

Quantificação de carbono florestal em povoamentos de *Araucaria angustifolia* no sudoeste do estado do Paraná

Quantification of forest carbon on planted forests of *Araucaria angustifolia* in southwest of state Paraná

Luis Carlos Ratuchne^{1(*)}
Jessica Calderari Brustolim²
Henrique Soares Koehler³
Luciano Farinha Watzlawick⁴
Carlos Roberto Sanquetta⁵
Priscila Antunes Schamne⁶

Resumo

Esta pesquisa objetivou estimar o carbono total fixado na biomassa de um povoamento de *Araucaria angustifolia*, utilizando Equações de Regressão, Fatores de Expansão da Biomassa (FEB) e Razão de Raízes (R). Com uma base de dados composta por determinações de biomassa e teores de carbono de 51 árvores de *A. angustifolia*, oriundas de dois povoamentos localizados nos municípios de Quedas do Iguaçu e General Carneiro, estado do Paraná, foram ajustados modelos matemáticos de regressão lineares e não-lineares para estimar o carbono e o volume total, e formular uma equação para a estimativa do carbono total utilizando o

-
- 1 Dr.; Matemático; Chefe da Divisão de Serviços Gerais e Manutenção do *Campus* CEDETEG da Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO; Endereço: Rua Simeão Camargo Varela de Sá, 3, Vila Carli, CEP: 85040-080, Guarapuava, Paraná, Brasil; E-mail: lratuchne@unicentro.br (*) Autor para correspondência
 - 2 Engenheira Ambiental da Helisul Taxi Aéreo Ltda; Endereço: Rodovia das Cataratas, km 16,5 - Núcleo São João, CEP: 85853-000, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil; E-mail: jessicabrustolim@gmail.com
 - 3 Dr.; Engenheiro Florestal; Professor do Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná – UFPR; Endereço: E-mail: koehler@ufpr.br
 - 4 Pós-Doutor; Engenheiro Florestal; Professor do Departamento de Agronomia e dos Programas de Pós-Graduação em Agronomia, Ciências Florestais e Bioenergia da Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO; Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq; Endereço: Rua Simeão Camargo Varela de Sá, 03, Bairro Vila Carli, CEDETEG, CEP: 85040-080, Guarapuava, Paraná, Brasil E-mail: farinha@unicentro.br
 - 5 PhD.; Engenheiro Florestal; Professor/Pesquisador da Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, FUPEF e do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal do Paraná, UFPR; Membro do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC, Especialista da Convenção Quadro das Nações Unidas para as Mudanças Climáticas – UNFCCC, Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq; Endereço: Avenida Lothário Meissner, 900, Jardim Botânico, CEP: 80210-170, Curitiba, Paraná, Brasil; E-mail: sanquetta@ufpr.br
 - 6 MSc.; Professora do Departamento de Ciências Biológicas, Setor de Ciências Agrárias e Ambientais da Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO; Endereço: Rua Simeão Camargo Varela de Sá, 3, Vila Carli, CEP: 85040-080, Guarapuava, Paraná, Brasil; E-mail: pri_schamne@yahoo.com.br

Recebido para publicação em 13/03/2013 e aceito em 04/04/2015

FEB e R. Os resultados mostraram que as equações de regressão ajustadas podem ser consideradas uma boa alternativa como método indireto de quantificação do carbono total em árvores de *A. angustifolia* das áreas em estudo, dependendo do nível de precisão desejado das estimativas. A melhor equação ajustada para a estimativa do carbono foi $\log C = -1,2538 + 2,3474 \cdot \log DAP$, com coeficiente de determinação ajustado de 0,86 e índice de Furnival de 24,11%. Já a estimativa do conteúdo de carbono utilizando FEB e a R não foi eficiente, não sendo um método recomendado para estudos com condições semelhantes ao presente trabalho.

Palavras-chave: equações de regressão; fator de expansão de biomassa (FEB); razão de raízes (R).

Abstract

This study aimed to estimate the carbon stock in forest biomass of a population of *Araucaria angustifolia*, using regression equations, biomass expansion factors (BEF) and root ratio (R). With a database composed of determinations of biomass and carbon content of 51 *A. angustifolia* trees, coming from two settlements in the municipalities of Quedas do Iguaçu and General Carneiro, in the state of Paraná, it was adjusted the mathematical models of linear and non-linear regression to estimate the carbon and total volume and also to formulate an equation to estimate the carbon stock using the BEF and R. The results showed that the adjusted regression equations can be regarded as a good alternative as indirect method for quantifying the total carbon in *A. angustifolia* trees in the areas under study, depending on the desired level of accuracy of the estimates. The best adjusted equation to estimate the carbon stock was $\log C = -1.2538 + 2.3474 \cdot \log DAP$, with determination coefficient of 0.86 and Furnival index of 24.11%. Since the estimate of carbon content using FEB and R was not efficient, it is not a recommended method for studies with similar conditions to this work.

Key words: regression equations; biomass expansion factor (BEF); root ratio (R).

Introdução

O aumento da produção de energia e de alimentos, decorrentes das atividades humanas, ocasionou um aumento da concentração de CO₂ na atmosfera, que passou de 280 ppm (partes por milhão), na era pré-industrial, para 430 ppm (intervalo de confiança de 340 a 520 ppm), no ano de 2011 (IPCC, 2014). A elevação dessa concentração do CO₂ na atmosfera, bem

como de outros gases responsáveis pelo efeito estufa, ameaçam a humanidade com o aquecimento global, que poderá causar um aumento da temperatura média do planeta entre 3 a 5 °C nos próximos 100 anos (RENNER, 2004).

O acúmulo de CO₂ na atmosfera é decorrente, principalmente, de duas atividades humanas: a queima de combustíveis fósseis (gás natural, carvão, petróleo) e a destruição e queima das florestas. Dessa forma, o

controle do aumento das emissões do dióxido de carbono torna-se, imprescindível, em função das possíveis consequências que possam ocorrer no ambiente terrestre (WATZLAWICK et al., 2004).

As florestas têm importância significativa no equilíbrio do ciclo do carbono, pois estocam grande quantidade desse elemento fixado na biomassa acima e abaixo do solo. E, por acumular na estrutura orgânica das árvores elementos poluentes nocivos à qualidade de vida, cresce a cada dia o interesse pelos estudos da biomassa e do carbono florestal.

Conhecer a capacidade de absorção do carbono das diversas tipologias naturais, bem como o estoque de carbono fixado na biomassa florestal, pode fornecer informações importantes para a tomada de decisões quanto ao manejo, à proteção e à valoração das florestas.

Martinelli et al. (1994) definem a biomassa como a quantidade expressa em massa do material vegetal disponível em uma floresta, podendo ser expressa por massa verde ou massa seca. Segundo Caldeira (2003), a massa verde refere-se ao material fresco amostrado, contendo uma variável proporção de água, e a massa seca refere-se à biomassa obtida após secagem do material em estufa.

A biomassa é composta pelos principais elementos químicos que compõem a estrutura orgânica das plantas, carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O), e por uma grande variedade de outros elementos, em várias formas químicas. Dentre eles, estão os elementos químicos conhecidos como nutrientes, que são considerados essenciais para a vida. Devido à quantidade necessitada pelas plantas, são divididos em macronutrientes (nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio

(Mg) e enxofre (S)) e micronutrientes (ferro (Fe), manganês (Mn), boro (B), cobre (Cu), zinco (Zn), molibdênio (Mo) e cloro (Cl)) (MALAVOLTA, 1980).

As concentrações dos constituintes da biomassa vegetal variam com a espécie, fase de desenvolvimento, estado nutricional, condições edafoclimáticas e com a parte do vegetal considerada. Em média, a biomassa florestal é composta por 50% de carbono, 43% de oxigênio, 6% de hidrogênio e 1% dos demais elementos minerais (LARCHER, 2001). Watzlawick et al. (2004) encontraram teores de carbono em espécies florestais da Floresta Ombrófila Mista Montana variando de 34,01% a 47,34%, dependendo da espécie e do componente considerado (fuste, casca, galhos, folhagem e miscelânea).

Sanquetta (2002) cita que os trabalhos de quantificação da biomassa e do carbono florestal podem ser realizados por determinações ou estimativas. O autor distingue determinação de estimativa, sendo que a determinação é uma medição real feita diretamente na biomassa. Já a estimativa é feita utilizando relações quantitativas ou matemáticas, utilizando dados provenientes de inventários florestais.

Higuchi e Carvalho Júnior (1994) acrescentam que a estimativa de biomassa florestal consiste em correlacioná-la com alguma variável de fácil obtenção e que não requeira a destruição do material vegetal, como razões, regressões, derivação do volume, fatores de expansão ou de conversão e por dados de sensoriamento remoto. No entanto, Silveira et al. (2008) destacam que, para a realização de trabalhos de estimativa da biomassa florestal, na maioria dos casos, são necessárias amostragens destrutivas, para que as estimativas utilizando métodos não destrutivos sejam as mais próximas da realidade.

mais frio menor que 18 °C. Caldeira et al. (2003a) definiram os solos da área em estudo como Latossolo Roxo, com um horizonte A bem desenvolvido, teores médios de cálcio e magnésio, profundo, friável, poroso, bem drenado e com boa capacidade de retenção de água, textura franca a argilosa.

A fazenda em que está inserida a área em estudo, localizada no município de General Carneiro, possui uma área de 4.210,75 hectares e a formação florestal original da região, conforme a classificação do IBGE (2012a), é a Floresta Ombrófila Mista Montana. Conforme Caldeira et al. (2003b), seguindo a classificação de Köppen, o município possui um clima caracterizado como Subtropical Úmido Mesotérmico (Cfb), ou seja, temperado com verões frescos e invernos com ocorrência de geadas severas, sem estação seca. A média das temperaturas do mês mais quente é inferior a 22 °C e a do mês mais frio é inferior a 18 °C. O solo da região, de acordo com a EMBRAPA (2008), tem predomínio a associação de Neossolo Regolítico Húmico típico, de textura argilosa, álico, de relevo suave ondulado, e de Nitossolo Vermelho Distroférrico típico, de textura argilosa e relevo suave ondulado.

No presente trabalho foram utilizadas duas bases de dados, sendo uma para o ajuste de equações volumétricas, composta por 51 árvores de araucária (30 árvores da Fazenda Araupel e 21 árvores da propriedade das Indústrias Pedro N. Pizzatto Ltda), cubadas pelo Método de Smalian. A outra base de dados, utilizada no ajuste das equações de carbono, era composta por trinta árvores dessa mesma espécie, as quais foram cortadas e pesadas pelo método direto, nos anos de 2003 e 2004. Esse número foi definido admitindo-se, no máximo, 20% de erro

na variável estoque individual de carbono. Foram determinadas as massas frescas em campo de toda a sua biomassa, utilizando uma balança com precisão de 10 g, separadas em compartimentos (fuste sem casca, casca, galhada, folhagem e raízes). As raízes foram escavadas até a profundidade de 1,0 m, lavadas e secas antes da pesagem, dentro da área de projeção da copa de cada indivíduo. Os dados de Diâmetro Altura do Peito (DAP), (diâmetro a 1,3 m) e altura total (H) das árvores também foram coletados.

Foram retiradas amostras de 300 a 500 g de biomassa de cada compartimento para análise em laboratório. Essas amostras de biomassa fresca foram secas em estufa a 70 °C até a obtenção da massa constante. Com base na relação entre massa fresca e seca, foram calculadas as massas secas de todos os compartimentos da biomassa levantados. Em seguida, as amostras foram trituradas para análise do teor de carbono, empregando-se o método de combustão seca em câmara de infravermelho. Com base nos teores de carbono, foram calculados os estoques de carbono de todos os compartimentos da biomassa, que, somados, resultaram no estoque total individual de carbono (C). As análises de laboratório foram realizadas ao longo do ano de 2004.

A partir da massa seca estimada para as árvores, foram calculados os Fatores de Expansão de Biomassa (FEB) e as Razões de Raízes (R). Nos cálculos do FEB das árvores foi utilizada a fórmula abaixo, indicada pelo IPCC (2006), a saber:

$$FEB = \frac{P_{copa} + P_{fuste}}{P_{fuste}} = \frac{P_{aéreo}}{P_{fuste}} \quad (1)$$

Em que:

FEB = fator expansão da biomassa (adimensional);

P_{copa} = peso seco da copa da árvore (g);
 P_{fuste} = peso seco do fuste da árvore (g);
 $P_{aéreo}$ = peso seco do fuste da árvore +
 peso da copa da árvore (g).

A razão de raízes foi calculada segundo a fórmula abaixo, também indicada pelo IPCC (2006), ou seja:

$$R = \frac{P_{raiz}}{P_{aéreo}} \quad (2)$$

Em que:

R = razão de raízes (adimensional);

$P_{aéreo}$ = peso seco da parte aérea da árvore (g);

P_{raiz} = peso seco da raiz da árvore (g).

Foi construída uma matriz de correlação simples com as variáveis dendrométricas H (altura total) (m), idade (anos), DAP (diâmetro a 1,3 m) (cm) carbono total (kg), FEB e R da base de dados utilizada no ajuste das equações de regressão, visando à estimativa do carbono total, com o objetivo de verificar o grau de correlação entre essas variáveis.

Foram testados nove modelos matemáticos (Tabela 1), encontrados na literatura florestal, para estimar o volume total e o carbono total das árvores em estudo. As variáveis independentes dos modelos ajustados são o DAP , a altura total (H), a idade e suas variações. Os modelos matemáticos ajustados são lineares e não lineares, diferindo entre si

Tabela 1 - Modelos matemáticos utilizados no ajuste das equações de volume e carbono

Modelos Matemáticos de Regressão		
1	1	$\log Y = \beta_0 + \beta_1 * \log DAP$
2	2	$Y = \beta_0 + \beta_1 * \log (DAP^2 * H)$
3	3	$\log Y = \beta_0 + \beta_1 * \log (DAP^2 * H)$
4	4	$\log Y = \beta_0 + \beta_1 * \log DAP + \beta_2 * \log H$
5	5	$\frac{1}{Y} = \beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{DAP}$
6	6	$\frac{1}{Y} = \beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{DAP^2 * H}$
7	7	$Y = \beta_0 * (1 + \beta_1 * EXP(\beta_2 * DAP)^{\beta_3})$
8	8	$Y = \beta_0 * (1 + \beta_1 * EXP(\beta_2 * (DAP^2 * H)^{\beta_3}))$
9	9	$Y = \beta_0 * (1 + \beta_1 * EXP(\beta_2 * IDADE)^{\beta_3})$

Fonte: Autores (2013).

Nota: Sendo: Y = carbono total e volume; DAP = diâmetro a 1,3 m; H = altura total; β_i = coeficientes dos modelos.

pelo método de ajuste. Os modelos lineares são aqueles em que os coeficientes das variáveis independentes estão elevados à potência unitária e o método de ajuste mais utilizado é o Método dos Mínimos Quadrados. Já os modelos matemáticos de regressão não lineares, são aqueles em que os coeficientes das variáveis independentes estão elevados a potências não unitárias, bem como a outros coeficientes ou variáveis. Para esses modelos, o ajuste pode ser feito pelo Método de Gauss-Newton.

Como critérios para seleção das melhores equações de regressão ajustadas, foram adotados maior coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), menor erro padrão da estimativa em porcentagem ($S_{yx} \%$) ou menor índice de Furnival (IF%) (SILVA; BAILEY, 1991), no caso as equações logarítmicas, e a análise gráfica

dos resíduos. O R^2_{aj} , o $S_{yx} \%$ e o IF% foram calculados pelas seguintes fórmulas:

Em que: SQ_{reg} : soma dos quadrados da regressão; SQ_{res} : soma dos quadrados dos resíduos; SQ_{tot} : soma dos quadrados totais; GL_{res} : graus de liberdade dos resíduos; n : número de observações; p : número de coeficientes do modelo; \bar{y} : média da variável dependente e f' : derivada da função.

O ajuste dos modelos lineares foi feito pelo método dos mínimos quadrados, utilizando o *software* Microsoft Office Excel 2003[®]. Para os modelos não lineares, o ajuste foi feito utilizando o *software* estatístico Statistica[®], pelo método de Gauss-Newton.

Além das equações de regressão, foi elaborada uma equação para a estimativa do

$$R^2 = \frac{SQ_{reg}}{SQ_{tot}} \quad R^2_{aj} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) * (1 - R^2) \quad S_{yx} = \sqrt{\frac{SQ_{res}}{GL_{res}}} \quad S_{yx} \% = \left(\frac{S_{yx}}{\bar{y}} \right) * 100 \quad (3)$$

$$IF = f'(Y)^{-1} \exp\left(\frac{n-p}{2n}\right) * (S_{yx}) \quad IF \% = \left(\frac{IF}{\bar{y}} \right) * 100 \quad (4)$$

carbono, utilizando o Fator de Expansão de Biomassa e o quociente de Razão das Raízes, da seguinte forma:

$$C = (v * d * FEB) * (1 + R) * F_c \quad (5)$$

Sendo que o C representa a quantidade de carbono, o volume (v), estimado pelas equações ajustadas, a densidade básica da madeira (d) utilizada foi $0,55 \text{ g.cm}^{-3}$ (MATOS et al., 2006). Foram utilizados o FEB, o quociente R e o Fator de Carbono (F_c) médio das árvores da base em estudo.

Resultados e discussão

As bases de dados utilizadas no ajuste das equações volumétricas e de

carbono apresentaram grande variação nos seus dados, como pode ser observado nas tabelas 2 e 3. O maior coeficiente de variação foi observado para o conteúdo de carbono, 379,13%, e o menor para a altura total, na base de dados de carbono, com 12,39%. Essa grande variabilidade nos dados pode ser explicada pelo processo de amostragem das árvores, pois foram amostrados indivíduos de diversos tamanhos, buscando uma grande amplitude e maior representatividade nos dados.

A matriz de correlação simples (Tabela 5) mostrou que a variável independente com maior correlação com o carbono foi o DAP. Para as demais variáveis independentes, o coeficiente de correlação foi menor.

Tabela 2 – Caracterização da base de dados utilizada no ajuste das equações volumétricas

Estadísticas	Volume (m ³)	DAP (cm)	Altura Total (m)
Média	0,3818	18,19	14,21
Desvio Padrão	0,4798	11,49	7,59
Mínimo	0,0012	2,07	2,73
Máximo	1,6521	39,09	26,40
Coefficiente de Variação	125,65	63,16	53,45
Contagem	51	51	51

Fonte: Autores (2013).

Tabela 3 – Caracterização da base de dados utilizada no ajuste das equações para estimativa do carbono

Estadísticas	C (kg)	DAP (cm)	Altura Total (m)	Idade (anos)	FEB	R
Média	113,01	24,69	16,69	21,67	2,39	0,12
Desvio Padrão	70,50	5,62	2,07	5,85	0,25	0,04
Mínimo	24,69	14,29	12,72	14	2,05	0,05
Máximo	277,83	33,39	19,90	31	3,06	0,2
Coefficiente de variação	379,13	22,76	12,39	27	10,44	34,29
Contagem	30	30	30	30	30	30

Fonte: Autores (2013).

Ratuchne (2010), em trabalhos com a Floresta Ombrófila Mista, encontrou coeficiente de correlação simples significativamente maior para a variável DAP quando elevada ao quadrado ou combinada com a altura. Segundo Draper e Smith (1981), a variável independente mais importante para compor um modelo de regressão é aquela que apresenta maior coeficiente de correlação simples com a variável dependente, e, no presente trabalho, foi o DAP.

No ajuste das equações volumétricas, a maioria das equações apresentou bom ajuste, como pode ser observado na tabela 4 e nas figuras 2 e 3, apresentando coeficientes de determinação acima de 0,90. De acordo com os critérios de seleção adotados, a melhor equação ajustada foi a 2 ($v = 0,00025 + 0,00004 * \log DAP^2 H$) com $R^2_{aj} = 0,99$ e $S_{yx} \% 9,36\%$.

A análise gráfica dos resíduos mostrou uma boa distribuição das equações 2 e 3, sem tendências e com aleatoriedade ao longo do eixo das abscissas, o que é desejável. Para

Tabela 4 – Resultados do ajuste das equações para estimativa do volume

EQUAÇÃO	β_0	β_1	β_2	β_3	R^2_{aj}	$S_{yx} \%$	IF%
1	-3,7737	2,4515	-	-	0,96		20,25
2	0,00025	0,00004	-	-	0,99	9,36	
3	-3,8757	0,8665	-	-	0,94		23,41
4	-3,8483	1,9593	0,5979	-	0,95		22,34
5	0,0000	1007,4974	-	-	0,27	117,63	
6	8,8977	8872,5174	-	-	0,25	112,34	
7	0,0004	8,01	159,42	0,2	0,72	65,92	
8	0,1574	98,4761	0,0043	0,0139	0,90	39,35	

Fonte: Autores (2013).

Tabela 5 - Matriz de correlação simples entre as variáveis H, DAP, idade, C total, FEB e R

Variáveis	DAP	H	Idade	C total	FEB	R
DAP	1	-	-	-	-	-
H	0,86	1	-	-	-	-
Idade	0,57	0,63	1	-	-	-
C total	0,92	0,79	0,65	1	-	-
FEB	-0,36	-0,45	-0,67	-0,26	1	-
R	0,73	0,55	0,38	0,54	-0,44	1

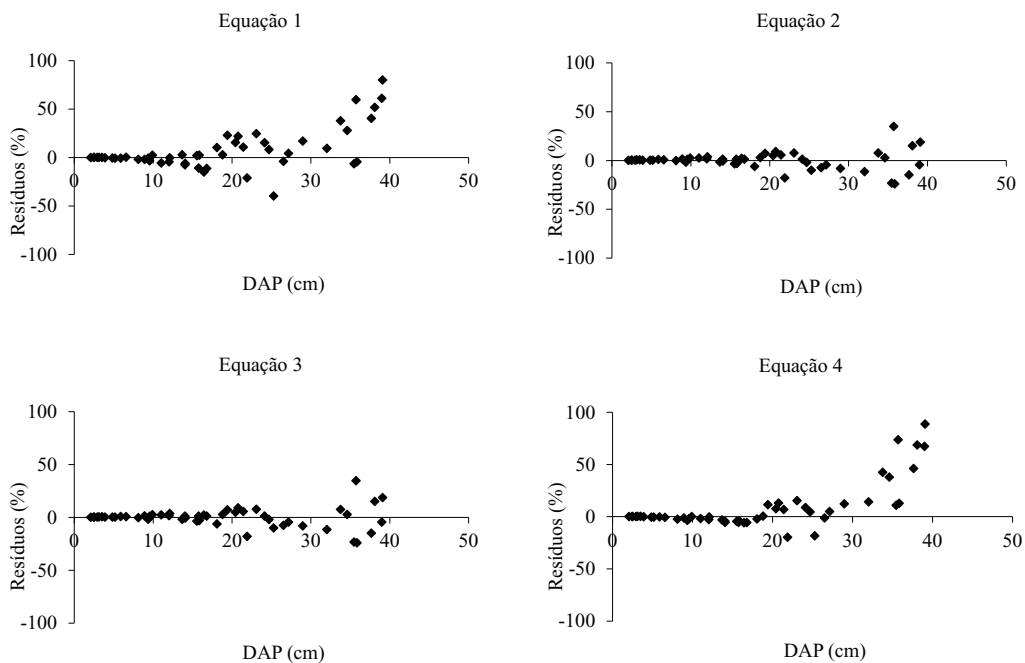
Fonte: Autores (2013).

as demais equações, a distribuição gráfica dos resíduos mostrou que as equações não apresentaram bom ajuste, com tendências em superestimativas em árvores com maiores DAP, nas equações 1, 4, 5 e 6.

O ajuste das equações para estimativa do carbono total apresentou resultados muito distintos entre os modelos. A equação com as melhores

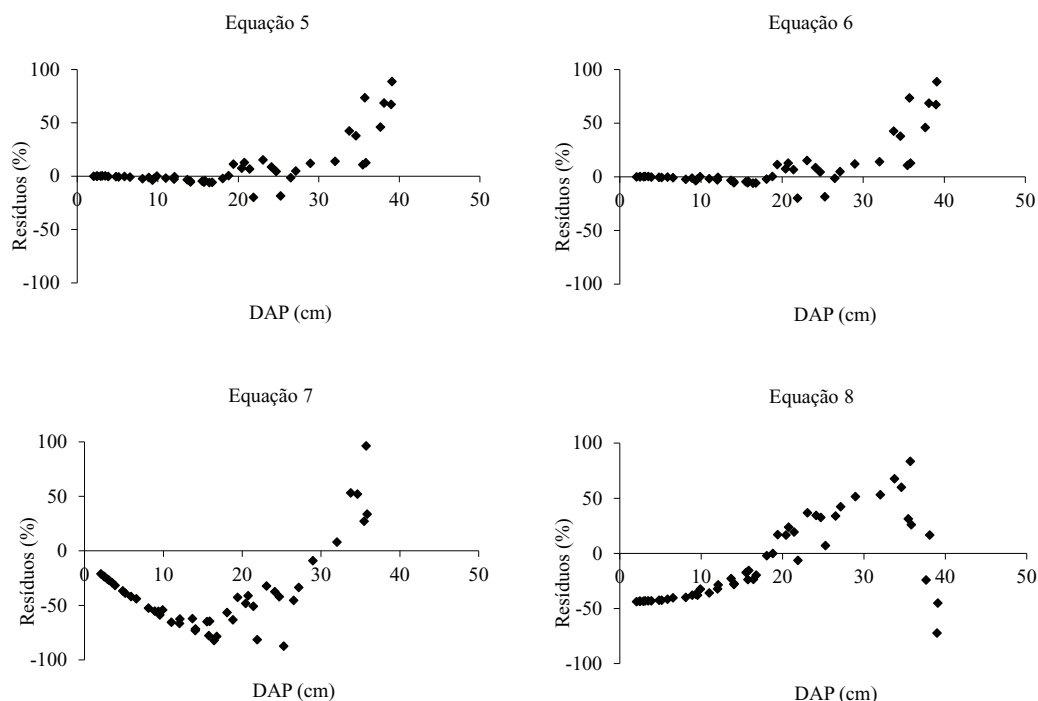
estatísticas de precisão foi ajustada a partir do modelo 1, como pode ser observado na tabela 6. No entanto, as estatísticas sugerem que os modelos de regressão não forneceram equações satisfatoriamente precisas, pois as estatísticas das equações ajustadas são similares às ajustadas para o carbono total em florestas naturais. Resende et al. (2001) ajustaram equações

Figura 2 – Distribuição gráfica dos resíduos das equações 1, 2, 3 e 4 para estimativa do volume



Fonte: Autores (2013).

Figura 3 – Distribuição gráfica dos resíduos das equações 5, 6, 7 e 8 para estimativa do volume



Fonte: Autores (2013).

com $R^2 = 98,64\%$ e $S_{yx} = 25,66\%$ para a estimativa do carbono total estocado no Cerrado, que consideraram as equações satisfatórias para estimativa do carbono arbóreo daquela tipologia florestal, e

citaram a grande variabilidade natural existente na estrutura da vegetação e na forma dos troncos das espécies arbóreas existentes no cerrado. Já Urbano (2007) ajustou equações com $R^2 = 0,959$ e S_{yx}

Tabela 6 – Grandezas estatísticas de ajuste dos modelos para estimar o carbono total

EQUAÇÃO	β_0	β_1	β_2	β_3	R^2_{aj}	$S_{yx} \%$	IF %
1	-1,2538	2,3474	-	-	0,86		24,11
2	7,2153	0,0095	-	-	0,85	20,14	
3	-1,7967	0,9506	-	-	0,85		24,16
4	-1,5232	2,1400	0,4559	-	0,86		24,25
5	-0,0196	0,7469	-	-	0,79	39,04	
6	-0,0002	100,3029	-	-	0,86	20,61	
7	6,7244	14,6741	0,5043	0,1789	0,85	20,13	
8	43,8700	0,3804	0,0015	0,0547	0,81	22,58	
9	4,2179	23,1514	0,0977	0,6133	0,38	40,61	

Fonte: Autores (2013).

= 21,75% para a estimativa do carbono total fixado em bracatingais nativos e considerou os resultados satisfatórios.

Nesse sentido, eram esperados ajustes mais precisos para as árvores em estudo, já que se trata de um povoamento. Mas, como o método de quantificação foi o não, que permite a partir de medidas de fácil obtenção, como o DAP e a altura, estimar a quantidade de carbono total fixado em uma árvore de *A. angustifolia*, possibilita, 24,11% pode não ser um nível de erro demasiadamente alto a ponto de descartar o método, principalmente, se considerar a morosidade e os recursos financeiros necessários para a quantificação da biomassa e do carbono florestal por métodos diretos, os quais envolvem derrubadas, pesagens e rotinas de laboratórios.

Observou-se, ainda, que a equação com melhor ajuste para a estimativa do carbono total apresentou somente a variável independente DAP, sugerindo que a inclusão da variável altura total nem sempre melhora o ajuste da equação de regressão.

A distribuição gráfica dos resíduos mostra que todas as equações apresentaram distribuição de resíduos semelhante, com tendências apenas em aumentar a amplitude dos resíduos à medida que aumenta o DAP as árvores. Uma distribuição gráfica desejável seria aquela em que os resíduos estão distribuídos de forma aleatória em relação ao eixo do DAP, mas mantendo

distâncias pequenas em relação a esse eixo. Quando apenas um ponto fica fora do padrão de distribuição dos resíduos, esse ponto deve ser investigado, pois pode representar um erro de medição ou outro erro sistemático. Já, quando vários pontos formam uma tendência ou apresentam grande amplitude em relação ao eixo das abscissas, pode indicar que o modelo não se ajustou de forma satisfatória aos dados e, dessa forma, não serve para explicar a variável dependente.

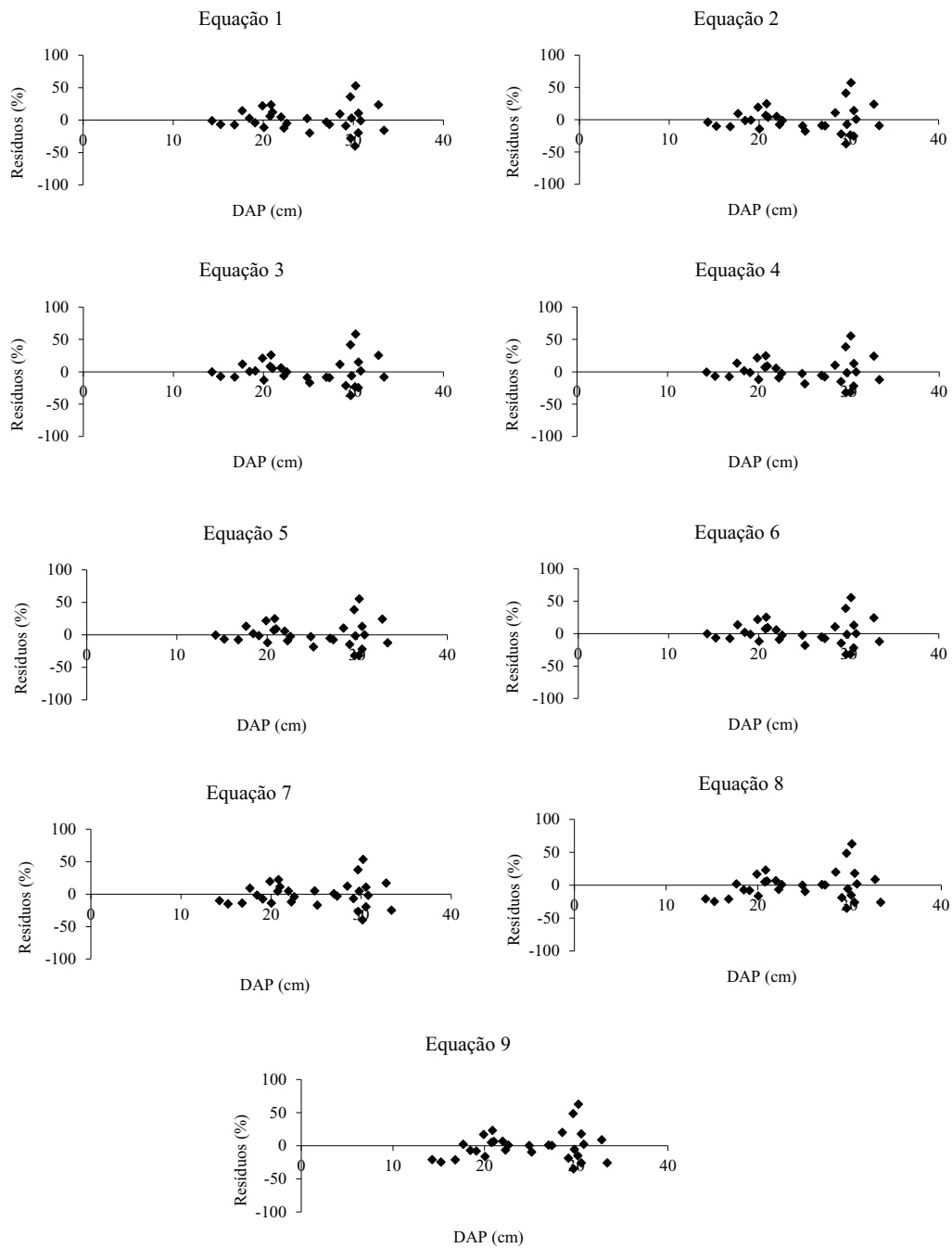
A figura 4 apresenta a distribuição gráfica dos resíduos das equações ajustadas para o carbono total.

A equação de carbono formulada utilizando o FEB e o R médios como variáveis independentes, apresentou baixa precisão nas estimativas, com desempenho inferior às demais equações ajustadas. O coeficiente de variação ficou em 88,20% e a equação subestimou o carbono total em todas as classes de diâmetros, como pode ser observado na figura 5.

A baixa precisão das estimativas de C pode estar relacionada às variáveis utilizadas na equação, que foram estimativas de volume, utilizando uma equação de regressão que, por sua natureza já apresentam erros, bem como o FEB e o R médios que, também, podem não representar bem o conjunto de dados.

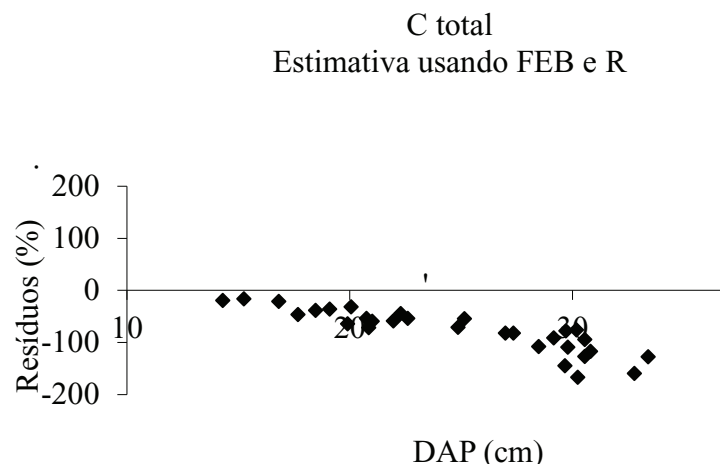
Dessa forma, a estimativa do carbono total fixado nas árvores em estudo, utilizando o Fator de Expansão de Biomassa e o quociente de Razão da Raiz, não é recomendada.

Figura 4 – Distribuição gráfica dos resíduos das equações ajustadas para estimativa do carbono total



Fonte: Autores (2013).

Figura 5 – Distribuição gráfica dos resíduos das estimativas do carbono total, usando o FEB e o R



Fonte: Autores (2013).

Conclusão

O ajuste das equações de regressão para estimativa do carbono total apresentou resultados satisfatórios e similares aos encontrados por outros autores em trabalhos com outras espécies e tipologias florestais.

Embora as equações de regressão não tenham apresentado a precisão esperada nas estimativas, as equações ajustadas podem ser utilizadas para quantificação do carbono das árvores em estudo, dependendo do grau de precisão desejado. Sendo a equação recomenda $\log C = -1,2538 + 2,3474 \cdot \log DAP$;

A estimativa do conteúdo de carbono utilizando Fatores de Expansão da Biomassa

e Razão de Raízes não se mostrou eficiente para as árvores em estudo.

O uso de equações de regressão para a estimativa do conteúdo de carbono na biomassa florestal da área em estudo pode ser uma boa alternativa como método indireto de quantificação.

Agradecimentos

Nossos agradecimentos ao Professor Carlos Roberto Sanquetta pelo fornecimento dos dados da Fazenda Araupel e da propriedade das Indústrias Pedro N. Pizzatto Ltda, à Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, FUPPEF, e à Universidade Federal do Paraná, UFPR, que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; SHEEREN, L. W.; WATZLAWICK, L. F. Relação hipsométrica para *Araucaria Angustifolia* (Bert.) O. Ktze na região sudoeste do Estado do Paraná. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais**, Curitiba, v. 1, n. 2, p. 79-88, 2003a.

CALDEIRA, M. V. W.; SOARES, R. V.; MARQUES, R.; WISNIEWSKI, C. Biomassa e nutrientes em *Myrsine ferruginea* (Ruiz & Pav.) Mez e *Myrsine umbellata* Mart. **Revista Floresta**, n. 33, p. 265-273. 2003b.

CALDEIRA, M. V. W. **Determinação de biomassa e nutrientes em uma floresta ombrófila mista montana em General Carneiro**, Paraná. 2003. 176 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 2. ed. New York: J. Wiley & Sons, 1981. 709p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Mapa de solos do estado do Paraná**: legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa, 2008. 74p.

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, 1., 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, 1994. p. 126-153.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Atlas geográfico escolar**. 6. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 215p. :il., mapas, retrs., colors.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGEa, 2012a. 271 p.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014: Synthesis Report Summary for Policymakers**. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2014.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. 2006. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch>>. Acesso em: 20 out. 2012.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2001. 531p.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1980. 251p.

MARTINELLI, L. A.; MOREIRA, M. Z.; BROWN, I. F.; VICTORIA, R. L. Incertezas associadas às estimativas de biomassa em florestas tropicais: o exemplo de uma floresta situada no estado de Rondônia. In: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQUESTRO DE CO₂: UMA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, 1., 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, 1994. p. 197-221.

MATTOS, P. P. de; BORTOLI, C. de; MARCHESAN, R.; ROSOT, N. C. **Caracterização física, química e anatômica da madeira de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze**. Comunicado Técnico 160, Colombo: EMBRAPA, 2006.

MICROSOFT. Microsoft Office Excel 2003®. Redmond: ©2003 Microsoft Corporation, 2003.

PREFEITURA MUNICIPAL DE QUEDAS DO IGUAÇU. **Dados do Município**. Disponível em: <<http://www.quedasdoiguacu.pr.gov.br/dados.htm>>. Acesso em: 28 fev. 2011.

RATUCHNE, L. C. **Equações alométricas para estimativa de biomassa, carbono e nutrientes em uma floresta ombrófila mista**. 2010. 111 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2010.

RENNER, R. M.; **Sequestro de carbono e a viabilização de novos reflorestamentos no Brasil**. 2004. 147 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

RESENDE, D.; MERLIN, S.; SANTOS, M. **Sequestro de carbono: uma experiência concreta**. Palmas: Instituto Ecologia, 2001. 178p.

SANQUETTA, C. R. Metodologias para determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B.; GOMES, F. dos S. **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, 2002. 264p.

SILVA, J. A. A.; BAILEY, R. L. Considerações teóricas sobre o uso correto do índice de Furnival na seleção de equações volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 15, n. 3, p. 323-327, 1991.

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**, Curitiba, v. 38, n. 1, jan./mar. 2008.

STATSOFT. Statistica. [S.I.]: ©2013 StatSoft Inc., 2013.

URBANO, E. **Quantificação e estimativa da biomassa aérea e do carbono fixado em árvores de bracatingais nativos da região metropolitana de Curitiba**. 2007. 160 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; SANQUETTA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W. Teores de carbono em espécies da floresta ombrófila mista. In: SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B. **Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas**. Curitiba: AM Impressos, 2004. 205p.