

EQUAÇÕES HIPNOMÉTRICAS PARA SISTEMAS FLORESTAIS DE CURTA ROTAÇÃO

Humberto de Jesus Eufrade-Junior¹, Luiz Alberto Blanco Jorge², Saulo P. S. Guerra³

¹Engenheiro Florestal e Mestre em Agronomia, Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP),
hdjejunior@fca.unesp.br

^{2,3}Professor Dr., Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP).

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas florestais de curta rotação (SFCR) são conduzidos em condições que diferem do manejo convencional com maior adensamento de plantio e doses de adubação, e menores ciclos de corte (EUFRADE-JUNIOR et al., 2017). Como são comumente utilizados para fins energéticos, a biomassa produzida é convertida em cavaco e direcionada para queima direta em caldeiras ou é processada na forma de briquetes e pellets, a fim de melhorar suas características físicas e térmicas (GUERRA et al., 2014).

Os SFCR são manejados de forma adensada em linhas simples ou duplas com intervalos de corte de dois a três anos. A densidade de plantio depende de fatores como a espécie e o tipo de sistema de colheita utilizado. No Brasil, o gênero *Eucalyptus* possui o maior rendimento para produção de biomassa em curto espaço de tempo, os plantios adensados dessa espécie conseguem atingir valores maiores de 50 m³ de madeira por hectare (20 a 25 toneladas por hectare ano) em ciclos de um ano no espaçamento 3m x 0,5m - 6667 árvores.ha⁻¹ (MÜLLER, 2005; GARCIA, 2013) até 120m³.ha⁻¹.ano⁻¹ (45 toneladas por hectare ano) em condições ótimas de manejo (GUERRA et al., 2012). Em outros países que utilizam essa tecnologia, os índices de produtividade brasileira só são alcançados com o dobro do tempo.

Ainda hoje, existem poucas informações acerca a relação hipsométrica (relação entre o diâmetro e altura) das árvores conduzidas com alta densidade de plantio. Desta forma, o objetivo deste estudo foi ajustar e avaliar o comportamento de diferentes modelos hipsométricos para estimar a altura total de indivíduos conduzidos em sistemas florestais de curta rotação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi implantado no município de Botucatu, estado de São Paulo, situado na longitude 48°26'42" W e latitude 22°53'09" S a 872m de altitude,

precipitação média de 1428 mm ano⁻¹ e temperatura média anual de 20°C . A classe de solo do local foi identificada como Latossolo Vermelho Amarelo.

Para este estudo, foram utilizados clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* (clone C219) com dois anos de idade plantados no espaçamento 2,8 m × 0,5 m (7142 árvores ha⁻¹) em três doses diferentes de adubação, detalhado na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos regimes de adubação no experimento

Fertilizantes	Dias após plantio	Dose 1	Dose 2	Dose 3
		g planta ⁻¹		
NPK (6-30-10)	0	35,0	70	140
NPK (19-00-19) + B (0.7%) e Zn (3%)	180	27,5	55	110
NPK (19-00-19) + B (0.7%) e Zn (3%)	360	27,5	55	110

Devido a similaridade das condições locais, o experimento foi instalado em um delineamento experimental inteiramente casualizado. Foi aberta uma parcela central de 450m² para cada tratamento e foram medidas todas as alturas totais e diâmetros à altura do peito (DAP) das árvores, respectivamente 98, 90 e 82 observações para os tratamentos com Doses 1, 2 e 3.

Para o ajuste das equações hipsométricas foram testados modelos aritméticos e logarítmicos descrito na literatura e apresentados na Tabela 2. A curva de regressão foi ajustada pelo método dos mínimos quadrados utilizando o Microsoft Excel[®] (2010).

Tabela 2. Modelos de equações hipsométricas utilizados neste trabalho

Nº	Modelo	Autor
1	$\frac{DAP}{\sqrt{H-1,3}} = b_0 + b_1 DAP$	Näslund
2	$\frac{DAP^2}{H-1,3} = b_0 + b_1 DAP + b_2 DAP^2$	Prodan
3	$\frac{1}{\sqrt[3]{H-1,3}} = b_0 + b_1 \frac{1}{DAP}$	Petterson
4	$H = b_0 + b_1 \log DAP$	Henriksen
5	$\log H = b_0 + b_1 \frac{1}{DAP}$	Curtis
6	$\ln H = b_0 + b_1 \ln DAP$	Stoffels

H = altura total da árvore (m); DAP = diâmetro à altura do peito (cm); b₀ = coeficiente do modelo; b₁ = coeficiente do modelo; b₂ = coeficiente do modelo; log = logaritmo de base 10; ln = logaritmo neperiano. Fonte: Soares et al., (2006); Jorge (2013).

A escolha do melhor modelo se deu pela análise gráfica da distribuição de resíduos em porcentagem, coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}\%$); erro padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) e o desvio médio percentual (DMP). Este último, calculado com a seguinte expressão:

$$DMP = \left(\frac{H_o - H_e}{H_o} \right) \times 100$$

Em que,

DMP= Desvio médio percentual (%);

H_o = Altura total observada (m);

H_e = Altura total estimada (m).

Para as Equações 5 e 6, a fim de eliminar a discrepância logarítmica, as alturas estimadas foram corrigidas pelo Índice de Meyer (IM), e posteriormente foi recalculado o erro padrão da estimativa para unidades aritméticas.

$$IM = e^{0,5(S_{xy})^2}$$

Em que,

IM= Índice de Meyer;

e = base dos logaritmos neperianos (constante de Euler);

S_{yx} = quadrado do erro-padrão da estimativa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os coeficientes e as estatísticas da qualidade do ajuste dos modelos hipsométricos testados estão apresentados na Tabela 3. Destaque para o alto coeficiente de determinação (maiores que 90%) dos modelos de Näslund e Prodan para os sistemas florestais estudados, independente da dose de adubação. Entretanto, para o modelo Prodan os coeficientes da equação b_0 e b_1 não foram significativos estatisticamente ($p>0,01$), demonstrando que os mesmos não exerceram influência na variável dependente e o modelo não descreveria por completo o fenômeno.

Com o aumento da adubação, ocorreu um decréscimo na precisão e qualidade do ajuste nas equações hipsométricas (menor $R^2_{aj.}$, maior S_{xy} e DMP). Sugere-se que a maior adubação (Dose 3) culminou no maior crescimento dos SFCR, antecipando a competição entre os indivíduos no tratamento por radiação solar no dossel da floresta.

Tabela 3. Coeficientes e estatística das equações hipométricas testados para os SFCR com espaçamento 2,8 × 0,5 m e diferentes doses de adubação

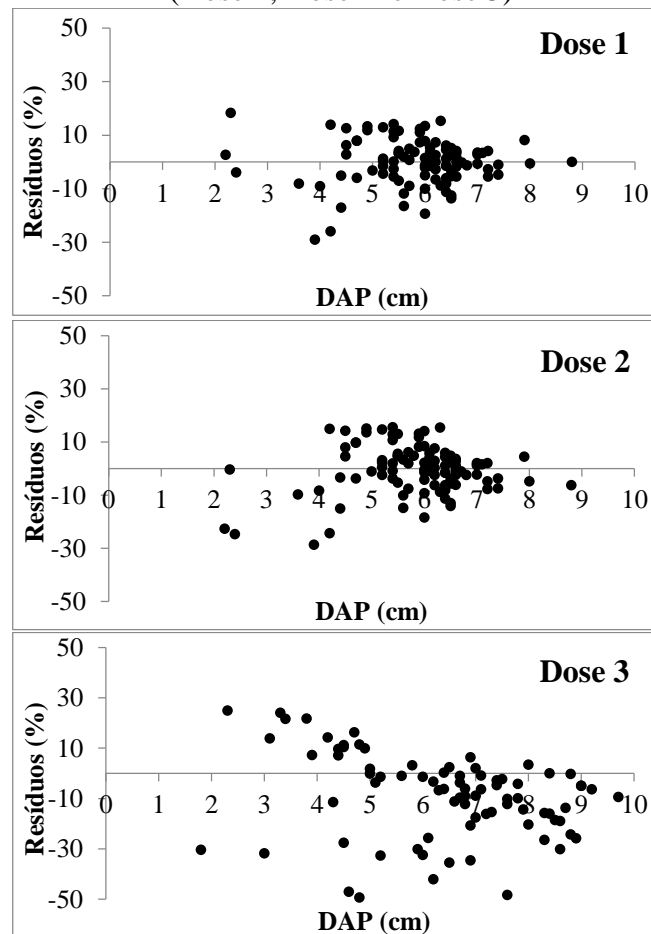
Modelos/Autor	b ₀	b ₁	b ₂	R ² aj.(%)	Syx (%)	DMP(%)
<i>Dose 1</i>						
Naslund	0,324665*	0,262837*		91,93	4,68	6,96
Prodan	1,088764*	-0,240274 ^{ns}	0,109423*	92,84	8,43	6,42
Curtis	1,198386*	-0,863422*		60,26	8,47	6,42
Petterson	0,397010*	0,400789*		64,14	8,93	6,89
Henriksen	4,152185*	9,213022*		64,14	8,74	7,12
Stoffels	1,632666*	0,440916*		52,61	9,15	7,34
<i>Dose 2</i>						
Naslund	0,353020*	0,265922*		93,89	4,58	7,62
Prodan	0,650345 ^{ns}	-0,048384 ^{ns}	0,094605*	93,23	8,90	7,23
Curtis	1,143385*	-0,654544*		75,88	9,07	7,82
Petterson	0,397010*	0,400789*		85,67	8,10	7,64
Henriksen	3,836518*	8,973891*		63,15	8,22	8,15
Stoffels	1,488693*	0,494281*		17,38	10,57	8,98
<i>Dose 3</i>						
Naslund	0,212265*	0,297896*		91,86	7,56	14,80
Prodan	0,650345 ^{ns}	-0,048384 ^{ns}	0,094605*	90,98	14,31	7,23
Curtis	1,098118*	-0,483977*		22,01	19,52	15,69
Petterson	0,439334*	0,244238*		25,49	17,25	16,13
Henriksen	7,205833*	4,136032*		13,90	13,73	16,16
Stoffels	1,933857*	0,221401*		17,38	20,93	18,44

b₀, b₁, b₂ = coeficientes da equação; R²aj. = coeficiente de determinação ajustado; Syx= erro padrão da estimativa; DMP= desvio médio percentual; * = significativo a 1% (p<0,01) pelo Teste t-Student; ^{ns} = não significativo a 1% (p>0,01) pelo Teste t-Student.

O modelo Näslund apresentou o menor S_{xy} que as demais equações evidenciando a maior precisão na estimativa das alturas das árvores de todos os tratamentos. Os resultados encontrados estão de acordo com o obtido por Souza et al. (2017) que encontraram uma melhor qualidade de ajuste para o modelo Näslund estudando a relação altura-diâmetro de *Eucalyptus urophylla* e *E. grandis* com idade de oito anos, estabelecido sob o espaçamento 3 m × 3 m no sudoeste do Pará.

Foi possível observar que a distribuição gráfica dos resíduos do modelo Näslund foi homogênea para os SFCR com Doses 1 e 2, já para a Dose 3 o ajuste subestimou as alturas das árvores com maiores diâmetros (Figura 1). Essa mesma tendência foi observada para os demais modelos testados.

Figura 1. Distribuição gráfica dos resíduos do modelo Näslund para os tratamentos (Dose 1, Dose 2 e Dose 3)



Apesar de diversos trabalhos abordarem a relação hipsométrica em florestas comerciais de eucalipto (Soares et al., 2004; Silva et al., 2015; Souza et al., 2017), são poucas as pesquisas que estudaram essa relação para florestas energéticas jovens e com alto densidade de plantio.

4 CONCLUSÕES

O modelo hipsométrico de Näslund obteve um melhor desempenho na estimativa da altura total das árvores conduzidas em sistemas florestais de curta rotação. Com o aumento da adubação, ocorreu um decréscimo na precisão das equações hipsométricas.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHRISTOPHERSON, N. S.; MATTSON, J. A. Mechanization of the operational aspects of short-rotation forestry. *Biomass, Barking - England*, v. 22, n. 1 – 4. p. 123-133, 1990.

EUFRADE-JUNIOR, H. J.; BALLARIN, A. W.; VILLAMAGUA-VERGARA, G. C.; GUERRA, S. P. S. Efecto del manejo silvícola sobre la densidad básica de la madera en sistemas forestales de rotación corta. *Maderas. Ciencia y tecnología*, v.19, n.3, p.285-292, 2017.

GARCIA, E.A.; GUERRA, S.P.S.; LANÇAS, K.P.; EUFRADE JUNIOR, H.J. ; YAMAJI, F.M.; SANSIGOLO, C.A. Componentes químicos da madeira com casca proveniente do sistema florestal de curta rotação. *Revista Árvore*, v. 40, n. 1, p.163-171, 2016.

GUERRA, S. P. S.; LANÇAS, K. P.; GARCIA, E. A.; SPINELLI, R. Eucalipto adensado: manejo para florestas energéticas. In: LEMOS, E. G. M.; STRADIOTTO, N. R. (org.) *Bioenergia: desenvolvimento, pesquisa e inovação*. São Paulo, Editora Unesp, 2012. p. 125-161.

GUERRA, S. P. S.; GARCIA, E. A.; LANÇAS, K. P.; REZENDE, M. A.; SPINELLI, R. Heating value of eucalypt wood grown on SRC for energy production. *Fuel*, v. 137, p. 360–363, 2014.

JORGE, L.A.B. *Dendrometria*. Botucatu: Departamento de Ciência Florestal, FCA – UNESP, 2013. 65p.

MÜLLER, M. D. *Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba*. 2005, 108 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG, 2005.

SILVA, A. J.; SILVA FILHO, J. L. F.; SILVA, M. D. T.; ROQUE, C. G.; CUNHA, F. F. Ajuste de modelos hipsométricos e volumétricos para três clones de eucalyptus em Mineiros-GO. *Nucleus*, v.12, n.2, p.221-230, 2015.

SOARES, C.P.B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A.L. *Dendrometria e Inventário Florestal*. Viçosa: Editora UFV, 2006. 276p.

SOARES, T. S.; SCOLFORO, J. R. S.; FERREIRA, S. O.; MELLO, J. M. Uso de diferentes alternativas para viabilizar a relação hipsométrica no povoamento florestal. *R. Árvore*, Viçosa-MG, v.28, n.6, p.845-854, 2004

SOUZA, A. S.; SANTOS, J. X.; SOUZA, D. V. Modelagem da relação hipsométrica para um povoamento híbrido de eucalipto na amazônia brasileira. *BIOFIX Scientific Journal* v. 2 n. 1 p. 44-53 2017.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA/UNESP), ao Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN), ao Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia (LABB) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).