

## EQUAÇÕES PARA ESTIMAR ESTOQUE DE CARBONO POR HECTARE NOS FUSTES DAS ÁRVORES DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL

### EQUATIONS TO ESTIMATE THE CARBON STOCK PER HECTARE IN STEMS OF TREES IN SEASONAL SEMIDECIDUAL FOREST

Carlos Pedro Boechat Soares<sup>1</sup> Marcio Leles Romarco de Oliveira<sup>2</sup> Fabrina Bolzan Martins<sup>3</sup>  
Livia Thais Moreira de Figueiredo<sup>4</sup>

#### RESUMO

Este trabalho teve por objetivo ajustar equações para estimar o estoque de carbono por hectare nos fustes das árvores, em função de variáveis da floresta obtidas por meio da amostragem por ponto horizontal (método de Bitterlich). Foram amostrados 55 pontos, com um fator de área basal igual a 1, em fragmentos de floresta estacional semidecidual, no município de Viçosa, Minas Gerais. Após o ajuste e a avaliação de diferentes modelos de regressão lineares e não lineares, verificou-se que as equações referentes ao modelo 8 (não linear) foram as mais precisas para estimar o estoque de carbono por hectare nos fustes das árvores. **Palavras-chave:** Sequestro de carbono; método de Bitterlich; Floresta Atlântica.

#### ABSTRACT

The aim of this study was to adjust equations to estimate the carbon stock per hectare in stems of trees in function of forest variables, obtained by horizontal point sampling (Bitterlich method). Were sampled 55 points with a basal area factor  $K = 1$ , in natural forest fragments, located at Viçosa, Minas Gerais. After adjustment and evaluation of different regression models, was verified that the model 8 (non-linear) were the most precise to estimate the carbon stock per hectare in the stems of trees.

**Keywords:** Carbon sequestration; Bitterlich method; Atlantic Rainforest.

#### INTRODUÇÃO

Vários procedimentos de inventário florestal por amostragem podem ser utilizados para estimar o estoque de diferentes produtos em uma floresta. Contudo, a escolha do procedimento de amostragem depende das características da floresta, dos objetivos a serem alcançados, dos recursos disponíveis e da precisão requerida (HUSH; MILLER; BEERS,

1972; PÉLLICO NETO; BRENNAN, 1997; SOARES et al., 2011).

Neste sentido, o método de amostragem por ponto horizontal, conhecido por método de Bitterlich, juntamente com as equações ou tabelas de volume de povoamento apresentam-se como alternativas metodológicas para a obtenção de estimativas de características da floresta como: número de árvores, área basal e volume por hectare.

1 Engenheiro Florestal, Dr., Professor Associado do Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Av. Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário, CEP 36570-000, Viçosa (MG), Brasil. csoares@ufv.br

2 Engenheiro Florestal, Dr., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal dos Vales Jequitinhonha e Mucuri, Campus JK, Alto da Jacuba, CEP 39100-000, Diamantina (MG), Brasil. marcioromarco@gmail.com.

3 Engenheiro Florestal, Dr<sup>a</sup>, Professora Adjunto do Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Rua Dr. Pereira Cabral, 1303, Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá (MG), Brasil. fabrina@unifei.edu.br

4 Engenheiro Florestal, Dr<sup>a</sup>, Pós doutoranda na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Alegre, Espírito Santo, Brasil. Bolsista da FAPES. Livia.figueiredo@hotmail.com

Tanto o método de Bitterlich quanto o uso de equações e tabelas de volume quando comparados aos procedimentos convencionais de inventário, os quais estão baseados na totalização de parcelas de área fixa, fornecem as estimativas das características da floresta com maior precisão, menor custo e menor tempo (CARRON; CROMER, 1956; COLE, 1971; CAMPOS, 1986).

No Brasil, realizaram-se alguns trabalhos utilizando as duas metodologias, tanto em florestas plantadas quanto em florestas nativas, os quais demonstraram potencialidade para a obtenção de estimativas de volume por hectare em função de variáveis do povoamento como: área basal por hectare, altura e número de árvores, e outras (FIGUEIREDO FILHO, 1983; MACHADO; PIZATTO, 1986; MACHADO et al., 2000; OLIVEIRA et al., 2005). No entanto, há escassez do emprego dessas metodologias no desenvolvimento e ajuste de modelos que quantifiquem o estoque de carbono em florestas (OLIVEIRA, 2003; SOARES et al., 2005).

Dessa forma, verifica-se grande potencialidade no desenvolvimento, ajuste de modelos e na utilização de equações para estimar o estoque de carbono com o método de amostragem de Bitterlich, uma vez que a utilização de procedimentos convencionais de inventário florestal apresentam custos mais elevados do que os inventários para fins volumétricos, em função da complexidade da coleta de dados e das análises a serem executadas.

Diante disso, este trabalho tem o objetivo de ajustar diferentes equações para estimar o estoque de carbono por hectare nos fustes das árvores, em função de variáveis do povoamento, semelhante às equações de volume de povoamento (SPURR, 1952), com dados obtidos por meio do método de amostragem de Bitterlich.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Caracterização da área de estudo

O presente trabalho foi desenvolvido na zona da mata mineira, localizada no município de Viçosa, Minas Gerais, cuja sede administrativa está localizada a, aproximadamente 42°53' de longitude W e 20°45' latitude S (PEREIRA, 1999).

Segundo a classificação de Köppen, o clima de Viçosa pertence ao tipo Cwa, Subtropical de altitude, com temperatura média do mês mais quente

superior a 22°C, média da temperatura máxima de 26,1°C e das mínimas de 14,0°C. Apresenta chuvas concentradas entre os meses de outubro e março, com precipitação anual de 1.341,2 mm (VIANELLO; ALVES, 2012; DISME, 1992).

A topografia do local é acidentada, apresentando relevo forte ondulado e montanhoso, com vales estreitos e úmidos e a altitude variando aproximadamente, de 600 a 970 metros, estando o município a 649 metros de altitude (CORRÊA, 1984; OLIVEIRA, 2003).

Os solos do município de Viçosa, de acordo com o novo sistema de classificação de solos (EMBRAPA, 2006), apresentam a predominância de duas classes: Latossolo Vermelho Amarelo aluminico, predominante nos topos de morro e encostas; e o Argissolo Vermelho Amarelo distrófico, predominante nos terraço.

Com relação à classificação fitossociológica do Radam Brasil, o município está inserido na região fitossociológica classificada como Floresta Estacional Semidecidual (VELLOSO et al., 1991; OLIVEIRA et al., 2005). As formações florestais estão nos estágios primário e secundário, sendo os remanescentes florestais, em sua maioria, localizados em área de difícil acesso e de relevo acidentado (COELHO; SOUZA, 2002).

Os dados para a realização do estudo foram obtidos de fragmentos florestais naturais que compreendem cerca de 480 espécies, pertencentes a 189 gêneros e 62 famílias, sendo que as espécies de maior ocorrência são: *Apuleia leiocarpa* (Vog.) Macbr., *Dalbergia nigra* (Vell.) Fr. Allem., *Piptadenia gonoacantha* (Mart.) Macbr., e *Amaioua guianensis* Aubl. (OLIVEIRA et al., 2005).

### Amostragem e coleta dos dados

Para a coleta dos dados de campo, empregou-se a amostragem por ponto horizontal (método de Bitterlich), em um total de 55 pontos amostrados, selecionados aleatoriamente em diferentes fragmentos florestais no município de Viçosa.

Em cada ponto de amostragem, as árvores foram qualificadas por meio de um relascópio do tipo *Standard*, empregando-se um fator de área basal igual a um ( $K=1 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ). Em cada árvore qualificada pelo método de amostragem, mediu-se a circunferência a 1,30 m do solo (*CAP*), a altura total (*h*) e a altura do fuste (*h<sub>p</sub>*), ambas estimadas por um

hipsômetro ou vara telescópica.

### Estimativas dos parâmetros populacionais

As estimativas dos parâmetros populacionais, em cada ponto de amostragem foram obtidas por:

$$G = n * K \quad (1)$$

$$CFcc / ha = \sum_{i=1}^n CF_{CC_i} * N_i \quad (2)$$

$$N_i = \frac{K}{g_i} \quad (3)$$

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (4)$$

$$\bar{h}_f = \frac{\sum_{i=1}^n hf_i}{n} \quad (5)$$

Em que:  $G$  = área basal por hectare;  $n$  = número de árvores qualificadas nos pontos de amostragem;  $K$  = fator de área basal, em  $m^2 ha^{-1}$ ;  $N_i$  = número de árvores por hectare que a  $i$ -ésima árvore qualificada representa;  $g_i$  = área seccional da  $i$ -ésima árvore qualificada, em  $m^2$ ;  $CFcc_i$  = carbono no fuste (incluindo a casca) da  $i$ -ésima árvore qualificada, em kg;  $CFcc/ha$  = estoque de carbono nos fustes (incluindo a casca), no ponto de amostragem, em  $kg ha^{-1}$ ;  $\bar{h}$  = altura total média;  $\bar{h}_f$  = altura média do fuste;  $h_i$  e  $hf_i$  = altura total e altura do fuste, respectivamente, da  $i$ -ésima árvore qualificada, em m. A altura total ( $h_i$ ) compreende a distância vertical entre o solo e o topo da árvore, altura do fuste ( $hf_i$ ) compreende a distância vertical entre o solo e o início da copa.

A estimativa do carbono no fuste das árvores individuais ( $CFcc_i$ ) foi obtida por meio da equação alométrica (AMARO, 2010):

$$\hat{CFcc}_i = 0,010045 \cdot DAP^{2,484657} \cdot h_i^{0,426965} \quad (6)$$

$$\bar{R}^2(\%) = 97,74; S_{y,x}\% = \pm 25,1$$

Em que:  $DAP$  = diâmetro com casca, medido a 1,30 m do solo, em cm;  $h_i$  = altura total,

em metros;  $\bar{R}^2(\%)$  = coeficiente de determinação ajustado, em porcentagem;  $S_{y,x}\%$  = erro padrão da estimativa, em porcentagem.

### Ajuste e seleção das equações

De posse dos dados dos pontos de amostragem, foram ajustadas equações referentes aos seguintes modelos (SPURR, 1952; FIGUEIREDO FILHO, 1983; UNG; QUELLET, 1991):

$$\hat{CFcc} / ha = b_0 + b_1 (G \cdot \bar{h}_n) + \varepsilon \quad (\text{Modelo 1})$$

$$\hat{CFcc} / ha = b_0 + b_1 \text{Ln}(G \cdot \bar{h}_n) + \varepsilon \quad (\text{Modelo 2})$$

$$\hat{CFcc} / ha = b_0 + b_1 \text{Ln}G + \varepsilon \quad (\text{Modelo 3})$$

$$\text{Ln}(\hat{CFcc} / ha) = b_0 + b_1 \text{Ln}(G \cdot \bar{h}_n) + \varepsilon \quad (\text{Modelo 4})$$

$$\text{Ln}(\hat{CFcc} / ha) = b_0 + b_1 \text{Ln}G + \varepsilon \quad (\text{Modelo 5})$$

$$\text{Ln}(\hat{CFcc} / ha) = b_0 + b_1 \text{Ln}G + \text{Ln}\bar{h}_n + \varepsilon \quad (\text{Modelo 6})$$

$$\hat{CFcc} / ha = b_0 + b_1 G + b_2 \bar{h}_n + b_3 G \cdot \bar{h}_n + \varepsilon \quad (\text{Modelo 7})$$

$$\hat{CFcc} / ha = b_0 \cdot G^{b_1} \cdot \bar{h}_n^{b_2} \cdot \varepsilon \quad (\text{Modelo 8})$$

Em que:  $\hat{CFcc} / ha$  = estoque de carbono nos fustes (incluindo casca), em  $kg ha^{-1}$ ;  $G$  = área basal, em  $m^2 ha^{-1}$ ;  $\bar{h}_n$  = altura total média das árvores e altura média dos fustes, em m;  $\text{Ln}$  = logaritmo neperiano;  $b_0, b_1 \dots b_3$  = coeficientes do modelo;  $\varepsilon$  = erro aleatório.

As estimativas dos coeficientes dos modelos lineares (1 a 7) foram obtidas por meio do método dos mínimos quadrados ordinários (MQO) e as do modelo não linear (8) pelo uso do algoritmo de Gauss-Newton, por meio do *software* STATISTICA 8.0 (STATSOFT INSTITUTE CORPORATION, 2008).

Para selecionar as melhores equações para o estoque de carbono por hectare ( $CFcc/ha$ ), foram utilizados os critérios de avaliação: a) significância dos coeficientes estimados, pelo teste 't'; b) medidas de precisão: coeficiente de determinação ajustado, em porcentagem ( $\bar{R}^2\%$ ) e o erro padrão da estimativa em porcentagem ( $S_{y,x}\%$ ); e c) análise gráfica dos resíduos percentuais (PAULA NETO, 1977; URBANO et al., 2008).

O coeficiente de determinação ajustado, em porcentagem ( $\bar{R}^2\%$ ) foi obtido pela expressão (KVÅLSETH, 1985):

$$\bar{R}^2(\%) = \left[ 1 - \left( \frac{n-1}{n-p-1} \right) (1-R^2) \right] \cdot 100 \quad (7)$$

Sendo:

$$R^2 = \left[ 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2} \right] \quad (8)$$

O erro-padrão da estimativa, em porcentagem ( $S_{y.x}\%$ ), foi obtido pela expressão (SCHNEIDER, 1998):

$$S_{y.x}\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p - 1}}}{\bar{Y}_i} \cdot 100 \quad (9)$$

Em que:  $n$  = número de observações;  $p$  = número de variáveis independentes;  $R^2$  = coeficiente de determinação;  $y_i$  =  $i$ -ésimo valor observado da variável dependente, na unidade original ( $\text{kg ha}^{-1}$ );  $\hat{y}_i$  =  $i$ -ésimo valor estimado da variável dependente, na unidade original ( $\text{kg ha}^{-1}$ );  $n - p - 1$  = graus de liberdade do resíduo obtido da análise de variância da regressão;  $\bar{Y}$  = média dos  $i$ -ésimos valores observados para a variável dependente.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a totalização dos pontos de amostragem, foram observadas as seguintes estimativas para os parâmetros populacionais: área basal por hectare ( $G$ ), altura total média ( $\bar{h}$ ), altura média do fuste ( $\bar{h}_f$ ), e carbono no fuste por hectare ( $CFcc/ha$ ) (Tabela 1).

Pela amplitude dos valores apresentados na Tabela 1, verifica-se que a amostragem por pontos horizontais, por meio do método de Bitterlich, evidenciou baixos valores para as variáveis  $\bar{h}$  e  $\bar{h}_f$ , o qual reflete o estado de conservação e baixo desenvolvimento vertical dos fragmentos. Verifica-se também que a estimativa do estoque de carbono ( $CFcc$ ) apresentou alta variabilidade,

devido à heterogeneidade dos fragmentos florestais amostrados, em virtude dos diferentes estágios de sucessão e atividades antrópicas. Flores (1993) e Amaro (2010) ao estudarem a mesma área com o mesmo nível de abordagem para indivíduos arbóreos utilizando parcelas fixas, obtiveram valores semelhantes ao deste estudo, com valores de 8,2 m e 10,18 m para altura total média, respectivamente e 7,0 m e 7,2 m para altura média do fuste, respectivamente. Esses valores evidenciam a proximidade dos parâmetros populacionais dos indivíduos selecionados com ambos os métodos de amostragem (área fixa e Bitterlich).

De todos os modelos avaliados, os de número 1 e 7, tanto para  $\bar{h}$  quanto para  $\bar{h}_f$  apresentaram coeficiente  $b_0$  não significativo estatisticamente ( $p \geq 0,05$ ) e, portanto, a inclusão deste coeficiente foi suprimida, deixando reduzidos os modelos ajustados (Tabela 2). Além disso, os coeficientes  $b_1$  e  $b_2$  do modelo 7 também foram não significativos estatisticamente, o que corroborou para a exclusão deste modelo. Os demais modelos obtiveram todos os coeficientes estatisticamente significativos ( $p < 0,05$ ).

O sinal dos coeficientes que acompanham as variáveis independentes  $G$ ,  $\bar{h}$  e  $\bar{h}_f$  foram positivos em todos os modelos ajustados. Isso significa que o estoque de carbono nos fustes das árvores aumenta à medida que aumenta a área basal por hectare, a altura total média das árvores e a altura média dos fustes (Figura 1). Essa tendência é previsível, pois árvores de menores dimensões (em área basal e altura do fuste que compreende a distância vertical entre o solo e o início da copa), geralmente têm menores quantidades de carbono em seus fustes. Essa afirmativa depende também de outros fatores como: espécie, tamanho e

TABELA 1: Estimativas de parâmetros populacionais dos fragmentos florestais amostrados no município de Viçosa, Minas Gerais.

TABLE 1: Estimates of the populational parameters for native forest fragments in Viçosa, Minas Gerais.

Parâmetro	Estimativa		
	Mínima	Média	Máxima
$G$ ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ )	6,0	18,0 ( $\pm 30,24$ )	31,0
$\bar{h}$ (m)	7,2	11,5 ( $\pm 22,42$ )	18,2
$\bar{h}_f$ (m)	4,2	7,3 ( $\pm 22,96$ )	11,5
( $CFcc$ ) ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	5.060,6	27.385,4 ( $\pm 45,78$ )	67.219,2

Em que: Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação.

componentes da copa (SOARES et al., 2011). Além disso, a tendência verificada na Figura 1 é semelhante quando se considera o estoque de carbono em árvores individuais (SOARES; OLIVEIRA, 2002).

Todas as equações resultantes ajustaram-se bem aos dados observados, com valores de  $\bar{R}^2\%$  variando entre 70,12 a 95,45 e  $S_{y,x}\%$  entre 25,02 a 9,77, ambas as estimativas para os modelos 3 e 8a, respectivamente (Tabela 2).

Comparativamente, alguns autores encontraram estimativas semelhantes de  $\bar{R}^2\%$ , analisando o estoque de carbono por hectare. Entre eles estão: Oliveira (2003) para o estoque de carbono por hectare em fragmentos de floresta semidecidual, com valores variando entre 89,48 a 99,15; Scolforo et al. (2008) para o estoque de carbono em tipologias florestais semelhantes ao deste estudo (93,76); Amaro (2010) para o estoque de carbono com casca (91,86 a 95,34) e sem casca

(92,39 a 94,64) utilizando equações alométricas em fragmentos florestais da floresta semidecidual montana, os quais foram obtidos com dados de parcelas permanentes.

Analisando o  $\bar{R}^2\%$  para o estoque de carbono em árvores individuais, Soares e Oliveira (2002) encontraram estimativas semelhantes de  $\bar{R}^2\%$  para o estoque de carbono com casca em árvores de eucalipto (98,90), com o modelo de Schumacher e Hall (1933); Rezende et al. (2006) para o estoque de carbono em espécies do cerrado (93,39 a 98,64); Miranda (2008) para estoque de carbono do fuste com casca em áreas de restauração florestal (92,00). Já Soares et al. (2005) obtiveram estimativas inferiores para o estoque de carbono do fuste de eucalipto, utilizando a idade e o índice de local como variáveis independentes (51,79 e 79,44), assim como Urbano et al. (2008) que também encontraram estimativas inferiores para o estoque

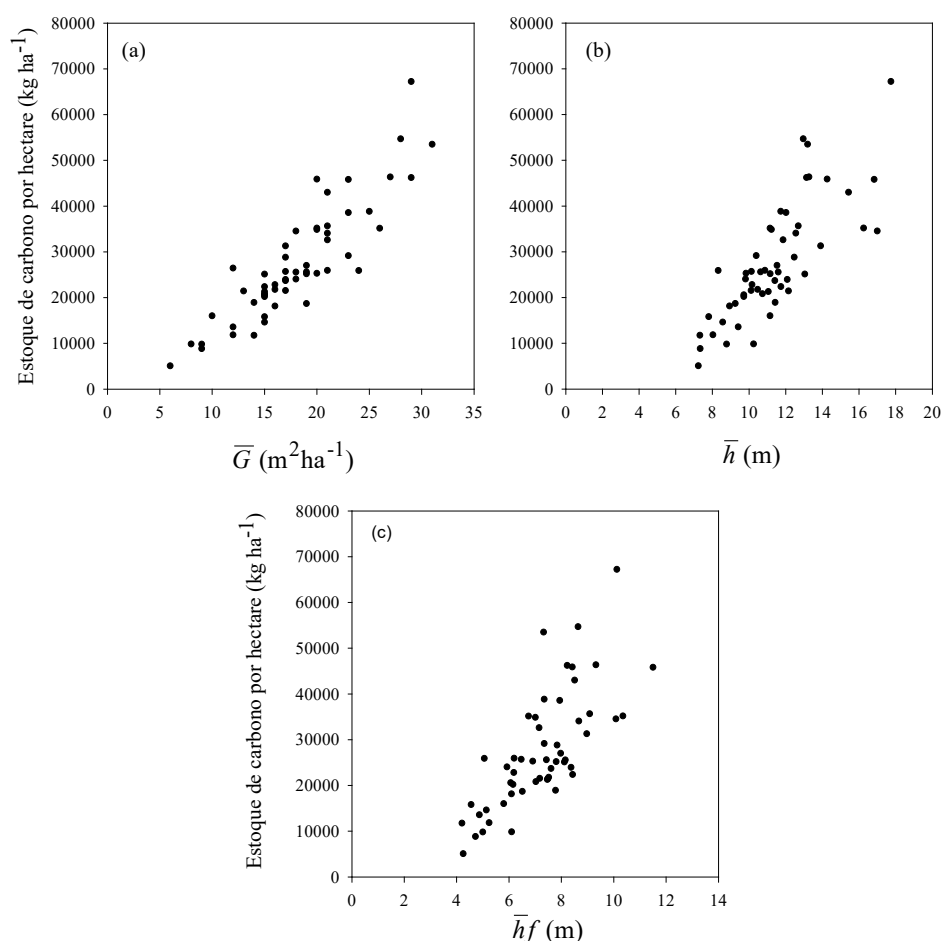


FIGURA 1: Dispersão do estoque de carbono em função da área basal média por hectare (a), altura total média (b) e altura média do fuste (c).

FIGURE 1: Dispersion of carbon stock stems in function of average basal area per hectare (a), average total height (b) and average stems height (c).

TABELA 2: Equações para estimar o estoque de carbono por hectare no fuste das árvores ( $CF_{cc}/ha$ ) e suas respectivas medidas de precisão.TABLE 2: Fitted equations for carbon stock per hectare in stems of trees ( $CF_{cc}/ha$ ) and statistics evaluated.

N.	Equação	$\bar{R}^2$ (%)	$S_{y,x}$ %
1a	$\hat{CF}_{cc}/ha = 128,8640 \cdot (G \cdot \bar{h})$	95,37	$\pm 9,85$
1b	$\hat{CF}_{cc}/ha = 201,5028 \cdot (G \cdot \bar{h}_f)$	90,21	$\pm 14,32$
2a	$\hat{CF}_{cc}/ha = -100201 + 24267 \cdot \ln(G \cdot \bar{h})$	85,55	$\pm 17,40$
2b	$\hat{CF}_{cc}/ha = -797755,9 + 22304,4 \cdot \ln(G \cdot \bar{h}_f)$	78,83	$\pm 21,06$
3	$\hat{CF}_{cc}/ha = -63335,4 + 31911,3 \cdot \ln(G)$	70,12	$\pm 25,02$
4a	$\ln(\hat{CF}_{cc}/ha) = 4,74476 + 1,020133 \cdot \ln(G \cdot \bar{h})$	95,35	$\pm 9,87$
4b	$\ln(\hat{CF}_{cc}/ha) = 5,50413 + 0,958465 \cdot \ln(G \cdot \bar{h}_f)$	89,85	$\pm 14,58$
5	$\ln(\hat{CF}_{cc}/ha) = 6,22967 + 1,364387 \cdot \ln(G)$	78,21	$\pm 21,37$
6a	$\ln(\hat{CF}_{cc}/ha) = 4,76651 + 1,036432 \cdot \ln(G) + 0,991938 \cdot \ln(\bar{h})$	95,36	$\pm 9,86$
6b	$\ln(\hat{CF}_{cc}/ha) = 5,51773 + 1,038217 \cdot \ln(G) + 0,835894 \cdot \ln(\bar{h}_f)$	90,55	$\pm 14,08$
8a	$\hat{CF}_{cc}/ha = 127,5977 \cdot G^{1,060688} \cdot \bar{h}^{0,931100}$	95,45	$\pm 9,77$
8b	$\hat{CF}_{cc}/ha = 185,7578 \cdot G^{1,154518} \cdot \bar{h}_f^{0,813650}$	91,14	$\pm 13,66$

de carbono do fuste de *Mimosa scabrella* (66 a 84).

A maior estimativa do erro padrão ( $S_{y,x}$  %) foi de  $\pm 25,05$  para a equação referente ao modelo 3, e  $\pm 9,77$  para a equação referente ao modelo 8a. Rezende et al. (2006), Miranda (2008) e Thompson (2009) encontraram valores superiores de  $S_{y,x}$  % para o estoque de carbono do fuste em espécies do cerrado ( $\pm 25,66$  a  $\pm 40,69$ ), estoque de carbono do fuste em áreas de restauração florestal ( $\pm 45,45$ ) e para o carbono do fuste da espécie *Sclerolobium paniculatum* ( $\pm 33,48$ ), respectivamente.

De todos os modelos avaliados, as equações referentes aos modelos 1a, 4a, 6a e 8a merecem destaque, pois apresentaram maiores precisões em relação às estimativas avaliadas (Tabela 2). Nas quatro equações, a variável independente utilizada foi  $\bar{h}$ , o que significa que a  $\bar{h}$  apresentou melhor performance que a variável  $\bar{h}_f$  para estimar

o estoque de carbono, utilizando o método de amostragem de Bitterlich. Amaro (2010) obteve resultados distintos aos deste estudo, observando que a inclusão da variável  $\bar{h}_f$  foi superior a  $\bar{h}$  em fragmentos da floresta estacional semi-decidual montana, cujas espécies *Anadenanthera peregrina* e *Pseudopiptadenia contorta* foram as de maior ocorrência. Soares et al. (2005) e Urbano et al. (2008) utilizaram, além da variável de tamanho  $h$ , a variável  $dap$  (diâmetro medido a 1,30 m do solo) e obtiveram estimativas razoáveis para estoque de carbono em eucalipto e bracatinga, respectivamente. Outras variáveis de povoamento, como o diâmetro quadrático ( $q$ ) ou área basal média ( $\bar{G}$ ), poderiam ser utilizadas para estimar o estoque de carbono em florestas naturais (BROWN et al., 1989).

Os resíduos percentuais para estimar o estoque de carbono nos fustes das árvores

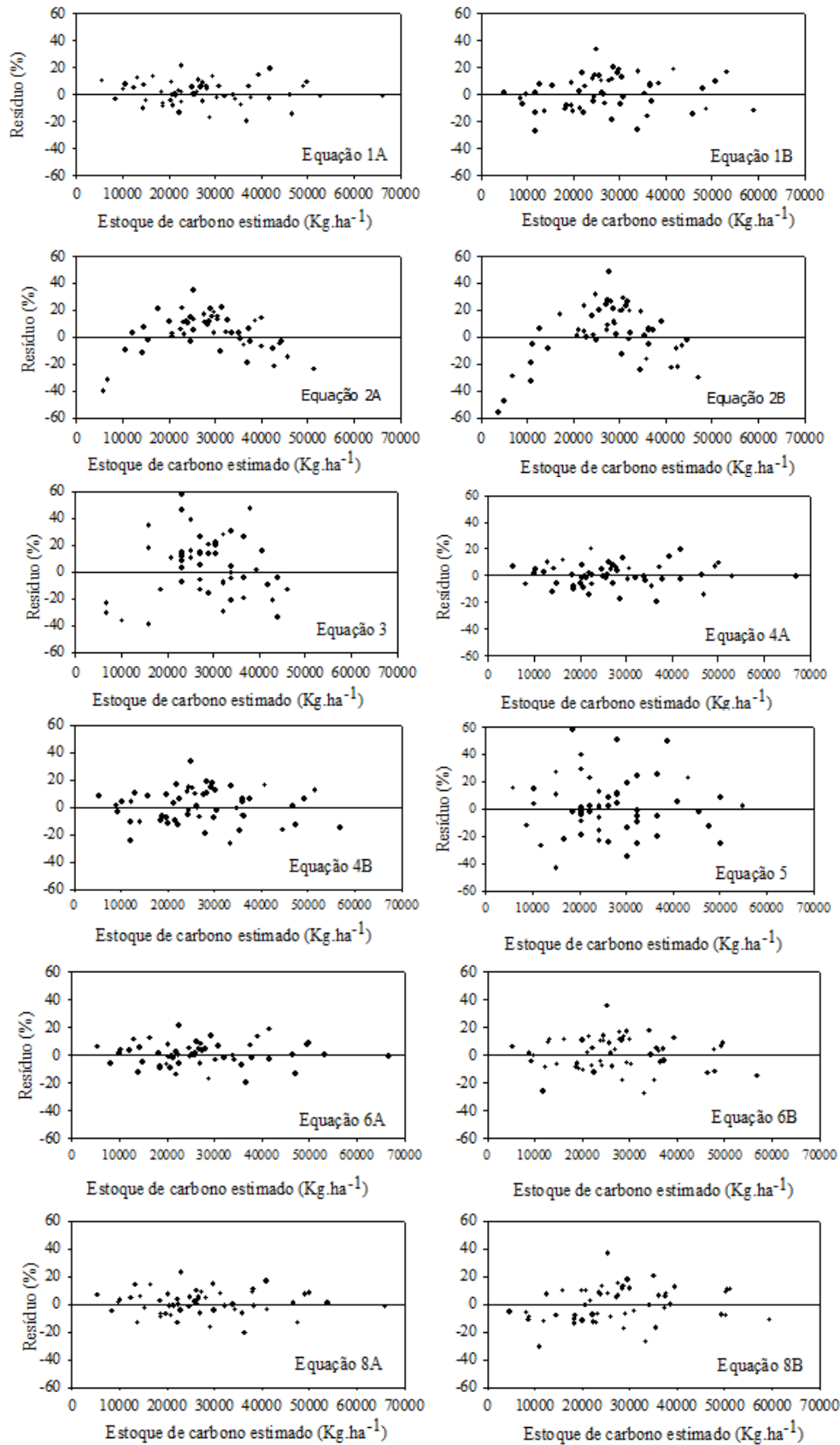


FIGURA 2: Distribuição dos resíduos percentuais das equações ajustadas para o estoque de carbono nos fustes das árvores. (A) altura total média das árvores, (B) altura média dos fustes das árvores.  
 FIGURE 2: Distribution of residuals in fitted equations for carbon stock in stems. (A) Average total height, (B) Average stems height.

por hectare (Figura 2) apresentaram uma boa distribuição para todos os modelos ajustados, com exceção dos modelos 2a, 2b e 3. Estes três modelos apresentaram tendência bem marcante na distribuição dos resíduos, e subestimaram na região dos menores e maiores estoques de carbono. Essa tendência, apresentada nos modelos 2a, 2b e 3, foi a mesma encontrada por Amaro (2010) utilizando as variáveis *dap* e *h* em equações alométricas para estimar o carbono no fuste com e sem casca.

Os modelos ajustados 4b e 5, apesar da boa *performance* estatística, apresentaram superestimação dos resíduos nos estoques médios de carbono, entre 2000 e 4000 kg ha<sup>-1</sup>. Os modelos ajustados 1a, 1b, 4a, 6a, 6b, 8a e 8b estão em conformidade com as estatísticas avaliadas (Tabela 2), e apresentaram boa distribuição dos resíduos percentuais (Figura 2), conseguindo estimar com precisão o estoque de carbono no fuste das árvores. Contudo, optou-se por não selecionar os modelos 1a e 1b que estão no formato reduzido, uma vez que o coeficiente  $b_0$  foi suprimido do modelo por não ser estatisticamente significativo.

Das equações restantes (4a, 6a, 6b, 8a e 8b) optou-se por selecionar a 8a, uma vez que apresenta melhores valores das estatísticas avaliadas ( $\bar{R}^2\%$  e  $S_{y,x}\%$ ) e melhor distribuição dos resíduos percentuais. Além disso, o modelo 8a, fornece uma resposta não linear (relação alométrica) do estoque de carbono em função das variáveis do povoamento, área basal e altura total média, o que é totalmente aceito do ponto de vista biológico (VANN et al., 1998).

O modelo 8a pode ser considerado como uma variação do modelo volumétrico de Schumacher e Hall (1933), no qual, em vez de estimar individualmente o volume do tronco das árvores, estima-se o estoque de carbono (SOARES et al., 2005) em função das variáveis do povoamento ( $G$ ,  $\bar{h}$ ) as quais são facilmente obtidas a campo pelo método de amostragem de Bitterlich.

Desta forma, as principais razões atribuídas para o melhor desempenho do modelo é a resposta não linear do estoque de carbono em função de variáveis do povoamento, área basal ( $G$ ) e altura total média ( $\bar{h}$ ), obtidas facilmente pelo método de amostragem de Bitterlich.

A utilização de equações com dados obtidos de inventários florestais utilizando métodos de amostragem alternativos, como o método de

Bitterlich, pode tornar-se uma ferramenta útil, simples, barata e confiável na estimativa do estoque de carbono nos fustes de árvores. A escolha de equações que apresentam bons ajustes diminuem as incertezas nas estimativas sobre a quantidade de carbono presente nas florestas (BROWN; LUGO, 1984; SOARES et al., 2005), possibilitando conhecer o potencial de uma floresta no sequestro de carbono e a sua viabilidade econômica (SOARES; OLIVEIRA, 2002).

## CONCLUSÕES

É possível obter uma equação para estimar o estoque de carbono por hectare nos fustes de árvores provenientes de fragmentos de floresta estacional semidecidual, localizados no município de Viçosa - MG, em função de variáveis da floresta obtidas por meio da amostragem por ponto horizontal.

O modelo não linear baseado na relação alométrica do estoque de carbono por hectare em função das variáveis da floresta, área basal por hectare ( $G$ ) e altura média das árvores (total e do fuste), (equações de número 8a e 8b) é a que melhor estimou o estoque de carbono por hectare.

As variáveis da floresta incluídas na equação que melhor estimou o estoque de carbono por hectare são  $G$  e altura total média ( $\bar{h}$ ). Essa combinação de variáveis gera melhores estimativas para o estoque de carbono por hectare, com coeficiente de determinação ( $\bar{R}^2\%$ ) de 95,45 e erro padrão de estimativa ( $S_{y,x}\%$ ) de  $\pm 9,77$ , e apresenta melhor distribuição dos resíduos percentuais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARO, M. A. **Quantificação do estoque volumétrico, de biomassa e de carbono em uma floresta estacional semidecidual no município de viçosa-MG**. 2010. 168 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) –Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.
- BROWN, S.; LUGO, A. E. Biomass of tropical Forest: a new estimate based on Forest volumes. **Science**, Washington, v. 233, n. 4642, p. 1290-1293, 1984.
- BROWN, S. et al. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to Forest inventory data. **Forest Science**, Washington, v. 35, n. 4, p. 881-902, 1989.
- CAMPOS, A. L. A. S. **Desenvolvimento de um**



- sistema compatível de crescimento e produção para manejo de *Eucalyptus grandis* (Hill ex. Maiden).** 1986. 73f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1986.
- CARRON, L. T.; CROMER, D. A. N. Stand volume tables with particular reference to *Pinus radiata* in the A.C.T. Camberra. **Forestry and Timber Bureau Bulletin**, n. 35, 1956.
- COELHO, D. J. S.; SOUZA, A. Modelo de gestão florestal sustentável para a microrregião de Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 135-144, 2002.
- COLE, D. M. A cubic-foot stand volume equation for *Lodgepole pine* in montana and Idaho. **United States Department of Agriculture Forest Service Research Note**, n. 150, p. 8, 1971.
- CORRÊA, G. F. **Modelo de evolução e mineralogia da fração argila de solos do planalto de Viçosa - MG.** 1984. 187 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1984.
- DISME. **Normais climatológicas (1961 – 1990).** Brasília: Departamento Nacional de Meteorologia, 1992.
- EMPRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.
- FIGUEIREDO FILHO, A. **Estudos de modelos matemáticos para estimar o volume por unidade de área em uma floresta tropical úmida na Amazônia brasileira.** 1983. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1983.
- FLORES, E. J. M. **Potencial produtivo e alternativas de manejo sustentável de um fragmento de Mata Atlântica Secundária, município de Viçosa, Minas Gerais.** 1993. 165 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1993.
- HUSH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest mensuration.** 2. ed. New York: The Ronald Press Company, 1972.
- KVALSETH, T. O. Cautionary note about  $R^2$ . **The American Statistician**, Alexandria, v. 39, n. 4, p. 279-285, 1985.
- MACHADO, S. A. et al. Comparação entre métodos para avaliação de volume total de madeira por unidade de área, para o pinheiro do Paraná, na região sul do Brasil. Curitiba. **Cerne**, Lavras, v. 6, n. 2, p. 55-66, 2000.
- MACHADO, S. A.; PIZATTO, W. Tabela de volume de povoamento para florestas nativas de *Araucaria angustifolia* nos estados da região sul do Brasil. Curitiba. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 26, n. 1-2, p. 11-26, 1998.
- MIRANDA, D. L. C. **Modelos matemáticos de estoque de biomassa e carbono em áreas de restauração florestal no sudoeste paulista.** 2008. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- OLIVEIRA, M. L. R. **Tabelas de volume de povoamento para fragmentos florestais nativos do município de Viçosa, Minas Gerais.** 2003. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.
- \_\_\_\_\_ et al. Equações de volume de povoamento para fragmentos florestais naturais do município de Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 213-225, 2005.
- PAULA NETO, F. Tabelas volumétricas com e sem casca para *Eucalyptus saligna*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 1, n. 1, p. 31-54, 1977.
- PÉLLICO NETO, S.; BRENA, D. A. **Inventário Florestal.** Curitiba: Editorado pelos autores, 1997.
- PEREIRA, R. A. **Mapeamento e caracterização de fragmentos de vegetação arbórea e alocação de áreas preferências para sua interligação no município de Viçosa, MG.** 1999. 250f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.
- REZENDE, A. V. et al. Comparação de modelos matemáticos para estimativa do volume, biomassa e estoque de carbono da vegetação lenhosa de um cerrado *sensu stricto* em Brasília, DF. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 71, n. 1, p. 65-76, 2006.
- SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933.
- SCHNEIDER, P. R. **Análise de regressão aplicada a engenharia florestal.** Santa Maria: UFSM, 1998.
- SCOLFORO, J. R. S. et al. (Ed.) **Inventário florestal de Minas Gerais: equações de volume, peso de matéria seca e carbono para diferentes fitofisnomias da flora nativa.** Lavras: Editora da UFPA, 2008.
- SOARES, C. P. B. et al. **Dendrometria e inventário florestal.** 2. ed. Viçosa: UFV, 2011.
- \_\_\_\_\_ et al. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 711-718, 2005.

- OLIVEIRA, M. L. R. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 5, p. 533-539, 2002.
- SPURR, S. H. **Forest inventory**. New York: The Ronald Press: 1952.
- STATSOFT INSTITUTE CORPORATION. **Statistica for Windows**: Version 8. Tulsa: OK, 2008.
- THOMPSON, R. M. **Estimativas de volume, biomassa e carbono para o carvoeiro (*Sclerolobium paniculatum* Vog. var. *subvelutinum* Benth.)**. 2009. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
- UNG, C. H., QUELLET, D. Stand volume tables. Application to *black spruce* of Lebel-sur-Quevillon. **Forestry Chronicle**, Mattawa, v. 67, n. 6, p. 712-715, 1991.
- URBANO, E. et al. Equações para estimar o peso de carbono fixado em árvores de *Mimosa scabrella* Bentham (bracatinga) em povoamentos nativos. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 3, p. 194-203, 2008.
- VANN, D. R. et al. Allometric equations for two South American conifers: Test of a non-destructive method. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 106, n. 2-3, p. 55-71, 1998.
- VELLOSO, H. P. et al. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991.
- VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. 2. ed. Viçosa: Imprensa Universitária. 2012.