urophylla* conduzidos sob regime de alto fuste e talhadia no Sudoeste da Bahia. **Scientia Plena**, São Cristovão, v. 9, n. 4, p. 1-7, 2013.
- UGULINO, B. LATORRACA, J. V. F.; TOMAZELLO FILHO, M. Tree-ring growth response of teak (*Tectona grandis* L.f) to climatic variables in central-west region of Brazil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 104, p. 473-482, 2014.