

# ESTIMATIVA DE BIOMASSA E CARBONO EM PLANTIOS DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze UTILIZANDO IMAGENS DO SATÉLITE IKONOS II<sup>1</sup>

*Carbon and Biomass Estimate in Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze Plantations Using Ikonos II Satellite Images

Luciano Farinha Watzlawick<sup>2</sup>, Flávio Felipe Kirchner<sup>3</sup>, Luiz Carlos Couto<sup>4</sup> e Robi Tabolka dos Santos<sup>5</sup>

**Resumo:** O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia, utilizando imagens do satélite IKONOS II, para realizar estimativas de biomassa e carbono orgânico em plantações de *Araucaria angustifolia*. O desenvolvimento metodológico foi realizado, inicialmente, com a análise estatística (matriz de correlação) das bandas e dos índices de vegetação, com os dados de biomassa e carbono orgânico e com o ajuste e a seleção de equações, para estimar a biomassa e o carbono orgânico (variáveis dependentes) em função de variáveis provenientes das imagens de satélite, sendo a reflectância das bandas MS-1, MS-2, MS-3, MS-4, Razão de Bandas (MS-4/MS-3), NDVI e SAVI (variáveis independentes), e quantificar as variáveis dependentes para toda a área de estudo. O uso de imagens provenientes do satélite IKONOS II apresentou resultados bastante satisfatórios, o que evidencia que elas devem ser utilizadas, necessitando para tanto que modelos matemáticos sejam ajustados.

**Palavras-chave:** Biomassa, carbono orgânico, sensoriamento remoto, IKONOS II e plantações de *Araucaria angustifolia*.

**Abstract:** This work aimed to develop a methodology using IKONOS II satellite images to estimate biomass and organic carbon in *Araucaria angustifolia* plantations. The methodological development was initially carried out by statistically correlating (correlation analysis) the bands and vegetation indices with the biomass and organic carbon data, equation adjustment and selection to estimate biomass and organic carbon (dependent variables) in function of satellite image variables, with the reflectance of the bands being MS-1, MS-2, MS-3, MS-4, Bands ratio (MS-4/MS-3), NDVI and SAVI ( independent variables), and quantification of the dependent variables for the entire study area. The use of IKONOS II satellite images presented rather satisfactory results, making their use viable provided mathematical models are adjusted.

**Key words:** Biomass, organic carbon, remote sensing, IKONOS II, *Araucaria angustifolia* plantations.

---

<sup>1</sup> Trabalho convidado.

<sup>2</sup> Dr. Prof. Adjunto Departamento de Eng. Ambiental da Universidade Estadual do Centro-Oeste – UNICENTRO, BR 153, Km 7, Bairro Riozinho, 84.500-000 Irati-PR, <farinha@irati.unicentro.br>; <sup>3</sup> Dr. Prof. Adjunto do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Av. Lothário Meissner, 3400, 80230-091 Curitiba-PR, <kirchner@floresta.ufpr.br>. <sup>4</sup> Dr. Prof. Adjunto Departamento de Eng. Florestal da UNICENTRO, <luizcouto@irati.unicentro.br>. <sup>5</sup> Acadêmico Graduação em Ciência Florestal da UNICENTRO, <robytabolca@yahoo.com.br>.

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da produção de energia e, ou, da produção de alimentos, decorrentes das atividades humanas, ocasiona um acúmulo da ordem de 3 bilhões de toneladas de carbono por ano (na forma de CO<sub>2</sub>) na atmosfera terrestre. O CO<sub>2</sub> acumulado na atmosfera é originado em grandes quantidades por duas atividades humanas: a queima de combustíveis fósseis (gás natural, carvão e petróleo) e a destruição e queima das florestas. Desta forma, o controle do aumento do dióxido de carbono torna-se imprescindível.

Estudos realizados em 1988 pela *American Association for the Advancement of Science* fazem uma previsão sobre as mudanças climáticas relacionadas ao aumento desses gases, que poderão provocar um aquecimento global, com as temperaturas aumentando dentro de 30 a 90 anos de 2 a 5 °C, o que provocará profundas mudanças, não somente climáticas, mas também ecológicas, econômicas e sociais.

Os compostos de carbono constituem grande parte da biomassa florestal, sendo necessário desenvolver estudos quanto a métodos de quantificação, nos diversos componentes da planta, para entender melhor o “seqüestro” e o “armazenamento” de carbono da atmosfera pelas florestas. Estes estudos são trabalhosos, demorados e muito onerosos, podendo ser realizados por meio de métodos diretos e indiretos. Pelo método direto, as árvores são cortadas e seus componentes separados e pesados. No método indireto são utilizadas equações alométricas ou imagens de satélite para realizar as estimativas.

Com os atuais avanços tecnológicos com relação às imagens provenientes de sensores remotos, e também com os desenvolvimentos relacionados aos avanços no processamento das imagens, tem-se obtido uma melhor caracterização da estrutura das florestas e, conseqüentemente, de sua biomassa e carbono estocado.

Para Watzlawick et al. (2002), as imagens de satélite podem ser importantes para realizar estimativas de biomassa e carbono, tanto para o cálculo de áreas, como também, com os atuais avanços tecnológicos, para o tratamento digital das imagens de satélite, o que permite a caracterização das diferentes estruturas florestais, associando o conteúdo de biomassa e carbono a essas imagens. Este é um método indireto e não-destrutivo, podendo-se estimar parâmetros biofísicos pelas propriedades espectrais da vegetação, conciliando-se inventários de campo com dados espectrais das imagens.

Pelo exposto, contata-se a necessidade de realizar estudos que viabilizem a quantificação de biomassa e carbono, utilizando métodos indiretos, pois estes possibilitam estimativas em menor tempo e, conseqüentemente, com menores custos.

O presente trabalho possui como objetivos: a) desenvolver uma metodologia, utilizando imagens do satélite IKONOS II, para realizar estimativas de biomassa e carbono orgânico em plantios de *Araucaria angustifolia*; b) ajustar e testar equações para estimar variáveis de biomassa e carbono orgânico em função de variáveis provenientes das imagens do satélite IKONOS II; d) avaliar e testar a aplicabilidade de realizar estimativas de biomassa e carbono orgânico a partir de dados provenientes de imagens do satélite IKONOS II; e e) quantificar a biomassa e o carbono orgânico na área de estudo.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo localiza-se entre as coordenadas geográficas 26°20'35" e 26°26'13" latitude sul e 51°19'49" e 51°25'29" longitude oeste, no município de General Carneiro – PR. A propriedade, pertencente às Indústrias Pedro N. Pizzatto Ltda., possui uma área total de 4.210,75 ha, sendo 86,71 ha com plantios de *Araucaria angustifolia*.

O clima da região, conforme a classificação de Köppen, é Subtropical Úmido Mesotérmico (Cfb), tendo os verões frescos e os invernos com a ocorrência de severas geadas, não possuindo estações secas. A média das temperaturas dos meses mais quentes é inferior a 22 °C e a dos meses mais frios é superior a 18 °C (Paraná, 1987).

Conforme o Boletim de Pesquisa (1984), o substrato geológico da região é formado pelo derrame de Trapp da formação da Serra Geral. Os solos são orgânicos e hidromórficos, com o predomínio de Neossolos Litólicos, Cambissolos e Argissolos (Paraná, 1987). As características topográficas dividem-se em plana, ondulada e montanhosa, sendo a última de maior predominância (EMBRAPA, 1999).

A vegetação natural refere-se à Floresta Ombrófila Mista ou floresta com araucária (IBGE, 1992), que cobria originalmente cerca de 200.000 km<sup>2</sup> em todo o Brasil, ocorrendo no Paraná (40% de sua superfície), em Santa Catarina (31%), no Rio Grande do Sul (25%)

e em manchas esparsas no sul do Estado de São Paulo (3%), adentrando até o sul de Minas Gerais e Rio de Janeiro (1%) (Carvalho, 1994).

Os plantios de *Araucaria angustifolia* não tiveram intervenções silviculturais relacionadas à desrama, porém em todos ocorreu práticas de desbaste em diferentes épocas. Nos povoamentos com 32 e 31 anos de idade foram realizados três desbastes, tendo o último sido realizado em 1996 e 1999, respectivamente. Nos demais povoamentos constantes no Quadro 1, ou seja: 30, 29, 25, 24 e 23 anos, foram feitos somente dois desbastes, tendo o último sido realizado em 1993, 1993, 1996, 1996 e 1997.

## 2.2 Metodologia

Antes da realização dos trabalhos com a imagem, foi feita a quantificação da biomassa arbórea e do carbono orgânico arbóreo, utilizando-se o método destrutivo. A quantificação por meio do método destrutivo foi realizada

**Quadro 1** – Informações dendrométricas dos plantios de *Araucaria angustifolia* em diferentes idades  
**Table 1** – Dendrometric information on the *Araucaria angustifolia* plantations at different ages

Idade (anos)	Nº (árv. ha <sup>-1</sup> )	Área Basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	Volume do Fuste (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	Biomassa Arbórea (Mg ha <sup>-1</sup> )	Carbono Orgânico Arbóreo (Mg ha <sup>-1</sup> )
23	970	58,25	613,02	326,27	136,89
24	590	17,76	100,31	73,01	26,82
25	516	38,97	358,77	209,16	88,79
29	536	29,91	219,78	141,43	60,60
30	544	44,43	418,41	295,18	124,81
31	292	50,18	520,21	312,85	140,34
32	449	47,38	518,48	334,87	141,56
$\bar{x}$	556	40,98	392,71	241,82	102,83
S	206	13,55	181,58	102,73	45,29
IC*	556	40,98	392,71	241,82	102,83
	289	18,99	254,41	143,94	63,46

Fonte: Watzlawick (2003).

\* Intervalo de confiança a 99% de probabilidade.

por Watzlawick (2003), com a instalação de uma unidade amostral com as dimensões de 8 x 8 m em cada povoamento, com diferentes idades. Nestas unidades amostrais todas as árvores foram abatidas, os parâmetros dendrométricos medidos e a sua biomassa pesada e amostrada. O material foi analisado no Laboratório de Ecologia Florestal – UFMS.

No laboratório, as amostras foram secas em estufa de renovação e circulação de ar à temperatura constante de 75 °C, até atingir o peso constante, para posterior determinação de peso seco e preparação para análise química do teor de carbono orgânico. Os resultados obtidos por Watzlawick (2003) para biomassa arbórea e carbono orgânico arbóreo, utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, encontram-se no Quadro 1.

### 2.2.1 Processamento da imagem de satélite

As imagens geradas pelo satélite IKONOS II são consideradas de alta resolução. O satélite coleta imagens pancromáticas (preto e branco) com resolução espacial de 1 m e imagens multiespectrais (coloridas) com resolução de 4 m. Foi utilizada imagem adquirida em 10 de dezembro de 2000 (13h22) nas bandas MS-1 (Blue), MS-2 (Green), MS-3 (Red) e MS-4 (VNIR).

### 2.2.2 Correção geométrica da imagem

Foram coletados no campo 15 pontos de apoio com GPS Leica - topográfico SR-510, com precisão de aproximadamente 50 cm. Para aquisição dos pontos de apoio certificou-se que estes estivessem bem distribuídos por toda a imagem, levando-se também em consideração que os pontos fossem de fácil reconhecimento no campo e na imagem.

A correção propriamente dita foi realizada em 11 pontos de apoio, utilizando-se o método do vizinho mais próximo, com polinômio de transformação de 1º grau, nas

bandas MS-1, MS-2, MS-3 e MS-4. O método foi empregado pelo fato de ele melhor preservar o valor original do DN (número digital), pois não envolve médias no processo. Os quatro pontos de apoio restantes foram utilizados para efeito de verificação da correção da imagem.

### 2.2.3 Conversão dos números digitais para radiância/reflectância

Para correção atmosférica nas imagens utilizou-se a metodologia idealizada por Chavez (1988, 1989), citado por Chuvieco (1990), denominada de correção do histograma por seus valores mínimos (*Histogram Minimum Method*, HMM).

A metodologia assume que as áreas (alvos) com forte absorvidade (água, sombras) deveriam apresentar uma radiância espectral muito próxima de 0 (zero), mas na prática o histograma dos DNs da imagem sempre apresenta valor mínimo superior a zero, valor este atribuído ao efeito da dispersão da atmosfera. A banda azul (MS-1) foi estabelecida como referência pelo fato de ela ser a mais afetada pela dispersão e possuir valor mínimo. Calculou-se um fator de correção atmosférica para as demais bandas, utilizando-se a seguinte formulação:

$$ND_{i,j,k}' = ND_{i,j,k} - ND_{\min,k}$$

em que o  $ND$  do pixel  $(i,j)$  na banda  $k$  se ajusta ao  $ND$  mínimo dessa mesma banda.

A conversão dos  $DN$ s para radiância foi realizada, levando-se em consideração os parâmetros de calibração do IKONOS II, conforme informações descritas no Quadro 2, e utilizando-se a seguinte equação:

$$L_{i,j,k} = DN_{i,j,k} \times [CalCoef_k]^{-1}$$

em que  $i,j,k$  = pixel  $i,j$  na banda  $k$  da imagem;  
 $L_{i,j,k}$  = valor da radiância  $mW\ cm^{-2}\ x\ sr^{-1}$ ;  
 $CalCoef_k$  = coeficiente de calibração da

radiância na banda em  $\text{mW cm}^{-2} \times \text{sr}^{-1}$ ; e  $DN_{i,j,k}$  = valor do número digital (DN).

Para realização da conversão dos valores de radiância para valores de reflectância, são considerados os parâmetros relacionados ao momento da aquisição da imagem. A equação utilizada para realizar as conversões foi obtida em comunicações pessoais com Rodrigues (2001):

$$R = \frac{PI \times L \times r^2}{E \times \cos \theta}$$

em que  $R$  = reflectância, adimensional;  $PI$  = 3,14159265;  $L$  = radiância, em  $\text{mW cm}^{-2} \times \text{sr}^{-1}$ ;  $r$  = distância normalizada terra-sol, em unidades astronômicas;  $\theta$  = ângulo zenital solar no centro da imagem, em graus; e  $E$  = constante solar, em  $\text{mW cm}^{-2}$ .

**Quadro 2** - Coeficientes de calibração radiométrica do satélite IKONOS II

**Table 2** - Radiometric calibration coefficients of IKONOS II satellite

Banda Espectral	Coefficiente de Calibração
MS-1 (Blue)	637
MS-2 (Green)	573
MS-3 (Red)	663
MS-4 (VNIR)	503

Fonte: Peterson et al. (2000).

#### 2.2.4 Geração das imagens índice de vegetação

Os índices de vegetação são amplamente utilizados como indicadores da presença e condição da vegetação, geralmente com base em combinações lineares, razões ou transformações de valores espectrais. A principal função realçar a contribuição espectral da vegetação, enquanto se minimiza a

contribuição espectral do solo, do ângulo solar, da vegetação senescente e da atmosfera. No presente estudo foram utilizados três índices de vegetação, descritos a seguir.

Um dos primeiros índices de vegetação foi realizado por Pearson & Miller (1972), a partir de medidas radiométricas realizadas em algumas espécies no laboratório e no campo, gerando o índice da razão simples, definido como:

$$R = \frac{NIR}{R}$$

Em função da sua extensa aplicabilidade nos estudos de monitoramento da vegetação, o NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*, índice de vegetação por diferença normalizada, foi proposto por Rouse et al. (1973), sendo obtido pela seguinte equação:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Huete (1988), visando amenizar o efeito de solo, criou o índice de vegetação ajustado para o solo, SAVI – *Soil Adjusted Vegetation Index*, conforme apresentado a seguir:

$$SAVI = \left( \frac{NIR - R}{NIR + R + L} \right) (1 + L)$$

em que  $NIR$  = reflectância na banda referente ao infravermelho próximo, adimensional;  $R$  = reflectância na banda referente ao vermelho, adimensional; e  $L$  = fator de correção para o solo, adimensional.

O valor da constante  $L$  foi introduzido no sentido de diminuir a influência do brilho do solo e produzir isolinhas de vegetação mais independentes do solo; o valor varia de 0 a 1, dependendo do grau de cobertura no solo. No presente estudo utilizou-se o valor da constante  $L = 0,50$ , por ser ela ideal, pelo conhecimento da área em questão, que possui uma vegetação intermediária.

### 2.2.5 Digitalização dos temas

Com a finalidade de separar as diferentes tipologias, ou seja, plantios florestais de *Araucaria angustifolia* e a Floresta Ombrófila Mista Montana, para que fosse possível a aplicação das equações selecionadas na tipologia em estudo, e de possibilitar a espacialização de biomassa e carbono, realizou-se uma interpretação visual na composição colorida (R G e B), utilizando as bandas MS-1, MS-2 e MS-3 do satélite IKONOS II.

A interpretação foi realizada diretamente na tela do monitor, em que cada polígono pertencente aos povoamentos de *Araucaria angustifolia*, tendo também sido digitalizado o polígono da área pertencente à fazenda. Foram utilizados como critérios de interpretação: textura, cor, forma, bem como as informações de campo e dos mapas realizados pela empresa AEROSAT (2000).

### 2.2.6 Obtenção dos valores de reflectância nas imagens

Com o auxílio do GPS topográfico SR-510, obteve-se a coordenada do centro de cada uma das unidades amostrais. Utilizando as coordenadas das unidades amostrais, procedeu-se à realização de corte na imagem em função do tamanho da unidade amostral (8 x 8 m). Destas imagens foram retirados os valores médios de reflectância dos 4 pixels para os plantios de *Araucaria angustifolia*, os quais foram utilizados para estabelecer a relação entre os dados provenientes de biomassa e carbono com os da imagem. O procedimento descrito foi realizado para as imagens nas bandas MS-1, MS-2, MS-3 e MS-4, bem como para os Índices Razão, NDVI e SAVI.

### 2.2.7 Tratamento estatístico dos dados

O tratamento estatístico dos dados foi inicialmente realizado com a análise da correlação entre as variáveis consideradas, sendo as variáveis biométricas a biomassa

arbórea e o carbono orgânico arbóreo e as variáveis digitais as reflectâncias nas bandas: MS-1, MS-2, MS-3 e MS-4 e as reflectâncias das imagens geradas pelos índices: Razão, NDVI e SAVI.

Para determinar quais os dados (variáveis) provenientes das imagens de sensoriamento remoto que melhor estimam a biomassa arbórea e o carbono orgânico arbóreo fixado, utilizou-se a análise de regressão.

Os dados de biomassa arbórea e do carbono orgânico arbóreo foram considerados variáveis dependentes e os valores provenientes das imagens de sensoriamento remoto, considerados variáveis independentes. Para a análise que envolve todos os dados provenientes das imagens que melhor estimam os valores das variáveis dependentes, utilizou-se o procedimento de análise de regressão múltipla, empregando-se para tanto o modelo de regressão *Stepwise*. Em todas as análises de regressão realizadas, visando julgar qual a melhor equação que estima adequadamente as variáveis em campo, foram realizadas análises do coeficiente de determinação ajustado, erro-padrão da estimativa e da distribuição de resíduos.

### 2.2.8 Quantificação dos resultados

As equações ajustadas e selecionadas com seus respectivos coeficientes foram aplicadas às variáveis selecionadas (imagens ou imagens índice), obtendo-se como resultados as quantidades de biomassa e de carbono orgânico. Procedeu-se também à realização de intervalos de classe fixos tanto para a biomassa como para o carbono, levando em consideração a quantificação obtida diretamente no campo (método destrutivo).

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Correção geométrica da imagem

A correção geométrica foi realizada com o método do vizinho mais próximo, com

polinômio de transformação de 1º grau (Transformação Afim no Plano), utilizando 11 pontos de controle, os quais geraram um RMS (erro médio quadrático) de 0,99 m. Ao utilizar os quatro pontos para verificar a correção da imagem, constatou-se que todos os pontos apresentaram erros inferiores a 1 pixel (4 m). Os resultados obtidos tanto na correção geométrica como na sua verificação podem ser considerados como satisfatórios para a realização do trabalho.

### 3.2 Análise estatística

A utilização da matriz de correlação visou determinar o grau de associação entre variáveis. A matriz de correlação relaciona como variáveis dependentes a biomassa arbórea (BIO) e o carbono orgânico arbóreo (CARB) e como variáveis independentes, as respostas espectrais das diferentes bandas e índices de vegetação das imagens provenientes do satélite, como: MS-1 (banda azul), MS-2 (banda verde), MS-3 (banda vermelha), MS-4 (banda infravermelha), RAZÃO (razão entre a banda MS-4/MS-3), NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada) e SAVI (índice de vegetação ajustado para o solo).

Conforme pode-se constatar no Quadro 3, na análise da matriz de correlação as variáveis dependentes apresentam as maiores correlações negativas com as variáveis espectrais MS-4, RAZÃO de bandas, NDVI e SAVI. A variável espectral MS-3 apresentou um grau de correlação médio tanto para a biomassa como para o carbono; já as variáveis MS-1 e MS-2 apresentaram baixas correlações.

Os resultados obtidos para a variável biomassa arbórea (BIO) são semelhantes aos encontrados para o carbono orgânico arbóreo (CARB), o que era de se esperar, pelo fato de as duas variáveis apresentarem uma alta relação, devido ao uso de um fator para o cálculo de carbono.

Os índices de vegetação testados (RAZÃO, NDVI e SAVI) apresentaram alta correlação, justificada em função de sua composição utilizar as bandas espectrais na região do espectro eletromagnético referente ao vermelho (MS-3) e a região do infravermelho (MS-4), sendo respectivamente uma região de forte absorção e de máxima reflectância. É importante ressaltar que a região espectral referente ao verde (MS-2) também é uma região de reflectância, porém baixa.

A maior correlação é verificada pela variável MS-4 (infravermelho próximo no espectro eletromagnético), possuindo valores de correlação de - 0,82 com relação à variável biomassa arbórea; já a variável correspondente ao carbono orgânico arbóreo apresenta uma correlação de - 0,79.

Observa-se no Quadro 3 que o resultado da matriz de correlação para os plantios de *Araucaria angustifolia* contraria a afirmação realizada por Lillesand & Kiefer (1994), que afirmam que as florestas com espécies folhosas possuem maior reflectância, tanto na região do infravermelho como do vermelho, que as florestas com espécies de coníferas, em função de as folhosas apresentarem maior variabilidade de pigmentos e estruturas celulares. Este comportamento pode ser devido às copas das árvores não serem totalmente fechadas, ficando espaços entreabertos entre elas, o que permite que a vegetação arbustiva, que é composta por espécies folhosas que apresentam uma grande variabilidade de espécies, contribua aditivamente ao comportamento da reflectância espectral do pixel.

#### 3.2.1 Ajuste e seleção de equações de biomassa e carbono orgânico arbóreo

Dentre os modelos testados, aqueles que utilizam o método *stepwise* foram os melhores, tanto para a biomassa arbórea como para o carbono orgânico arbóreo. Porém, as diferenças ocorreram com relação às variáveis

**Quadro 3** – Matriz de correlação entre variáveis dendrométricas e variáveis digitais em plantios de *Araucaria angustifolia*

**Table 3** – Correlation matrix between dendrometric variables and digital variables in *Araucaria angustifolia* plantations

	BIO	CARB	MS-1	MS-2	MS-3	MS-4	RAZÃO	NDVI
MS-1	- 0,20	- 0,22						
MS-2	- 0,24	- 0,23	0,40					
MS-3	- 0,56	- 0,52	- 0,58	- 0,04				
MS-4	<b>-0,82</b>	<b>-0,79</b>	- 0,12	0,44	- 0,80			
RAZÃO	<b>-0,77</b>	<b>-0,75</b>	0,21	0,46	0,65	0,86		
NDVI	- 0,60	- 0,55	- 0,17	0,04	0,77	0,72	0,57	
SAVI	<b>-0,67</b>	<b>-0,65</b>	0,18	0,65	0,39	0,64	0,75	0,48

selecionadas que compõem o modelo; a variável NDVI foi substituída pela MS-4. Nos Quadros 4 e 5 estão os resultados das equações ajustadas para gerar estimativas da biomassa arbórea e carbono orgânico arbóreo, respectivamente.

Essas foram selecionadas como as melhores equações (n° 1), tanto para a biomassa como para o carbono, em virtude de possuírem os maiores coeficientes de determinação com os valores de 0,89 e 0,85, bem como os menores valores de erro-padrão da estimativa para a biomassa arbórea (23,73%) e carbono orgânico arbóreo (28,50%). Ressalta-se que os valores de F calculados possuem uma significância de 5% de probabilidade.

Não foi possível realizar os ajustes com o uso de todas as variáveis independentes (7), em virtude de o número de variáveis independentes ser igual ao número de observações (7). Também não foram possíveis os ajustes de modelos que utilizavam as variáveis MS-1 e MS-2, separadamente.

Avaliando os resultados das regressões selecionadas (método *stepwise*), pode-se constatar pela distribuição dos resíduos padronizados entre os valores medidos da variável dependente e os valores estimados a ocorrência de pontos isolados, conforme se observa nas Figuras 1 e 2. Justifica-se a presença destes

pontos devido ao número reduzido de pares de dados utilizados para gerar o ajuste e pelo fato de entre eles existirem valores discrepantes, sendo necessário um maior número de informações para gerar melhor ajuste.

### 3.2.2 Quantificação da biomassa e o acúmulo de carbono orgânico arbóreo

Utilizando as equações ajustadas e selecionadas foram geradas novas imagens, onde cada pixel passou a representar a quantidade estimada da variável biomassa arbórea ou carbono orgânico arbóreo. No Quadro 6 está a comparação dos resultados de biomassa arbórea e carbono orgânico arbóreo para os plantios de *Araucaria angustifolia*. Para obtenção dos valores reais foi realizada a classificação dos povoamentos da área de estudo, nas mesmas classes de produção (Mg ha<sup>-1</sup>), levando-se em consideração informações fornecidas pela empresa, como: idade, densidade, espécie e condições de manejo, bem como mapas confeccionados pela empresa AEROSAT (2000), nos quais constam as informações de área e idade em cada povoamento. De posse dos povoamentos classificados, estes foram agrupados nas classes consideradas, calculando-se a quantidade de área existente em cada classe de produção (Mg ha<sup>-1</sup>).



**Quadro 4** – Modelos de regressão testados e ajustados para estimar a variável biomassa arbórea ( $BIO = \text{ }_0 + \text{ }_1(MS-1) + \text{ }_2(MS-2) + \text{ }_3(MS-3) + \text{ }_4(MS-4) + \text{ }_5(RAZÃO) + \text{ }_6(NDVI) + \text{ }_7(SAVI)$ )

**Table 4** – Adjusted and tested regression models to estimate the variable tree biomass ( $BIO = \text{ }_0 + \text{ }_1(MS-1) + \text{ }_2(MS-2) + \text{ }_3(MS-3) + \text{ }_4(MS-4) + \text{ }_5(RATIO) + \text{ }_6(NDVI) + \text{ }_7(SAVI)$ )

N <sup>o</sup>	Modelo de Regressão	F	R <sup>2</sup> <sub>Ajust</sub>	Syx	Syx (%)
1	2344,9912 - 5408,4550.(MS-4) - 59710,0585.(MS-1) + 43030,1002.(MS-2)	14,32*	0,89	53,69	23,73
2	2869,8362 - 75021,8942.(MS-3)	2,28	0,18	153,15	67,67
3	2290,7645 - 8329,5136.(MS-4)	9,98*	0,59	106,80	47,20
4	1135,7843 - 86,3280.(RAZÃO)	7,22*	0,51	118,23	52,25
5	2296,6459 - 2406,6306.(NDVI)	2,81	0,23	147,89	65,35
6	1831,3441 - 3769,2024.(SAVI)	4,12	0,34	136,85	60,47

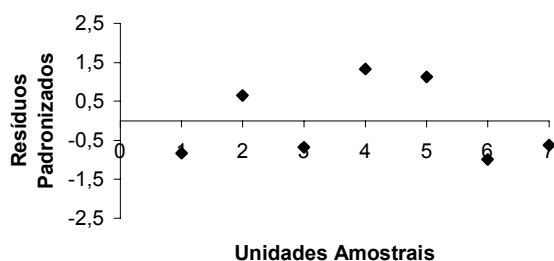
\* Significativo a 5% de probabilidade.

**Quadro 5** – Modelos de regressão testados e ajustados para estimar a variável carbono orgânico arbóreo ( $CARB = \text{ }_0 + \text{ }_1(MS-1) + \text{ }_2(MS-2) + \text{ }_3(MS-3) + \text{ }_4(MS-4) + \text{ }_5(RAZÃO) + \text{ }_6(NDVI) + \text{ }_7(SAVI)$ )

**Table 5** – Adjusted and tested regression models to estimate the variable tree organic carbon ( $CARB = \text{ }_0 + \text{ }_1(MS-1) + \text{ }_2(MS-2) + \text{ }_3(MS-3) + \text{ }_4(MS-4) + \text{ }_5(RATIO) + \text{ }_6(NDVI) + \text{ }_7(SAVI)$ )

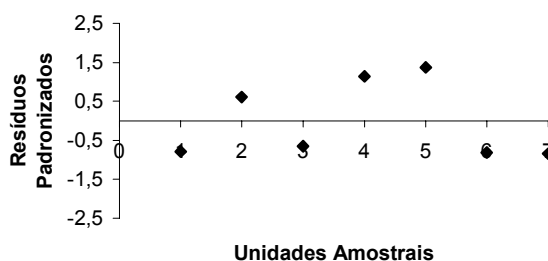
N <sup>o</sup>	Modelo de Regressão	F	R <sup>2</sup> <sub>Ajust</sub>	Syx	Syx (%)
1	987,6234 - 2229,3905.(MS-4) - 27074,6911.(MS-1) + 18721,0345.(MS-2)	9,81*	0,85	27,63	28,50
2	1161,0528 - 30082,7323.(MS-3)	1,88	0,12	67,65	69,78
3	954,4297 - 3451,7853.(MS-4)	8,18*	0,54	48,88	50,41
4	477,7004 - 35,9930.(RAZÃO)	6,29	0,46	52,81	54,47
5	917,7581 - 948,0914.(NDVI)	2,18	0,16	66,26	68,34
6	769,4061 - 1575,9437.(SAVI)	3,75	0,31	59,99	61,87

\* Significativo a 5% de probabilidade.



**Figura 1** – Distribuição dos resíduos do modelo de regressão selecionado para estimar a biomassa arbórea.

**Figure 1** – Residue distribution of the regression model selected to estimate tree biomass.



**Figura 2** – Distribuição dos resíduos do modelo de regressão selecionado para estimar o carbono arbóreo.

**Figure 2** – Residue distribution of the regression model selected to estimate tree carbon.

As estimativas foram obtidas após a aplicação dos modelos selecionados, classificados dentro de cada intervalo de classe considerada, realizando-se a quantificação em área, conforme consta no Quadro 6.

Pode-se observar no Quadro 6 que as diferenças totais quanto à área real e à estimada com a utilização dos modelos, tanto na biomassa como no carbono orgânico, foram pequenas, devendo-se ressaltar que para a biomassa ocorreu uma subestimativa de 3,58% e para o carbono orgânico uma superestimativa de 1,14%, para os plantios de *Araucaria angustifolia*. Os erros tanto de subestimativa como de superestimativa podem ser em função de os mapas utilizados terem sido confeccionados em 2000, utilizando-se fotografias aéreas de 1992, podendo ter ocorrido erros de interpretação na etapa de mapeamento. Os erros também podem ser decorrentes do processo de digitalização (interpretação visual) realizada no presente trabalho.

Nas diferenças dentro dos intervalos de classes ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), deve-se chamar a atenção para os valores referentes à primeira classe, tanto nas estimativas de áreas para a biomassa arbórea como para o carbono orgânico arbóreo, que apresentam valores subestimados de 48,65 e 45,70%, respectivamente. Esta diferença ocorre nos plantios que possuem as copas das árvores entreabertas e quando abaixo das mesmas existir vegetação arbustiva composta por espécies folhosas, que contribuem aditivamente na reflectância espectral do pixel, ou devido a problemas relacionados a sombras, que podem ter

contribuído, não fornecendo bons resultados na quantificação desta classe.

Nos plantios de *Araucaria angustifolia*, em função de existirem árvores de espécies diferentes daquelas plantadas, como *Ocotea porosa* (Nees) Barroso e *Nectandra* sp., optou-se por ter uma classe fora dos limites que foram encontrados, com a finalidade de verificar se os modelos utilizados poderiam detectar esta variação. Estas áreas com estas espécies não estariam sendo contabilizadas, podendo-se excluí-las, bem como possíveis áreas com floresta natural que tenham sido digitalizadas conjuntamente com as áreas dos povoamentos. Pelos resultados encontrados na 3ª classe, verifica-se que foram obtidos bons resultados com a realização do procedimento.

#### 4 CONCLUSÃO

A análise estatística mostrou existir alta relação entre as variáveis biomassa arbórea e carbono arbóreo, que apresentaram uma média correlação com as variáveis digitais. As variáveis que apresentaram melhores correlações foram o MS-4, RAZÃO, NDVI e SAVI. Os resultados obtidos nos ajustes das equações selecionadas podem ser considerados bons em função da quantidade de pares de dados utilizados.

As estimativas das variáveis consideradas, utilizando os dados provenientes das imagens do satélite IKONOS II, mostraram que os valores obtidos propiciam realizar a quantificação de biomassa arbórea e do carbono arbóreo.

**Quadro 6** – Biomassa e carbono orgânico arbórea real e estimada em hectare (ha) nos plantios de *Araucaria angustifolia*

**Table 6** – Real and estimated tree biomass and organic carbon, in hectare (ha) in the *Araucaria angustifolia* plantings

Classe ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )	Biomassa		Classe ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )	Carbono	
	Real (ha)	Estimada (ha)		Real (ha)	Estimada (ha)
50 – 220	12,21	6,27	50 – 220	12,21	6,63
220 – 390	74,50	75,98	220 – 390	74,50	79,58
> 390	0,00	1,35	> 390	0,00	1,49
Total	86,71	83,60	Total	86,71	87,70

A realização desta metodologia, utilizando métodos não-destrutivos, possibilita estimativas em menor tempo e, conseqüentemente, com menores custos, bem como uma quantificação para áreas com a mesma tipologia, desde que se disponha de informações prévias (levantamentos de biomassa, carbono e equações) do ecossistema considerado.

O presente desenvolvimento metodológico reforça ainda mais a utilização das técnicas de sensoriamento remoto em levantamentos florestais, considerando-se principalmente que o estudo foi realizado com imagens provenientes de um sensor de alta resolução. A utilização desta metodologia vem contribuir e subsidiar possíveis ações ligadas à quantificação e ao monitoramento de áreas com potencialidades de projetos de seqüestro de carbono, proporcionando a tomada de decisões e negociações com bases científicas.

É importante salientar que os resultados deste estudo são válidos somente para o caso de plantios de *Araucaria angustifolia*, nas condições aqui estudadas e consideradas, pois os resultados podem variar para outros tipos de vegetação e para outros métodos de determinação das variáveis (biomassa e carbono orgânico).

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEROSAT. **Mapa temático – Fazenda Santa Cândida**. General Carneiro, 2000a. 1 mapa: color; 80 x 100 cm. Escala 1:1.000.
- AEROSAT. **Mapa temático – Fazenda São Pedro I**. General Carneiro, 2000b. 1 mapa: color; 80 x 80 cm. Escala 1:1.000.
- AEROSAT. **Mapa temático – Fazenda São Pedro II e III**. General Carneiro, 2000c. 1 mapa: color; 80 x 80 cm. Escala 1:1.000.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Brasília: EMBRAPA-CNPQ; EMBRAPA-SPI, 1994. 640 p.
- CHUVIECO, E. **Fundamentos de teledetección espacial**. Madrid: Ediciones Rialp, 1990. 453 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGRPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: 1999. 412 p.
- HUETE, A. R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.
- IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro, 1992. 92 p.
- LEVANTAMENTO de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná. Londrina: 1984. (Boletim de Pesquisa, 27)
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and interpretation**. 3.ed. New York: John Wiley, 1994. 750 p.
- PARANÁ. Secretária de Estado de Agricultura e Abastecimento, Instituto de Terras, Cartografia e Florestas. **Atlas do Estado do Paraná**. Curitiba: 1987. 73 p.
- PEARSON, P. L.; MILLER, L. D. Remote sensing of standing crop biomass for estimating the productivity of the shortgrass prairie. In: International Symposium on remote sensing of environment, 8. 1972, Ann Arbor. **Proceedings...** ERIM, 1972. p. 1357-1381.
- PETERSON, B.; GERLACH, F.; HUTCHINS, K. **IKONOS relative spectral response and radiometric calibration coefficients**. SPACE IMAGING, 2000. 5 p. (Document Number: SE-REF-016)
- RODRIGUES, R. **Re: radiância**. [mensagem de trabalho]. Mensagem recebida por: <lucianofarinha@uol.com.br> em: 01 jul 2001.
- ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation system in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. **Proceeding...** Washington: 1973. v. 1. Sec.A. p. 309-317.
- WATZLAWICK, L. F. et al. O papel do sensoriamento remoto nos estudos de carbono. In: SANQUETTA, C. R. et al. (Eds.) **As florestas e o carbono**. Curitiba: 2002. p. 215-235.
- WATZLAWICK, L. F. **Estimativa de biomassa e carbono em floresta ombrófila mista e plantações florestais a partir de dados de imagens do satélite IKONOS II**. 2003. 120 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.