

ESTIMATIVA DA BIOMASSA E CARBONO ACIMA DO SOLO EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA DENSA UTILIZANDO O MÉTODO DA DERIVAÇÃO DO VOLUME COMERCIAL

Péricles Silveira

Eng. Florestal, Dr., Depto. de Polícia Rodoviária Federal, DPRF, Curitiba, PR, Brasil - pericles.silveira@dprf.gov.br

Recebido para publicação: 17/07/2008 – Aceito para publicação: 30/06/2010

Resumo

O objetivo principal desta pesquisa foi estimar pelo método da derivação do volume comercial, e comparar com a estimativa realizada por uma equação previamente selecionada para biomassa, o estoque de biomassa e carbono em um fragmento de Floresta Ombrófila Densa localizado nos municípios de Presidente Nereu Ramos e Apiúna, no estado de Santa Catarina. Com as informações de biomassa total, biomassa comercial, densidade básica da madeira, volume comercial e teores de carbono determinou-se o fator de expansão médio, por espécie e por classes de DAP. Estimou-se também, conforme o método de estimativa, a quantidade de dióxido de carbono removido da atmosfera e o valor monetário da floresta. Estes resultados mostraram que as estimativas encontradas pelo método da derivação de volume comercial em estoque de biomassa e carbono, apesar de até o momento ter sido pouco explorado, são confiáveis por estarem próximas às estimativas encontradas pela equação para biomassa assim como dos trabalhos realizados atualmente em florestas de formação natural.

Palavras-chave: Biomassa; carbono; fator de expansão de biomassa; modelos para biomassa e carbono.

Abstract

Above ground biomass and carbon stock estimation through the commercial volume derivation in a Dense Ombrophylous Forest fragment. The objective of this research was to estimate biomass and carbon amounts through the commercial volume derivation in an Atlantic Rain Forest fragment located in Presidente Nereu Ramos and Apiúna counties, Santa Catarina State, Brazil, and compare the results with a previously selected equation. Using the total biomass, commercial biomass, wood basic density, commercial volume, and carbon content, the average expansion factor by species and DBH classes was calculated. It was also estimated the CO₂ amount absorbed from the atmosphere and the monetary value of the forest. The results showed that the estimations obtained through the commercial volume derivation method, although not common, are reliable when compared to the selected biomass equation and the results from other studies carried out in native forests.

Keywords: Biomass; carbon; biomass expansion factor; biomass and carbon models.

INTRODUÇÃO

Os estudos de biomassa e carbono em formações florestais são feitos com objetivos diversos, dentre os quais destacam-se a quantificação da ciclagem de nutrientes, a quantificação para fins energéticos e como base de informações para estudos de sequestro de carbono. Esses estudos são de grande importância para a tomada de decisões no manejo dos recursos florestais (PÁSCOA *et al.*, 2004). O interesse na completa utilização da árvore (raízes, tronco, ramos), o uso dos resíduos na manufatura de produtos florestais, a quantificação de material combustível em relação ao potencial de incêndio de uma floresta e outras abordagens aumentam a importância dos estudos de biomassa (HUSCH *et al.*, 1982; PHILIP, 1994).

Para Martinelli (1994), biomassa é a quantidade expressa em massa do material vegetal disponível em uma floresta, sendo que os componentes de biomassa geralmente estimados são a biomassa viva horizontal acima do solo, composta de árvores e arbustos, a biomassa morta acima do solo, composta

pela serapilheira e troncos caídos, e a biomassa abaixo do solo, composta pelas raízes. A biomassa total é dada pela soma de todos esses componentes.

As metodologias usadas atualmente para se obterem estimativas de biomassa em áreas florestais são baseadas, principalmente, em dados de inventário florestal, empregando-se fatores e equações de biomassa que transformam dados de diâmetro, altura ou volume em tais estimativas (SOMOGYI *et al.*, 2006).

Na maioria dos casos é necessária uma amostragem destrutiva para a estimativa correta de biomassa. Normalmente a biomassa arbórea é medida a partir de seus componentes. A separação e especificação desses componentes variam de acordo com o tipo de povoamento e os objetivos a serem alcançados. Essa variação pode incluir ou excluir alguns componentes específicos, tais como flores e frutos, ou detalhar outros, como raízes e ramos, subdividindo em raízes finas e raízes grossas, ramos com idades e espessuras diferentes (CAMPOS, 2001).

Higuchi *et al.* (2004) afirmam que a estimativa de estoque de carbono pode ser obtida pelo produto da biomassa florestal pela concentração de carbono. A concentração de carbono na vegetação obtida por Higuchi; Carvalho Júnior (1994) está em torno de 48%, valor este que está dentro dos limites de concentrações em florestas tropicais, que é de 46 a 52%.

Um dos métodos mais usados para estimar o estoque de carbono em florestas, por reduzir as incertezas nas estimativas, é o método de derivação do volume em biomassa e carbono. Tal método foi utilizado nas florestas boreais do Canadá (APPS; KURZ, 1994), florestas dos Estados Unidos da América (TURNER *et al.*, 1995) e florestas da Rússia (ALEXEYEV *et al.*, 1995), entre outras. Nesse método, determina-se um fator de conversão para se estimar o estoque de carbono da vegetação obtido pela proporção entre a biomassa e o volume da floresta, variando com o tipo florestal (espécies), a região (qualidade do sítio), o estágio de desenvolvimento (classe de idade) e a atividade humana, sendo necessário conhecer a densidade básica da madeira, o conteúdo de carbono e a proporção do volume para a biomassa total.

Para Higuchi; Carvalho Júnior (1994), os estudos para quantificação de biomassa florestal dividem-se em métodos diretos (ou determinação) e métodos indiretos (ou estimativas). Determinação significa uma medição real feita diretamente na biomassa, por exemplo, a pesagem de um fuste inteiro por meio de um dinamômetro ou uma balança. Todas as árvores de uma determinada parcela são derrubadas e pesadas, sendo feita em seguida a extrapolação da avaliação amostrada para a área total de interesse. A estimativa de biomassa aérea pelo método indireto consiste em correlacioná-la com alguma variável de fácil obtenção e que não requeira a destruição do material vegetal. As estimativas podem ser feitas por meio de relações quantitativas ou matemáticas, como razões ou regressões de dados provenientes de inventários florestais por meio da derivação do volume comercial, em que são utilizados fatores que podem ser de expansão ou de conversão, e por dados de sensoriamento remoto.

Somogyi *et al.* (2006) afirmam que vários fatores devem ser usados em estimativas de biomassa, dependendo dos dados disponíveis (árvores ou talhões) e da estimativa desejada. Em casos mais simples e quando são utilizados dados de densidade da madeira, utiliza-se somente um fator de conversão. Quando é necessária a estimativa total de biomassa, mas apenas dados de biomassa comercial estão disponíveis, utiliza-se um fator de expansão. Nesses casos, a conversão e expansão podem ser feitas de várias maneiras, por exemplo, quando se deseja a estimativa da biomassa total de uma árvore acima do solo, quando somente o volume comercial é disponível:

- a) expansão do volume comercial para o volume total da árvore, seguida pela conversão para biomassa;
- b) conversão do volume comercial da árvore para a biomassa comercial, seguida pela expansão para a biomassa total;
- c) conversão e expansão do volume comercial da árvore para a biomassa total da árvore em um único passo.

Portanto, fatores de biomassa podem ter apenas um componente de expansão ou um componente de conversão, ou ambos podem estar incluídos em um valor combinado.

Esses exemplos podem ser melhor entendidos observando-se a figura 1.

O fator de expansão pode ser função apenas do diâmetro à altura do peito (DAP), como também do DAP e da altura. Os fatores como função apenas do DAP são consideravelmente maiores que os fatores como função do DAP e altura, refletindo em uma superestimativa do total de biomassa acima do

solo (BROWN *et al.*, 1989). Esses autores ainda mencionam que, como o total da biomassa acima do solo é sempre positiva e a biomassa comercial de uma árvore pequena pode ser zero, a relação entre essas duas variáveis pode tender ao infinito. Somogyi *et al.* (2006) afirmam que esses fatores, além de serem função do DAP e da altura, variam também de acordo com a espécie, tipo e localização de uma floresta.

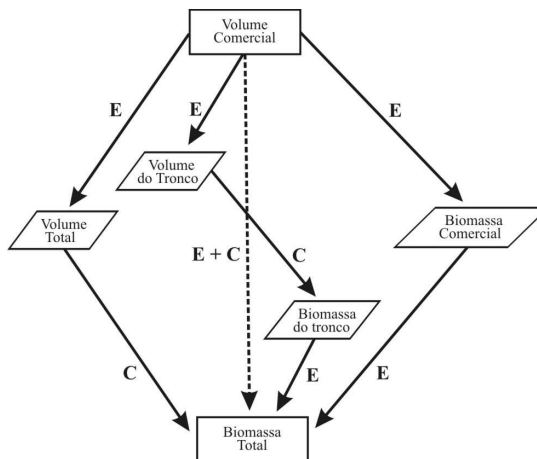


Figura 1. Maneiras de se estimar a biomassa total a partir do volume comercial. “E” significa expansão e “C” conversão. Fonte: Somogyi *et al.* (2006).

Figure 1. Ways to estimate total biomass from commercial volume. “E” denote expansion and “C” conversion. Authorship: Somogyi *et al.* (2006).

Sharp *et al.* (1975), estimando biomassa em uma floresta na Carolina do Norte, com base em dados de inventário florestal, usaram para a constante fator de expansão de biomassa (BEF) um valor de 2. Johnson; Sharpe (1983) analisaram a variação desse fator para a maioria dos tipos florestais dos EUA e Canadá, observando que esses valores variaram por tipo florestal e classes de tamanho entre 2,1 e 5. Brown; Lugo (1984) aplicaram dois diferentes valores para esse fator (1,6 e 3) para uma estimativa de biomassa em florestas tropicais abertas e fechadas, respectivamente.

A metodologia padrão utilizada atualmente para se fazer estas mensurações baseia-se em dados de inventário florestal. Com esses dados podem-se determinar relações alométricas que utilizam variáveis como fator de expansão de biomassa e densidade média de carbono por espécie ou por tipo florestal, que convertem volume de madeira em biomassa e posteriormente em carbono (LINDER; KARJALAINEN, 2007).

Este estudo, realizado em um fragmento de Floresta Ombrófila Densa, tem por objetivos realizar estimativas de biomassa aérea e da quantidade de carbono pelo método da derivação do volume comercial e por um modelo matemático previamente selecionado, e realizar estimativas de carbono pelo método da derivação do volume comercial, por um modelo previamente selecionado para biomassa e pelo valor default do Intergovernmental Panel on Climate Change “IPCC” (2001) de 0,5.

MATERIAL E MÉTODOS

As áreas florestais estudadas localizam-se entre os paralelos 27°08’34” e 27°15’37” latitude sul, e entre os meridianos 49°11’57” e 49°17’28” longitude oeste de Greenwich, nos municípios de Apiúna e Presidente Nereu Ramos, estado de Santa Catarina, compostos pelo baixo, médio e alto vale do rio Itajaí e compreendendo uma área total de 3.799 ha (IBGE, 1992).

A partir de um inventário florestal, foram coletadas informações de DAP em 48 amostras, distribuídas em toda área de estudo. Desse inventário, foram escolhidas 213 árvores de 77 espécies diferentes, com um DAP maior ou igual a 10 cm, representando 1,64% do número total de indivíduos amostrados no inventário florestal pelo método destrutivo, das quais foram determinados a biomassa total, o volume comercial, as densidades básicas, os teores de carbono, as alturas e os diâmetros.

Para conhecer melhor as variáveis envolvidas no estudo, realizou-se uma análise exploratória quantitativa, sendo em seguida construída uma matriz de correlação para a escolha das variáveis a serem

utilizadas nos ajustes dos modelos testados. Após a escolha das variáveis, foram realizados os ajustes de modelos para estimar altura total, altura comercial, volume comercial e biomassa total em 90% do total das árvores amostradas (192), utilizando os 10% restantes (21) para se fazer a validação do modelo selecionado. Os modelos utilizados foram:

- altura total: $Ht = b_0 + b_1dap$
- altura comercial: $Hc = b_0 + b_1\ln dap$
- volume comercial: $Vc = b_0 + b_1dap^2$
- biomassa total aérea: $\ln BT = b_0 + b_1\ln dap + b_2\ln ht$

Em que: dap = diâmetro à altura do peito;
 dap^2 = diâmetro à altura do peito ao quadrado;
 $\ln dap$ = logaritmo neperiano do diâmetro à altura do peito;
 $\ln ht$ = logaritmo neperiano da altura total;
 $\ln BT$ = logaritmo neperiano da biomassa total aérea;
 b_0 , b_1 e b_2 = coeficientes dos modelos.

Para verificação da adequação da equação ajustada para a estimativa de altura total, altura comercial, volume comercial e biomassa total, foram utilizados os seguintes critérios: Coeficiente de Determinação Ajustado (R^2_{aj}), Erro Padrão da Estimativa em Percentagem ($Syx\%$) e Análise Gráfica dos Resíduos. Nos modelos para estimar biomassa total e volume comercial, utilizaram-se as estatísticas Coeficiente de Determinação Ajustado (R^2_{aj}), Erro Padrão da Estimativa em Percentagem ($Syx\%$) e Análise Gráfica dos Resíduos, sendo utilizado o Fator de Correção de Meyer para a correção da discrepância logarítmica nos modelos em que a variável dependente sofreu transformação logarítmica. Nas equações para a estimativa das alturas total e comercial foram utilizados os mesmos critérios citados anteriormente, com exceção do R^2_{aj} , que foi substituído pelo Índice de Schlaegel (IA). Esse índice é uma estatística comparável ao R^2 , consistindo em uma transformação das predições dos valores estimados para a unidade original. Quando se trata de equações aritméticas, o valor de IA é igual ao valor de R^2 , portanto esse índice serve como um comparador de equações de diferentes naturezas.

Também foi utilizada a amplitude absoluta dos resíduos (AR) como critério de validação da equação, obtida pela diferença entre o maior e o menor resíduo gerado pela equação. Esse critério determina que a equação que apresentar menor amplitude de resíduos é considerada melhor.

Para a determinação do fator de expansão (FEB), foram empregados dois métodos. O primeiro, conforme Somogyi *et al.* (2006), foi calculado pela razão entre a biomassa total e a biomassa do fuste:

$$FEB = \frac{m_1}{m_2}$$

Em que: m_1 : biomassa total (kg);
 m_2 : biomassa do fuste (kg).

O segundo método utiliza as informações de densidade básica da madeira e volume comercial, conforme Somogyi *et al.* (2006) e Brown (1997):

$$FEB = \frac{BAS}{V \times D}$$

Em que: BAS = biomassa acima do solo (kg);
 V = volume (m^3);
 D = densidade média da madeira (g/cm^3).

No desenvolvimento de fatores de expansão para biomassa, procurou-se detalhar ao máximo o seu estudo. Para tanto, foram desenvolvidos fatores de expansão médio, por espécie e por classe de DAP, assim definidos:

- *Fator de expansão médio*: determinado pela média dos fatores de todas as espécies;
- *Fator de expansão por espécie*: determinado pela média dos fatores encontrados para uma mesma espécie;

- *Fator de expansão por classes de DAP*: determinado pela média dos fatores para cada classe de DAP.

Após a determinação dos fatores de expansão, foi aplicado o teste de Qui-quadrado (χ^2) para verificar a existência ou não de diferenças significativas entre eles, a 99% de probabilidade.

Utilizando as equações ajustadas, foram realizadas estimativas de altura total, altura comercial e volume comercial, objetivando estimar a biomassa total por árvore.

O primeiro método indireto para a estimativa de biomassa total baseou-se na utilização do modelo ajustado, em função do DAP das árvores inventariadas e das alturas totais estimadas. Estimou-se a biomassa total e a biomassa média por amostra.

O segundo método indireto utilizou as variáveis densidade básica e fator de expansão, obtidas nas 213 árvores abatidas. Estimou-se biomassa total nas árvores inventariadas em função do fator de expansão médio, por espécie e por classes de DAP.

Para um maior detalhamento sobre estimativa de biomassa, principalmente visando o comportamento da variável fator de expansão, foram realizadas também por amostra e por classes de DAP. Essas estimativas foram em seguida extrapoladas para a unidade hectare.

Pelo fato de as estimativas por fator de expansão estarem sendo testadas, elas foram então comparadas com a do modelo selecionado, porque esse método é o mais tradicionalmente utilizado em estudos de biomassa.

Com as informações sobre os teores de carbono determinados nas árvores abatidas e utilizando os valores dos fatores de expansão desenvolvidos nas estimativas de biomassa, a estimativa de carbono nas árvores inventariadas foi realizada por dois métodos. O primeiro método utilizou os valores dos teores de carbono determinados nas árvores abatidas, que foram multiplicados pelas estimativas de biomassa feitas pelo modelo ajustado, para se saber o total de carbono presente em cada árvore. O segundo método foi desenvolvido com base no modelo proposto por Schöne; Schulte (1999), mostrado abaixo, que visa quantificar, de forma prática, o volume de carbono armazenado por árvore ou em formações florestais:

$$C = V \cdot Db \cdot Fb \cdot Fc$$

Em que: C = carbono em toneladas;

V = volume em m³;

Db = densidade básica da madeira (g/cm³);

Fb = fator de expansão de biomassa;

Fc = fator para a determinação do peso seco da biomassa em C (0,50).

Tendo em vista que foram determinados os teores de carbono nas árvores amostradas, a variável “Fc” foi substituída pelos valores desses teores, de forma a tornar mais individualizadas e exatas essas estimativas. As estimativas de carbono feitas por esse modelo foram realizadas utilizando-se os três fatores de expansão desenvolvidos para biomassa, ou seja, médio, por espécie e por classes de DAP.

Foram realizadas também estimativas de carbono nas árvores inventariadas utilizando-se o valor default (0,5), que é a fração desse elemento contida em uma unidade de biomassa, sugerido pelo IPCC (2001). Essas estimativas foram então comparadas com a estimativa realizada pelo primeiro método.

Estimou-se também as quantidades de CO₂ que seriam removidas da atmosfera por ocasião do uso do carbono pelas plantas. Segundo Balbinot (2004), essas estimativas são alcançadas por meio da multiplicação do peso atômico do carbono por 3,6667, que é o fator de conversão dos pesos atômicos da molécula de C (peso atômico 12) para a de CO₂ (peso atômico 44), que é o gás sobre o qual é valorado o serviço da floresta de fixar carbono e que deve servir de base para os cálculos do fluxo de caixa para um possível projeto.

Para a análise do valor monetário da área florestal em estudo, foi utilizado um valor médio pago pela tonelada de carbono para projetos florestais MDL, segundo Scheidt (2008), de US\$ 12,00 por tonelada fixada. Esse valor foi então multiplicado pelo total de carbono removido, obtendo-se o valor desta floresta em pé para cada método de estimativa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Correlação entre fator de expansão de biomassa (FEB) e demais variáveis

Pela tabela 1, observa-se a correlação entre a variável fator de expansão de biomassa (FEB) com as demais variáveis envolvidas neste estudo. Ocorre uma alta correlação linear com a variável densidade

básica da madeira (-0,77), fato que pode ser comprovado observando-se o diagrama de dispersão entre essas duas variáveis (Figura 2). Essa tabela também mostra uma baixa correlação com as variáveis biomassa (-0,17) e volume comercial (-0,31). A baixa correlação com essas duas variáveis pode também ser observado pelos diagramas de dispersão nas figuras 3 e 4. Nesses diagramas, observa-se que não há um padrão de distribuição entre os pontos, caracterizando-se uma correlação fraca.

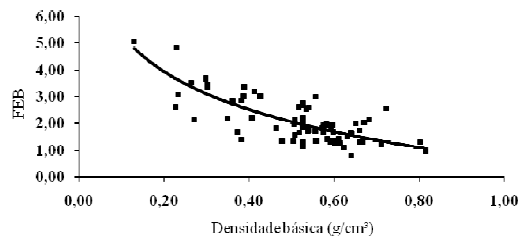


Figura 2. Diagrama de dispersão e linha de tendência entre fator de expansão de biomassa e densidade básica.

Figure 2. Diagram of dispersion and line trend between biomass expansion factor and density basic.

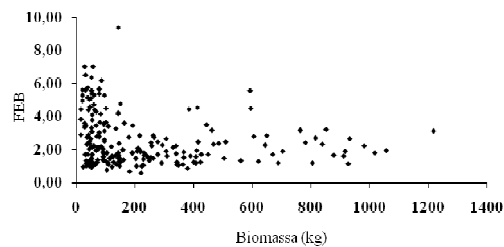


Figura 3. Diagrama de dispersão entre fator de expansão de biomassa e biomassa.

Figure 3. Diagram of dispersion between biomass expansion factor of biomass and biomass.

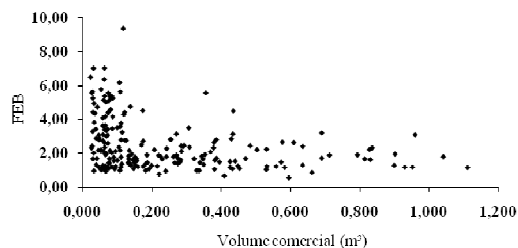


Figura 4. Diagrama de dispersão entre fator de expansão de biomassa e volume comercial.

Figure 4. Diagram of dispersion between biomass expansion factor of biomass and commercial volume.

A figura 5 apresenta os valores dos fatores de expansão por classes de DAP. Observa-se que, apesar da variável fator de expansão ser diretamente proporcional à biomassa em sua expressão matemática, os seus valores não obedecem a essa tendência ao longo das classes de diâmetro.

Tabela 1. Coeficientes de correlação linear entre as variáveis densidade, biomassa, volume comercial e o fator de expansão de biomassa (FEB).

Table 1. Coefficients linear correlation between variables density, biomass, commercial volume and biomass expansion factor (BEF).

	Densidade (g/cm ³)	Biomassa (kg)	Volume comercial (m ³)	FEB
Densidade (g/cm ³)	1			
Biomassa (kg)	0,30	1		
Volume comercial (m ³)	0,31	0,92	1	
FEB	-0,77	-0,17	-0,31	1

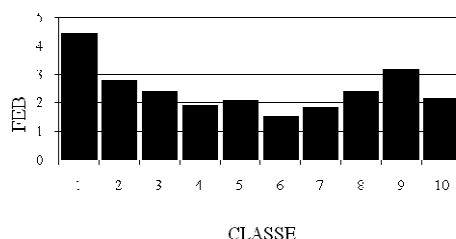


Figura 5. Fator de expansão de biomassa por classes de diâmetro.

Figure 5. Biomass expansion factor by the diameter classes.

Da classe 1 a 4, os seus valores diminuem, enquanto que da classe 6 a 9, aumentam. Essa flutuação de valores é explicada pelo fato de que essa variável não é somente influenciada matematicamente pela biomassa, mas também pelo volume da árvore e pela densidade básica da espécie, ocorrendo uma relação inversamente proporcional.

Estimativa de biomassa

As estimativas de biomassa são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2. Estimativa média de biomassa (t.ha⁻¹), conforme método de estimativa.

Table 2. Average estimative of biomass (t.ha⁻¹), by the estimative method.

Método	Biomassa (t.ha ⁻¹)	Diferença pelo modelo (%)
Biomassa em função do volume	153,58	
FEB médio	157,71	2,68 (↑)
FEB por espécie	161,30	5,02 (↑)
FEB por classes de DAP	164,18	6,90 (↑)

O método que apresentou resultado mais próximo da estimativa realizada pela equação de biomassa em função do volume foi o que utilizou FEB médio, uma vez que a diferença foi de 2,68% para mais, enquanto que por FEB por espécie (77) a diferença chegou a 5,02% para mais, e por FEB em classes de DAP a diferença chegou a 6,90% para mais, sendo a maior diferença apresentada.

Estudos de biomassa e carbono em floresta heterogênea envolvendo a variável fator de expansão não são muito comuns na literatura. No Brasil, destaca-se o trabalho realizado por Brown *et al.* (1989) na região amazônica, em que foram utilizados os dados de inventário florestal do Projeto RADAMBRASIL, juntamente com os inventários da FAO (HEINSDIJK, 1958). Ambos objetivaram estimar o volume comercial de madeira visando subsidiar projetos de exploração comercial. Essas estimativas foram baseadas em aproximadamente 3000 parcelas de 1 ha distribuídas em toda a região amazônica.

Conforme a tipologia florestal, ou seja, floresta não explorada, explorada e não produtiva, foram utilizados, respectivamente, os valores para os fatores de expansão de 1,74, 1,90 e 2,0, sendo o estoque de biomassa aérea estimada entre 138 a 192 t.ha⁻¹. Brown *et al.* (1989) mencionaram que no Sri Lanka, país

cuja floresta já sofreu intervenção, a estimativa de estoque de biomassa total acima do solo situou-se no intervalo entre 153 e 221 t.ha⁻¹.

Estimativa de carbono

As estimativas de carbono são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3. Estimativa média de carbono (t.ha⁻¹), conforme método de estimativa.

Table 3. Average estimative of carbon (t.ha⁻¹), by the estimative method.

Método	Carbono (t.ha ⁻¹)	Diferença pelo modelo (%)
Carbono em função do volume	64,48	
FEB médio	65,98	2,32 (↑)
FEB por espécie	67,74	5,05 (↑)
FEB por classes de DAP	68,98	6,97 (↑)
Método sugerido pelo IPCC	76,69	18,93 (↑)

Comparando-se as estimativas em que foram utilizados fatores de expansão com a realizada pela equação de carbono em função do volume, verifica-se um comportamento semelhante às estimativas de biomassa, ou seja, um aumento de 2,32% para FEB médio, 5,05% para FEB por espécie (77) e 6,97% para FEB por classes de DAP. Utilizando-se o método sugerido pelo IPCC, ocorreu também um aumento de 18,93%.

Pignard *et al.* (2000), utilizando fatores de expansão médio na estimativa do estoque de carbono (t.ha⁻¹) em florestas naturais na França, chegaram aos seguintes resultados, conforme o ano em que foram realizadas as pesquisas: 1981 (48,3), 1986 (51,4) e 1991 (54,6).

Haripriya (2000), em estudos de biomassa e carbono na Índia, obteve uma estimativa de carbono de 82,45 t.ha⁻¹ em florestas “Spruce”, 74,35 t.ha⁻¹ em florestas “Fir-spruce”, 72,15 t.ha⁻¹ em florestas “Blue-pine”, 68,5 t.ha⁻¹ em florestas “Dipteocarpus” e 69,4 t.ha⁻¹ em florestas “Evergreen”.

Na estimativa de estoque de carbono utilizando-se fatores de expansão em povoamentos de *Acácia mearnsii* De Wild., Schneider *et al.* (2005) encontraram, para a idade de 7 anos, 99,46 t.ha⁻¹ no índice de sítio de 20, 82,98 t.ha⁻¹ no índice de sítio 16 e 46,13 t.ha⁻¹ no índice de sítio 12. Esses autores mencionaram que esse método mostrou-se bastante eficiente, pois o erro relativo médio foi baixo, quando considerado o total da amostragem, estratificada por sítios e idade, indicando ser uma boa opção para obtenção com baixo custo do estoque de biomassa e carbono das florestas, bastando conhecer o volume, a densidade básica da madeira, a proporção de biomassa e a concentração de carbono.

Comparando-se os resultados alcançados na estimativa de carbono deste estudo com os resultados de outras pesquisas referidas acima, verifica-se que estão bem próximos uns dos outros, constatando-se grande confiabilidade na metodologia desenvolvida.

Valoração monetária da floresta e o papel do mercado do carbono

A partir das estimativas geradas sobre as quantidades de carbono fixadas por hectare, foram estimadas também as quantidades de CO₂ que seriam removidas da atmosfera por ocasião do uso do carbono pelas plantas, mostradas na tabela 4. Essa tabela mostra que a menor quantidade de CO₂ removida foi estimada pelo método do modelo selecionado para biomassa em 236,43 t.ha⁻¹, enquanto que a maior foi estimada pelo método em que foi utilizado o valor default (0,5) do IPCC, com um valor de 281,20 t.ha⁻¹.

Observa-se na tabela 5 que a menor avaliação, US\$ 2837,16 ha⁻¹, foi dada pelo método do modelo selecionado para biomassa, enquanto que a maior foi dada pelo método em que foi utilizado o valor sugerido pelo IPCC (2001), com um valor de US\$ 3374,40 ha⁻¹.

Lacerda *et al.* (2009) afirmam que os valores encontrados na literatura sobre fixação de carbono na forma de CO₂-equivalente são variáveis. O próprio IPCC recomenda que seja desenvolvida para cada situação uma metodologia específica, o que confere credibilidade para o projeto. Para florestas tropicais nas Américas, o IPCC (2006) apresenta valores de 60 a 400 t.ha⁻¹, o que corresponde a uma faixa de 103,4 a 689,3 t.ha⁻¹ de CO₂-equivalente. Observando os valores encontrados nesta pesquisa, apresentados na tabela 5, verifica-se que estão dentro do intervalo de valores apresentados pelo IPCC (2006). Bufo (2008) mostra que o uso de uma equação desenvolvida especificamente para uma determinada situação apresenta

uma diferença de mais de 100% na estimativa de biomassa e carbono em florestas restauradas com essências nativas de alta diversidade quando comparada com uma equação geral.

Tabela 4. Dióxido de carbono (CO₂) removido da atmosfera (t.ha⁻¹), conforme método de estimativa.

Table 4. Carbon dioxide (CO₂) removed from the atmosphere (t.ha⁻¹), by the estimative method.

Método	Carbono estimado (t.ha ⁻¹)	CO ₂ removido (t.ha ⁻¹)
Biomassa em função do volume	64,48	236,43
FEB médio	65,98	241,93
FEB por espécie (77)	67,74	248,38
FEB por classes de DAP	68,98	252,93
Método sugerido pelo IPCC	76,69	281,20

Tabela 5. Valor monetário da floresta (US\$ ha⁻¹) por método de estimativa.

Table 5. Monetary value of the forest (US\$ ha⁻¹) by the estimative method.

Método	Carbono removido (t.ha ⁻¹)	Valor da floresta (US\$)/ha
Carbono em função do volume	236,43	2837,16
FEB médio	241,93	2903,16
FEB por espécie (77)	248,38	2980,56
FEB por classes de DAP	252,93	3035,16
Método sugerido pelo IPCC	281,20	3374,40

Lacerda *et al.* (2009), em pesquisa sobre avaliações da quantidade de CO₂-equivalente removida da atmosfera pela biomassa aérea de reflorestamento de áreas degradadas, alcançaram os seguintes resultados, conforme o município da pesquisa, todos no estado de São Paulo: Ibaté (95,15 t.ha⁻¹), Valparaíso (66,18 t.ha⁻¹), Guaraçai (53,56 t.ha⁻¹) e Penápolis (70,57 t.ha⁻¹), com uma média de 71,37 t.ha⁻¹.

Balbinot (2004), em estudos sobre implantação de florestas geradoras de carbono no sul do estado do Paraná, estimou a quantidade CO₂-equivalente removido da atmosfera em florestas naturais em seus diferentes estágios sucessionais: inicial (135,64 t.ha⁻¹), médio (240,41 t.ha⁻¹) e avançado (498,20 t.ha⁻¹).

As estimativas de CO₂-equivalente removido da atmosfera realizadas neste estudo apresentaram resultados dentro do intervalo esperado pelas pesquisas realizadas em florestas naturais acima citadas, significando que a metodologia desenvolvida poderá ser aplicada em outras pesquisas de mesma natureza.

CONCLUSÕES

- A metodologia da derivação do volume comercial em estoque de biomassa e carbono apresentou resultados satisfatórios, pois se encontraram muito próximos daquela realizada por modelos de regressão. A maior diferença entre esses dois métodos, tanto para estoque de carbono como para biomassa, ficou em torno de 6,5%.
- A relação inversa observada entre as variáveis fator de expansão de biomassa e densidade básica da madeira é entendida como uma forma de compensação, para que em árvores com densidades altas a sua biomassa não seja superestimada.
- A variação dos valores da variável fator de expansão de biomassa entre as classes de DAP não obedece a um padrão de variação, uma vez que essa variável é influenciada não só pela biomassa e volume comercial como também pela densidade básica da madeira.
- A correlação entre a variável fator de expansão de biomassa e as variáveis biomassa e volume comercial é fraca, uma vez que, além de ser influenciada pela densidade básica da madeira e volume comercial, depende também do sítio florestal, espécie e tratamentos silviculturais.
- A estimativa em que é utilizado o fator de expansão médio, apesar de não ser tão específico em sua utilização quanto o fator por espécie e por classes de DAP, apresenta melhores resultados quando se compara com as estimativas realizadas por modelos de regressão.

REFERÊNCIAS

- ALEXEIEV, V.; BIRDSEY, R.; STAKANOV, V.; KOROTKOV, I. Carbon in vegetation of Russian forests. Methods to estimate storage and geographical distribution. **Water and soil**, v. 82, p. 271-382, 1995.
- APPS, M. J.; KURZ, W. A. The role of Canadian forests in the global carbon budget. In: KANNINEN, M. (Ed.). **Carbon balance of world's forested ecosystems: towards a global assessment**. Finland: SILMU, 1994. p. 14-39.
- BALBINOT, R. **Implantação de florestas geradoras de créditos de carbono: estudo de viabilidade no sul do estado do Paraná, Brasil**. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.
- BROWN, S.; LUGO, A. E. Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes. **Science**, Washington, D. C., n. 223, p. 1290-1293, 1984.
- BROWN, S.; GILLESPIE, A. J. R.; LUGO, A. E. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. **Forest Science**, Lawrence, v. 35, p. 881-902, 1989.
- BROWN, S. **Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer**. Rome: FAO, 1997. 55 p.
- BUFO, L. V. B. 2008. **Restauração florestal e estoque de carbono em modelos de implantação de mudas sob diferentes combinações de espécies e espaçamentos**. Dissertação de Mestrado, ESALQ/USP, 87 pp.
- CAMPOS, C. P. de. **A conservação das florestas no Brasil, mudança do clima e o mecanismo de desenvolvimento limpo no Protocolo de Quioto**. 169 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Estratégico). Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- HARIPRIYA, G. S. Estimates of biomass in Indian forests. **Biomass and Bioenergy**, 19: 245-258, 2000.
- HEINSDIJK, D. 1958. **Report to the government of Brazil on a forest inventory in the Amazon Valley**. Part 3: Region between rio Tapajós and rio Madeira. FAO Report n° 969 & Part 4: Region between rio Tocantins and rios Guama and Capin, FAO Report n° 992. Expand Technical Assistance Program (FAO/58/8131), Food and Agriculture Organization, Roma, Itália.
- HIGUCHI, N.; CHAMBERS, J.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; PINTO, A. C. M.; SILVA, R. M.; TRIBUZY, E. S. Dinâmica e balanço do carbono da vegetação primária da Amazônia Central. **Floresta**, 34(3), set./dez. 2004, 295-304, Curitiba-PR.
- HIGUCHI, N.; CARVALHO JÚNIOR, J. A. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: Seminário Emissão x Sequestro de CO₂ – Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil, 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, 1994. p. 125-145.
- HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest mensuration**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1982. 402 p.
- IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro, 1992. 92 p.
- IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2001 – Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of working group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. McCarthy, J. J. *et al.* (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York. 2001.
- _____. EGGELSTONS, S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; TODD, N.; TANABE, K. (Eds.). 2006. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Instituto de Estratégias Ambientais Globais (IGES) para o IPCC. Japão.

- JOHNSON, W. C.; SHARPE D. M. The ratio of total to merchantable forest biomass and its application to the global carbon budget. **Canadian Journal of Forest research**, Ottawa, v. 13, p. 372-383, 1983.
- LACERDA, J. S.; COUTO, H. T. Z.; HIROTA, M. M.; PASISHNYK, N.; POLIZEL, J. L. Estimativa de biomassa e carbono em áreas restauradas com plantio de essências nativas. **Centro de Métodos Quantitativos do Depto. de Ciências Florestais, ESALQ**. Universidade de São Paulo. METRVM (ISSN 1519-5058), nº 5/nov/2009.
- LINDNER, M.; KARJALAINEN, T. Carbon inventory methods and carbon mitigation potentials of forests in Europe: a short review of recent progress. **Europe Journal Forest Research**. 126: 149-156, 2007.
- MARTINELLI, L. A.; MOREIRA, M. Z.; BROWN, I. F.; VICTORIA, R. L. Incertezas associadas às estimativas de biomassa em florestas tropicais. Seminário Emissão X Sequestro de CO₂ – Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil, Rio De Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CURD, 1994, p. 197-221.
- PÁSCOA, F.; MARTINS, F.; GONZÁLES, R. S.; JOAO, C. Estabelecimento simultâneo de equações de biomassa para o pinheiro-bravo. Simpósio Iberoamericano de Gestión y Economía Forestal, 2, 2004, Barcelona. **Título...** Barcelona: p. i-f, 2004.
- PHILIP, M. S. **Measuring trees and forests**. 2. ed. New York: CAB International, 1994. 336 p.
- PIGNARD, G.; DUPOUEY, J.; ARROUAYS, D.; LOUSTAU, D. Carbon stocks estimates for French forests. **Biotechnol. Agron. Soc. Environ**, 4(4), 285-289, 2000.
- SCHEIDT, P. **Carbono Brasil**. Mercado de Carbono. Disponível em: <<http://www.carbono.isnet.com.br>>. Acesso em 22/04/2008.
- SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; GIACOMELLI SOBRINHO, V.; SCHNEIDER, P. S. P. Determinação indireta do estoque de biomassa e carbono em povoamentos de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild). **Ciência Florestal**, v. 15, n. 4, 2005.
- SCHÖNE, D.; SCHULTE, A. Forstwirtschaft Nach Kyoto: **Ansätze** zur quantifizierung und betrieblichen Nutzung von Kohlenstoffsenken. **Forstarchiv**, Hannover, v. 70, p. 167-176, 1999.
- SHARP, D. D.; LIETH, H.; WHIGHAM, D. Assessment of regional productivity in North Carolina. In: LIETH, H.; WHITTAKER, R. H. (Eds.). **Primary...** New York: Springer, p. 131-146, 1975.
- SOMOGYI, Z.; CIENCIALA, E.; MÄKIPÄÄ, R., MUUKKONEN, P.; LEHTONEN, A.; WEISS, P. Indirect methods of large forest biomass estimation. **Europe Journal Forest Research**, February, 2006.
- TURNER, D. P.; HOEPPER, G. J.; HARMON, M. E.; LEE, J. J. A carbon budget for forest of the conterminous United States. **Ecological Applications**, Tempe, v. 5, p. 421-436, 1995.

