



Modelagem de biomassa por unidade de área em plantações de *Eucalyptus* no estado de Minas Gerais

Luiz Henrique Fiorucci ¹, Denise Jeton Cardoso ², Marilice Cordeiro Garrastazú ²,
Maria Augusta Doetzer Rosot ²

¹ UFPR - Universidade Federal do Paraná. luiz_fiorucci7@hotmail.com

² EMBRAPA Florestas.

Resumo

Este trabalho teve como objetivo estimar a quantidade de biomassa seca em plantios de *Eucalyptus* no estado de Minas Gerais, a partir de resultados de 244 parcelas de inventário florestal, considerando variações de qualidade do sítio, área basal e idade entre 2 e 8 anos. Foi estabelecida a classificação de sítio, com ajuste de equação utilizando os dados de idade e altura dominante. A biomassa total por hectare foi calculada multiplicando-se o volume por hectare pela densidade da madeira de *Eucalyptus grandis* e por um fator de expansão de biomassa. Avaliando-se a correlação entre biomassa total por hectare e variáveis ambientais e dendrométricas, verificou-se que a área basal e o índice de sítio foram as duas variáveis do povoamento de correlação mais alta, 0,93 e 0,64, respectivamente. Doze modelos foram ajustados para representar a quantidade de biomassa total por hectare tendo como variáveis independentes a área basal, o índice de sítio e a idade, bem como combinações entre estas. O modelo que apresentou melhor ajuste e precisão foi: $Bs = \exp[-6,7518 + 0,9567 \times \ln(G) + 0,0388 \times \ln^2(G) + 4,0732 \times \ln(IS) - 0,4799 \times \ln^2(IS)] \times 1,0020$, com R^2 ajustado de 0,955 e $Syx\%$ de 5,29%, e indicou valores de estoque de biomassa entre 39,7 e 174,9 Mg.ha⁻¹, para área basal entre 8,9 e 27,9 m².ha⁻¹. A aplicação do modelo ajustado, com as variáveis índice de sítio e área basal por hectare, pode estimar de maneira prática e precisa a biomassa total por hectare, por utilizar variáveis de simples obtenção e por ter sido gerada a partir de um conjunto de dados com pouca variabilidade atribuída ao material genético.

Palavras-chave: sítio; crescimento; plantação florestal.

1. Introdução

As florestas plantadas ocupavam área de aproximadamente 7,74 milhões de hectares no Brasil em 2014, sendo 71,9 % correspondentes a plantações de *Eucalyptus* spp, localizados principalmente nos estados de Minas Gerais (25,2%), São Paulo (17,6%) e Mato Grosso do Sul (14,5%), segundo IBA (2015). Embora o total de área plantada represente menos de 1% da área do território nacional, as plantações de *Eucalyptus* spp têm um incremento de estoque de carbono entre 5 e 16,5 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ aos 3 ou 4 anos e entre 7,5 (aos 5 anos) e 23,7 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ (aos 7,5 anos) em biomassa vegetal, (BRITTEZ *et al.*, 2006) para experimentos de diferentes espécies, locais e níveis de produtividade.

A quantificação do carbono de biomassa estocado nestas plantações, tal como a quantificação de volume de madeira, requer que se leve em consideração variáveis como espaçamento inicial de plantio, idade, espécie, material genético e características de produtividade (sítio), representadas por variáveis de solo e de clima.

Segundo Higuchi *et al.* (1998), as estimativas de biomassa florestal são informações imprescindíveis nas questões ligadas, entre outras, às áreas de manejo florestal e clima. Para Ketterings *et al.* (2001), a estimativa de biomassa acima do solo é fundamental nos estudos do balanço global de carbono.

A importância de se realizar estudos sobre biomassa e estoque de carbono em formações florestais é inquestionável, uma vez que a quantidade de biomassa está diretamente relacionada com o estoque de carbono, e consequentemente, tais estudos auxiliam o entendimento sobre as mudanças climáticas (SILVEIRA *et al.*, 2007).

Este trabalho teve como objetivo gerar uma equação para estimar a biomassa seca total por hectare, para *Eucalyptus grandis*, utilizando variáveis ambientais e/ou dendrométricas, de simples obtenção e baixo custo.

2. Material e Métodos

O estudo foi realizado tendo como base o resultado de inventário florestal de 244 parcelas instaladas e medidas em 2012 e 2013 em plantações florestais de clones de *Eucalyptus grandis* com idade entre 2 e 7 anos na primeira medição e entre 3 e 8 anos na segunda medição, na região Sudeste de Minas Gerais, na mesorregião Vale do Rio Doce. Para a análise das variáveis ambientais, utilizou-se o *software* ArcGIS, e para os cálculos com variáveis dendrométricas utilizou-se o Excel.

No bloco mais ao norte, entre Peçanha e Virginópolis, com altitude entre 802 e 922 m, o solo predominante é (LVd2) LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A moderado, textura muito argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado/montanhoso, com 35% de declividade. No bloco mais próximo ao rio Rio Doce, com altitude entre 215 e 296 m, predominam os solos (PVe12) ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico típico, A moderado, textura argilosa/muito argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo ondulado/forte ondulado (declividade 50%) e (LAd1) LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico, A moderado, muito profundo, textura argilosa e muito argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo ondulado e forte ondulado (declividade 50%).

O clima na região de Peçanha e Virginópolis é Cwa e, na região de Belo Oriente, Santana do Paraíso e Ipaba, é Aw, e a precipitação média anual nas duas regiões varia entre 1200 mm a 1300mm.

Caracterização dos dados

O conjunto de parcelas contém informações de inventário, como DAP médio entre 11,3 e 20,4 cm, altura média entre 13,5 e 31,2 m, área basal entre 8,9 e 27,9 m².ha⁻¹, número de árvores por hectare entre 467 e 1325 e incremento médio anual em volume até o diâmetro mínimo de 3 cm entre 10,7 e 66,7 m³.ha⁻¹.ano⁻¹.

Estimativa de biomassa

A biomassa do fuste com casca foi obtida pela multiplicação do volume do fuste com casca até o diâmetro de 3 cm pela densidade da madeira de *Eucalyptus grandis*. Utilizou-se o valor da densidade para plantios clonais, para as árvores de *Eucalyptus* em diversas idades, obtido em Scolforo *et al.* (2008), igual a 0,45 g.cm⁻³ para as idades entre 2 e 8 anos.

A quantidade total de biomassa das árvores, incluindo também galhos e folhas, foi calculada utilizando um fator de expansão de biomassa (FEB) para *Eucalyptus* (DALLA CORTE *et al.*, 2015).

A aferição das estimativas produzidas pelo FEB se deu pelo comparativo destas com o resultado publicado por Soares e Oliveira (2002), que apresenta a percentagem de biomassa de cada componente arbóreo (fuste, casca, galhos e folhas). Estas percentagens foram aplicadas ao valor de biomassa do fuste, sendo recuperado o valor da biomassa total das árvores. Ambos os cálculos apresentaram resultados bem similares, mas a escolha pelo FEB deu-se basicamente por apresentar resultados mais conservadores.

Classificação de sítio por altura dominante

Realizou-se o ajuste de três modelos que relacionam altura dominante (HD) e idade (Id), por regressão linear, o modelo semilogaritmico, modelo de Schumacher e modelo de Prodan. Selecionou-se o que gerou maior coeficiente de determinação ajustado (R²aj.), menor erro padrão da estimativa (Syx%) e melhor distribuição de resíduos. A definição das classes de sítio deu-se pelo método da curva guia ou média, conforme detalhado por Scolforo (1998). Assumiu-se idade índice igual a 6 anos, normalmente sendo a idade próxima da idade do corte raso em plantações de *Eucalyptus sp.*

Composição de modelos para estimativa do estoque de biomassa

Para chegar a uma equação que estimasse a biomassa seca total por hectare (BS.ha⁻¹), buscou-se na literatura equações de simples ou dupla entrada, já avaliadas para estimativa de volume. As variáveis independentes foram substituídas pelas variáveis que apresentaram maior correlação de Pearson com a biomassa, entre variáveis dendrométricas, como altura média, DAP médio, área basal e índice de sítio e variáveis ambientais, como tipo de solo, altitude, declividade e posição da exposição ao sol. Doze modelos foram ajustados, incluindo como variáveis independentes a área basal, o índice de sítio e a idade e ou combinações destas, conforme mencionado no item 3.

3. Resultados e Discussão

Classificação de sítio

Os três modelos ajustados para gerar a classificação de sítio tiveram syx% variando entre 8,87 e 9,1 % e R² ajustado entre 0,70 e 0,71 (Tabela 1), sendo selecionado o modelo 2, por apresentar a distribuição de resíduos mais homogênea e mais próxima do eixo X. A maioria dos pontos concentra-se entre ± 10%.

Tabela 1 – Coeficientes e estatísticas de ajuste e precisão para as equações de sítio.

| Modelo | Equações ajustadas | S _{yx} % | R ² ajustado | F |
|--------|---|-------------------|-------------------------|-----------|
| 1 | HD = 10,38646 + 9,643088 × Ln(Id) | 9,10 | 0,704 | 632,57** |
| 2 | HD = exp $\left(3,561341 - 1,49531 \times \left(\frac{1}{Id} \right) \right) \times 1,004231$ | 8,87 | 0,719 | 921,43** |
| 3 | HD = $\frac{Id^2}{(0,151032 - 0,02229 \times Id + 0,036262 \times Id^2)}$ | 9,03 | 0,709 | 2431,18** |

Na equação 2 foi aplicado o Fator de correção de Meyer, sendo recalculados S_{yx}% e R² ajustado.

Três classes de sítio foram estabelecidas, considerando a amplitude de altura dominante observada na idade de referência (6 anos), entre 21 e 34,5 m (Tabela 2). Os valores de índice de sítio podem ser calculados pela equação transformada (1), onde IS = índice de sítio na idade de referência, HD= altura dominante obtida no inventário (m), Id= idade na ocasião do inventário (anos) e a idade de referência estabelecida é 6 anos.

$$IS = \exp\{\ln(HD) + [-1,49531 \times (1/6 - 1/Id)]\} \quad [1]$$

Tabela 2 – Delimitação das classes de sítio

| Classe de Sítio | Produtividade | Índice de sítio (m) | | IMA Biomassa (Mg.ha ⁻¹) | |
|-----------------|---------------|---------------------|-----------------|-------------------------------------|-------|
| | | Limite Inferior | Limite Superior | Intervalo | Média |
| I | Alta | 30,0 | 34,5 | 13,3 a 31,8 | 23,9 |
| II | Média | 25,5 | 30,0 | 8,3 a 31,1 | 19,3 |
| III | Baixa | 21,0 | 25,5 | 5,3 a 21,4 | 14,9 |

O percentual de parcelas classificado nas classes I, II e III foi 15,4, 63,3 e 21,3%, respectivamente, indicando a grande maioria considerado como sítio médio. Esta classificação reflete, também, a produtividade em biomassa, pois na classe I o incremento médio anual em biomassa é de 23,9 Mg.ha⁻¹, na classe II, 19,3 Mg.ha⁻¹ e na classe III, 14,9 Mg.ha⁻¹, em média, entre as parcelas analisadas em 2012 e 2013, para idades entre 2 e 8 anos.

Correlação entre a produção de biomassa e variáveis ambientais

Entre as variáveis ambientais, o tipo de solo e a altitude foram as que tiveram maior correlação com a biomassa por hectare. O efeito dessas duas variáveis pode ser representado por variáveis dendrométricas, como o índice de sítio e a área basal, que são de simples obtenção, até mesmo em levantamentos expeditos. A área basal engloba, também, a influência do número de árvores por hectare e, implicitamente, a idade, que apresentou correlação de 0,419 (Tabela 3).

Outras variáveis dendrométricas tiveram correlação alta com a biomassa por hectare, como a altura média e o diâmetro médio, no entanto não foram utilizadas na composição dos modelos, devido a possíveis problemas de multicolinearidade que ocorreriam se acrescentadas a um modelo em que a área basal e ou o índice de sítio estivessem presentes.

Tabela 3 – Maiores valores de correlação de variáveis ambientais e dendrométricas com a biomassa por hectare, (idade superior a 2 anos).

| Variáveis analisadas | Correlação com biomassa |
|---|-------------------------|
| Área basal | 0,934 |
| Altura média | 0,835 |
| DAP médio | 0,678 |
| Índice de sítio | 0,640 |
| Classe de sítio | -0,570 |
| Idade (anos) | 0,419 |
| Arvores.ha ⁻¹ | 0,395 |
| Solo LVd2 | 0,281 |
| Altimetria | 0,280 |
| Solo PVe12 | -0,268 |
| Ciclo | 0,152 |
| Relevo ondulado | 0,147 |
| Relevo suave ondulado | -0,108 |
| Exposição solar Norte/Nordeste/Noroeste | -0,039 |
| Exposição solar Sul/Sudeste/Sudoeste | 0,033 |

Ajuste de equações de biomassa

Entre as doze equações ajustadas para estimativa de biomassa por hectare, as equações 6, 9 e 10 foram as que apresentaram maior R² ajustado e menor Syx% e resultados muito semelhantes, portanto as três poderiam ser recomendadas (Tabela 4). No entanto, observou-se ligeira superioridade da equação 10, com estimativas mais precisas para área basal superior a 25m².ha⁻¹, que representam as áreas com maior quantidade de biomassa.

Tabela 4 - Ajuste de equações de biomassa em função da área basal, índice de sítio e idade

| Equações | R ² aj | Syx % | Fonte (adaptado de) |
|---|-------------------|-------|---------------------|
| (1) Bs = -42477 + 0,1399 x (G ²) + 0,0009 x (G ² x IS) + 3,0737x (IS) | 0,950 | 5,51 | Stoate |
| (2) Bs = -15,8414 + 0,0854 x (IS ²) + 0,0063 x (IS ² x Id) + 5,1565 x (Id) | 0,554 | 16,47 | Stoate |
| (3) Bs = -0,7664 + 0,2341 x (G ²) - 0,0099 x (G ² x Id) + 6,9546 x (Id) | 0,888 | 8,25 | Stoate |
| (4) Bs = exp(- 1,1455 + 0,6274 x (G ² x IS) x 1,0022 | 0,948 | 5,65 | Spurr |
| (5) Bs = exp(0,6648 + 1,3462 x (G)) x 1,0047 | 0,869 | 8,92 | Husch |
| (6) Bs = exp(-1,8629 + 1,1767 x ln(G) + 0,9129 x (IS)) x 1,0020 | 0,955 | 5,25 | Schumacher - Hall |
| (7) Bs = 40,3224 - 0,0577 x (G ²) + 0,0082 x (G ² x IS) | 0,941 | 5,98 | |
| (8) Bs = 9,3090 + 0,2072 x (G ²) - 0,0058 x (G ² x IS) + 0,0059 x (G x IS ²) - 0,0119 x (IS ²) | 0,954 | 5,30 | Ogaya |
| (9) Bs = - 78,6174 + 7,5987 x (G) - 0,1461 x (G ²) - 0,1022 x (G x IS) + 0,0067 x (G ² x IS) + 2,7732 x (IS) | 0,955 | 5,26 | Meyer |
| (10) Bs = exp(- 6,7518 + 0,9567 x ln(G) + 0,0388 x ln ² (G) + 4,0732 x ln(IS) - 0,4799 x ln ² (IS)) x 1,0020 | 0,955 | 5,29 | |
| (11) Bs = 0,0096 x (G ² x IS) | 0,977 | 14,26 | |
| (12) Bs = 3,6226 x (G) + 0,0934 x (G ²) | 0,993 | 8,94 | |

Bs=biomassa seca (Mg.ha⁻¹), G=área basal (m².ha⁻¹), IS=índice de sítio para idade índice 6 anos (m), Id=idade (anos).

Santana *et al.* (2008) ajustaram modelos de biomassa por hectare considerando variáveis ambientais como variáveis independentes e concluíram sobre a influência importante da idade e da disponibilidade de água. Aos 7 anos de idade, estes autores relataram uma diferença de 146 Mg.ha⁻¹ entre o menor e o maior valor de biomassa por hectare, semelhante ao obtido no presente estudo, em que aos 6 anos, ocorreram valores de biomassa estimada por hectare de 39,7 a 166 Mg.ha⁻¹. Tal fato pode ser representado pelas classes de sítio, que abrangem a influência do tipo de solo e altitude.

Considera-se, ainda, que o ajuste de equação para estimar a biomassa por hectare, utilizando-se como base dados o resultado de um inventário florestal, consegue abranger fontes de variação dos dados básicos para garantir maior precisão nas estimativas de volume por hectare (SCHNEIDER *et al.*, 2004), gerando também estimativas mais precisas da quantidade de biomassa por hectare. Além disso, em plantações de *Eucalyptus* o uso de material genético melhorado e clones minimiza a influência da genética na estimativa do volume ou da biomassa, podendo-se atribuir a amplitude de diferenças no resultado a variáveis ambientais, que podem ser classificadas ou representadas por variáveis dendrométricas.

4. Conclusões

Embora exista certa restrição da influência do fator genético por se tratar de plantações de clones, as variáveis ambientais propiciam muita variação nos resultados de biomassa por hectare.

O emprego da área basal e do índice de sítio como variáveis independentes em modelos para a estimativa de biomassa foi muito eficiente, gerando erro (syx%) de 5% ao redor da média e resíduos percentuais entre 20 e -20%. Isto denota que a influência de variáveis ambientais para estimar biomassa ficou bem representada por variáveis dendrométricas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a cessão dos dados pela empresa Cenibra Celulose Nipo-Brasileira S.A. e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de iniciação científica concedida ao primeiro autor.

Referências

DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA C. R.; SILVA F.; SCHIKOWSKI A. B.; RUZA M. S. Fator de expansão de biomassa, razão de raízes-parte aérea e modelos para carbono para *Eucalyptus grandis* plantados no sul do Brasil. *Enciclopédia Biosfera*, v.11, n.21, p.1078--1091, 2015.

IBÁ. *Área de árvores plantadas - Capítulo V*. Poyry Consultoria em Gestão de Negócios Ltda., 2015. 77p.

HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; MINETTE, L.; BIOT, Y. Biomassa da parte aérea da vegetação de floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia Brasileira. *Acta Amazônica*, v.28, n.2, p. 153--165, 1998.

KETTERINGS, Q. M.; COE, R.; NOORDWIJK, M. van.; AMBAGAU, Y.; PALM, C. A. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, v.146, n.1, p. 199--209, 2001.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; LEITE, H. G.; COMERFORD, N. B.; NOVAIS, R. F. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. *R. Árvore*, v.32, n.4, p. 697--706, 2008.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; HOPPE, J. M.; GIACOMELLI SOBRINHO, V.; SCHNEIDER, P. S. P. Método de derivação do volume em biomassa e carbono: uma aplicação em *Platanus x acerifolia* (Aiton) Wild. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE MANEJO FLORESTAL, 3., 2004, Santa Maria. *Anais*. Santa Maria: UFSM, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, 2004. p. 381-388.

SCOLFORO J. R. S.; CARVALHO L. M. T.; OLIVEIRA A. D. *Inventário Florestal de Minas Gerais: Monitoramento dos Reflorestamentos e Tendências da Produção em Volume, Peso de Matéria Seca e Carbono*. UFLA, 2008. 150 p.

SCOLFORO J. R. S. *Biometria Florestal – módulo 3: Métodos para Classificação de Sítios Florestais*. UFLA/FAEPE, 1998. 151 p.

SOARES C. P. B.; OLIVEIRA M. L. R. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. *Revista Árvore*, v.26, n.5, p. 533-539, 2002.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. *Floresta*, v.38, n.1, p. 185-206, 2008.