

Estimativa de biomassa e carbono em plantios de *Pinus taeda* L. utilizando imagens do satélite IKONOS II

Luciano Farinha Watzlawick¹, Henrique Soares Koehler²,
Flávio Felipe Kirchner³

¹Dptº de Agronomia da Universidade Estadual do Centro-Oeste - UNICENTRO
Rua Pres. Zacarias, 875 - Guarapuava, PR
e-mail: farinha@unicentro.br

²Dptº de Fitotecnia e Fitossanitarismo da Universidade Federal do Paraná - UFPR
e-mail: koehler@ufpr.br

³Dptº de Ciências Florestais da Universidade Federal do Paraná - UFPR
e-mail: kirchner@floresta.ufpr.br

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver metodologia utilizando imagens do satélite IKONOS II para realizar estimativas de biomassa aérea e carbono orgânico em plantações de *Pinus taeda*. O desenvolvimento metodológico foi realizado inicialmente com a obtenção dos dados, seguindo-se da análise estatística da matriz de correlação entre os valores das bandas e índices de vegetação e os dados de biomassa aérea e carbono orgânico, o ajuste e seleção de equações para estimar a biomassa e o carbono orgânico como variáveis dependentes em função de variáveis independentes provenientes das imagens de satélite, tais como a reflectância das bandas MS-1, MS-2, MS-3, MS-4, Razão de Bandas (MS-4/MS-3), NDVI e SAVI, e a quantificação das variáveis dependentes para toda a área de estudo. A utilização de imagens provenientes do satélite IKONOS II apresentou resultados satisfatórios, possibilitando com que quantificações da biomassa aérea e carbono possam ser realizadas, necessitando para tanto que modelos matemáticos sejam ajustados.

Palavras-chave: Biomassa, carbono orgânico, sensoriamento remoto, IKONOS II, *Pinus taeda*.

Abstract

The main objective of the present paper was to develop a methodology using IKONOS II satellite images to estimate above ground biomass and organic carbon content in *Pinus taeda* plantations. The methodology used, after field data collection, was to analyse the

correlation matrix between satellite band values of reflectancy and vegetation indexes with above ground biomass and organic carbon content, adjust and selection of regression equations to estimate above ground biomass and organic carbon content as function of satellite variables, such as reflectancy bands of MS-1, MS-2, MS-3, MS-4, MS-4 MS-3 ratio, NDVI and SAVI , and quantification of the dependent variables for the whole study area. The use of IKONOS II satellite images showed satisfactory results, allowing to estimate above ground biomass and organic carbon content, needing for such fitting the appropriate mathematical models.

Key words: Biomass, organic carbon, remote sensing, IKONOS II, *Pinus taeda* plantations.

Introdução

O aumento da produção de energia e da produção de alimentos, decorrentes das atividades humanas, ocasionam um acúmulo da ordem de 3 bilhões de toneladas de carbono por ano, na forma de CO₂ na atmosfera terrestre. Esse acúmulo de CO₂ na atmosfera é decorrente principalmente devido a duas atividades humanas: a queima de combustíveis fósseis (gás natural, carvão, petróleo) e a destruição e queima das florestas. Desta forma, o controle do aumento do dióxido de carbono torna-se, imprescindível, em função das possíveis conseqüências que possam ocorrer no ambiente.

Estudos realizados em 1988 pela Sociedade Americana para o Progresso da Ciência fazem previsão sobre as mudanças climáticas, relacionadas ao aumento dos gases como o CO₂, CH₄, NO₂ e os clorofluorcarbonos (CFCs), chamados de gases do efeito estufa, os quais poderão provocar um aquecimento global, com as temperaturas aumentando dentro de 30 a 90 anos de 2 a 5°C, provocando profundas mudanças, não somente climáticas mas também ecológicas, econômicas e sociais.

Na biomassa da floresta, os compostos de carbono constituem grande parte da mesma, sendo necessário desenvolver estudos quanto a métodos de quantificação, nos diversos componentes da planta, possibilitando assim 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 nos últimos anos, e também com os

desenvolvimentos relacionados aos avanços no processamento das imagens, têm-se obtido uma melhor caracterização da estrutura das florestas e, conseqüentemente de sua biomassa e carbono estocado (WATZLAWICK e KIRCHNER, 2004).

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 no que se refere ao tratamento digital das imagens de satélite, permitindo associar a caracterização das diferentes estruturas florestais ao conteúdo de biomassa e carbono a essas imagens. Isto consiste num 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 de satélite.

Pelo exposto, constata-se a necessidade de realizar estudos que viabilizem a quantificação de biomassa e carbono utilizando métodos indiretos, possibilitando assim estimativas em menor tempo, para áreas maiores, bem como com menores custos.

O presente trabalho teve como objetivos:

- a) desenvolvimento de metodologia utilizando imagens do satélite IKONOS II para realizar estimativas de biomassa e carbono orgânico em plantios de *Pinus taeda* L.;
- b) ajustar e testar equações para estimar variáveis de biomassa e carbono orgânico em função de variáveis provenientes das imagens do satélite IKONOS II; e
- c) quantificar a biomassa e o carbono orgânico na área de estudo.

Material e métodos

Caracterização da área de estudo

A área de estudo localiza-se entre as coordenadas geográficas de 26° 20' 35" e 26° 26' 13" S, e 51° 19' 49" e 51° 25' 29" WGr, no município de General Carneiro - PR. A propriedade pertence às Indústrias Pedro N. Pizzatto Ltda. Possui uma área total de 4.210,75 ha, sendo que destes 566,18 ha são plantios de *Pinus taeda* L.

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

1987). 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 plano, ondulada e montanhosa, sendo a última de maior predominância (EMBRAPA, 1999).

Na Tabela 1 são apresentadas as informações dendrométricas dos povoamentos de *Pinus taeda* L., que foram utilizados para a realização do presente estudo. Nos povoamentos não foram realizadas desramas, porém foram realizados desbastes. Os povoamentos com 32, 23 e 22 anos foram realizados quatro desbastes, sendo que o último foi realizado em 2000, 2002 e 2001 respectivamente. Já os povoamentos com 21, 19 e 16 anos tiveram três desbastes, sendo que o último foi realizado em 2000, 2000 e 1998 respectivamente. O povoamento com 14 anos teve somente um desbaste realizado em 1998.

Tabela 1. Informações dendrométricas dos plantios de *Pinus taeda* L.

| Idade (anos) | N° Árv./ha | Área Basal (m ² /ha) | Volume do Fuste (m ³ /ha) | Biomassa Arbórea (Mg ha ⁻¹) | Carbono Orgânico Arbóreo (Mg ha ⁻¹) |
|--------------|------------|---------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 14 | 898 | 40,28 | 402,48 | 148,21 | 61,94 |
| 16 | 812 | 27,81 | 294,96 | 108,94 | 45,84 |
| 19 | 100 | 17,61 | 214,96 | 90,58 | 38,01 |
| 21 | 440 | 49,90 | 651,10 | 273,34 | 114,49 |
| 22 | 398 | 47,92 | 565,09 | 232,38 | 97,09 |
| 23 | 200 | 47,40 | 589,30 | 257,41 | 107,42 |
| 32 | 100 | 27,60 | 340,47 | 153,57 | 64,21 |
| \bar{X} | 421 | 36,93 | 436,91 | 180,63 | 75,57 |
| S | 325 | 12,61 | 166,05 | 73,26 | 30,56 |
| | 421 | 36,93 | 436,91 | 180,63 | 75,57 |
| IC* | ± 455 | ± 17,67 | ± 232,66 | ± 102,65 | ± 42,82 |

Fonte: WATZLAWICK, Curitiba-PR, 2003.

* Intervalo de confiança ao nível de 99% de probabilidade

Metodologia

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

do destrutivo foi realizada por WATZLAWICK (2003), com a instalação de 1 (uma) unidade de amostra com as dimensões de 8 x 8 m, em cada povoamento com diferentes idades. Nestas unidades amostrais todas as árvores foram abatidas, medidos os parâmetros dendrométricos, pesada e amostrada a sua biomassa. O material amostrado foi analisado no Laboratório de Ecologia Florestal - UFSM. No laboratório, estes foram secos em estufa de renovação e circulação de ar a uma 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 e que foram utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, encontram-se na Tabela 1.

Processamento da imagem de satélite

As imagens geradas pelo satélite IKONOS II são consideradas imagens de alta resolução. O satélite, coleta imagens pancromáticas (preto e branco) com resolução espacial de 1 metro e imagens multiespectrais (coloridas) com resolução de 4 metros. No presente estudo foi utilizada imagem adquirida em 10 de dezembro de 2000 (13:22 horas) nas bandas MS-1 (Blue), MS-2 (Green), MS-3 (Red) e MS-4 (VNIR). A resolução espectral do IKONOS II pode ser visualizada na Tabela 2, conforme informações descritas no documento no SE-REF-016 (IKONOS Relative Spectral Response and Radiometric Calibration Coefficients) (PETERSON et al. 2000).

Tabela 2. Características espectrais das bandas do satélite IKONOS II

| Banda Espectral | Mínimo 50% (nm) | Máximo 50% (nm) | Amplitude (nm) | Média (nm) |
|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|------------|
| Pan | 525,8 | 928,5 | 402,7 | 727,1 |
| MS-1 (Blue) | 444,7 | 516,0 | 71,3 | 480,3 |
| MS-2 (Green) | 506,4 | 595,0 | 88,6 | 550,7 |
| MS-3 (Red) | 631,9 | 697,7 | 65,8 | 664,8 |
| MS-4 (VNIR) | 757,3 | 852,7 | 95,4 | 805,0 |

Fonte: PETERSON et al. 2000.

Foram coletados no campo 15 (quinze) pontos de apoio com GPS Leica - topográfico SR-510, com precisão de aproximadamente 50 cm para realizar a correção geométrica da imagem. A correção foi realizada utilizando-se 11 pontos de apoio e o método do vizinho mais próximo, com polinômio de transformação de 1o grau, nas bandas MS-1, MS-2, MS-3 e MS-4. Utilizou-se esse método em função deste melhor preservar o valor original do DN (número digital), devido não envolver médias no processo. Os quatro pontos de apoio restantes foram utilizados para efeito de verificação da correção da imagem.

Para a correção atmosférica nas imagens utilizou-se de metodologia idealizada por CHAVEZ (1988;1989) referenciado 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 DN's da imagem sempre apresentam um valor mínimo superior a zero, atribuiu-se este valor ao efeito da dispersão da atmosfera. Foi estabelecido como banda de referência a azul (MS-1) devido à mesma ser a mais afetada pela dispersão, possuindo valor mínimo (geralmente a banda no azul). Calculou-se um fator de correção atmosférica para as demais bandas, utilizando-se a seguinte fórmula:

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

onde 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 documento nº SE-REF-016 (IKONOS Relative Spectral Response and Radiometric Calibration Coefficients) conforme Tabela 3, e utilizando-se a seguinte equação:

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

onde:

i,j,k = pixel i,j na banda k da imagem;

$L_{i,j,k}$ = valor da radiância $mW/cm^2 \times sr^{-1}$;

$CalCoef_k$ = coeficiente de calibração da radiância na banda em $mW/cm^2 \times sr^{-1}$;

$DN_{i,j,k}$ = valor do número digital (DN).

Na conversão dos valores de radiância para valores de reflectância, considera-se parâmetros relacionados ao momento da aqui-

sição da imagem. A equação utilizada para realizar as conversões encontra-se abaixo:

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

onde:

R = reflectância, adimensional;

PI = 3,14159265;

L = radiância, em mW/cm² x sr⁻¹;

r = distância normalizada terra-sol, em unidades astronômicas;

θ = ângulo zenital solar no centro da imagem, em graus,

E = constante solar, em mW/cm².

Tabela 3. Coeficientes de calibração radiométrica do satélite IKONOS II

| BandaEspectral | Coeficiente deCalibração |
|----------------|--------------------------|
| MS-1 (Blue) | 637 |
| MS-2 (Green) | 573 |
| MS-3 (Red) | 663 |
| MS-4 (VNIR) | 503 |

Fonte: PETERSON et al. 2000.

Os índices de vegetação são amplamente utilizados como indicadores da presença e condição da vegetação, geralmente baseados em combinações lineares, razões ou transformações de valores espectrais. A principal função é a de realçar a contribuição espectral da vegetação, enquanto minimiza a contribuição espectral do solo, ângulo solar, vegetação senescente, topografia e da atmosfera.

Um dos primeiros índices de vegetação foi idealizado por PEARSON e MILLER (1972) a partir de medidas radiométricas realizadas em algumas espécies no laboratório e no campo, gerando o índice da "Razão Simples", definido como:

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

onde:

NIR = reflectância na banda referente ao infravermelho próximo, adimensional;

R = reflectância na banda referente ao vermelho, adimensional.

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:

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

onde:

NIR = reflectância na banda referente ao infravermelho próximo, adimensional;

R = reflectância na banda referente ao vermelho, adimensional.

O NDVI assume valores entre 0,1 e 0,6, os valores altos estão associados com altas densidades de vegetação saudável. Poeira, aerossóis, gases atmosféricos na atmosfera, bem como nuvens dentro do pixel agem no sentido de aumentar a reflectância na banda do visível em relação a banda do infravermelho, reduzindo assim o valor do NDVI calculado. DEERING (1978) referenciado por JACKSON e HUETE (1991) relata que a vegetação esparsa podia ser realçada utilizando este índice, portanto o NDVI é sensível para vegetações esparsas.

HUETE (1988) visando amenizar o efeito de solo, criou o Índice de Vegetação Ajustado para o Solo, SAVI "Soil Adjusted Vegetation Index", conforme apresentado abaixo:

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

onde:

NIR = reflectância na banda referente ao infravermelho próximo, adimensional;

R = reflectância na banda referente ao vermelho, adimensional;

L = fator de correção para o solo, adimensional.

O valor da constante L foi introduzida 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, de acordo com autor o valor $L = 0,25$ é utilizado para vegetações densas e $L = 1$ para vegetações abertas, sendo o $L = 0,50$ um valor considerado ideal para um grande intervalo de condições de vegetação, para uma grande variedade de solos.

No presente estudo utilizou-se para todas as tipologias florestais estudadas o valor da constante $L = 0,50$, em função do autor acima

referenciado considerar a mesma ideal, bem como pelo conhecimento da área em questão, julgando-se ser o melhor valor.

Digitalização dos temas

Com a finalidade de separar as diferentes tipologias, ou seja: plantios florestais de *Pinus taeda* e vegetação natural (Floresta Ombrófila Mista Montana), para que fosse possível a aplicação das equações selecionadas na tipologia em estudo, e possibilitar a espacialização de biomassa e carbono, realizou-se uma interpretação visual na composição colorida (R, G, B) utilizando as bandas MS-1, MS-2 e MS-3 do satélite IKONOS II. A interpretação foi realizada diretamente na tela do monitor, sendo digitalizado cada polígono pertencente aos povoamentos de *Pinus taeda*, também foi digitalizado o polígono da área total pertencente a fazenda. Foram utilizados como critérios de interpretação: textura, cor, forma, bem como informações de campo e mapas realizados pela empresa AEROSAT (2000).

Obtenção dos valores de reflectância nas imagens

Em cada uma das sete (07) unidades amostrais realizadas (Tabela 1), foi obtida coordenada do centro da mesma com o auxílio do GPS topográfico SR-510. 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 *Pinus taeda*, 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.

Tratamento estatístico dos dados

O tratamento estatístico dos dados foi realizado inicialmente com a análise da correlação entre as variáveis consideradas, sendo as variáveis biométricas a biomassa arbórea e carbono orgânico arbóreo, as variáveis digitais as reflectâncias nas bandas MS-1, MS-2, MS-3 e MS-4, e os valores dos 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 análise de regressão. Os dados de biomassa arbórea e

o carbono orgânico arbóreo foram considerados variáveis dependentes e os valores provenientes das imagens de sensoriamento remoto, considerados variáveis independentes. Para a análise envolvendo todos dados provenientes das imagens que melhor estimem os valores das variáveis dependentes, utilizou-se o procedimento de análise de regressão múltipla, empregando-se para tanto um ajuste do modelo de regressão pelo procedimento 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 distribuição de resíduos.

Quantificação dos resultados

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

Resultados

Os resultados para correção geométrica foram obtidos utilizando o método do vizinho mais próximo, com polinômio de transformação de 1º grau (Transformação Afim no Plano), com 11 pontos de controle um RMS (erro médio quadrático) de 0,99 m. Ao utilizar os 4 pontos para verificar a correção da imagem, todos os pontos apresentaram erros inferiores a 1 pixel (4 metros). Os resultados obtidos tanto na correção geométrica como na verificação da mesma podem ser considerados como satisfatórios para a realização do trabalho.

Na análise estatística inicialmente foram avaliados os resultados provenientes da matriz de correlação que 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, tais 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 verificar na Tabela 4, na análise da matriz de correlação, as variáveis dependentes que 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 devido as duas variáveis apresentarem uma alta relação, isto ocorre devido ao uso de um fator para o cálculo de carbono.

Tabela 4. Matriz de correlação entre variáveis dendrométricas e variáveis digitais em plantios de *Pinus taeda* L.

| | BIO | CARB | MS-1 | MS-2 | MS-3 | MS-4 | RAZÃO | NDVI |
|-------|--------|--------|--------|--------|------|------|-------|------|
| MS-1 | - 0,39 | - 0,40 | | | | | | |
| MS-2 | - 0,36 | - 0,36 | 0,13 | | | | | |
| MS-3 | - 0,56 | - 0,55 | 0,20 | - 0,10 | | | | |
| MS-4 | - 0,72 | - 0,72 | 0,35 | 0,02 | 0,11 | | | |
| RAZÃO | - 0,75 | - 0,74 | - 0,01 | - 0,09 | 0,23 | 0,75 | | |
| NDVI | - 0,80 | - 0,79 | - 0,08 | - 0,13 | 0,46 | 0,64 | 0,95 | |
| SAVI | - 0,70 | - 0,70 | 0,60 | - 0,04 | 0,59 | 0,54 | 0,46 | 0,64 |

Os índices de vegetação testados (RAZÃO, NDVI e SAVI) apresentaram alta correlação a qual é justificada em função de sua composição utilizar-se às 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 com relação à variável NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), possuindo valores de correlação de - 0,80 com relação à variável biomassa arbórea, já a variável correspondente ao carbono orgânico arbóreo apresenta uma de correlação, de - 0,79.

Nas Tabelas 5 e 6, pode-se verificar as equações ajustadas para estimativas de biomassa arbórea e o carbono orgânico arbóreo respectivamente. Comparando-se os resultados referentes aos ajustes, percebe-se que os modelos que utilizam o método de seleção de variáveis *stepwise* (equações nº1)

apresentaram melhores ajustes para os dados, tanto de biomassa como de carbono, pois ambos apresentavam os maiores coeficientes de determinação, sendo para biomassa arbórea 0,84 e para o carbono orgânico arbóreo 0,83.

Ao utilizar o erro padrão da estimativa como critério para a seleção, sendo escolhida aquela equação que apresentar o menor valor, pode-se dizer que novamente o método *stepwise* apresentou os melhores resultados, tanto para biomassa arbórea (20,39%) como para o carbono orgânico arbóreo (20,92%). Verifica-se também que os valores de F calculados para o método *stepwise* apresentam significância ao nível de 5% de probabilidade.

Os ajustes utilizando-se todas as variáveis independentes (7) não foram possíveis de serem realizados em função do número de variáveis independentes ser igual ao número de observações (7). Também não foram possíveis os ajustes de modelos utilizando-se as variáveis MS-1 e MS-2.

Tabela 5. Modelos de regressão testados e ajustados para estimar a variável biomassa arbórea ($BIO = \beta_0 + \beta_1(MS-1) + \beta_2(MS-2) + \beta_3(MS-3) + \beta_4(MS-4) + \beta_5(RAZÃO) + \beta_6(NDVI) + \beta_7(SAVI)$)

| Nº | Modelo de Regressão | F | R ² _{Ai} | Syx | Syx (%) |
|----|----------------------------------------------------------------------|--------|------------------------------|--------|---------|
| 1 | 6019,0623 - 5098,2223.(NDVI) - 68717,7106.(MS-2) - 10038,4001.(MS-1) | 11,33* | 0,84 | 62,88 | 20,39 |
| 2 | 1682,8240 - 42936,7978.(MS-3) | 2,23 | 0,17 | 142,20 | 46,12 |
| 3 | 1242,5307 - 4073,1066.(MS-4) | 5,33 | 0,41 | 119,02 | 38,61 |
| 4 | 1318,6082 - 135,0027.(RAZÃO) | 6,35 | 0,47 | 113,46 | 36,80 |
| 5 | 3145,9248 - 3929,1306.(NDVI) | 8,64* | 0,56 | 104,51 | 33,90 |
| 6 | 1479,3092 - 3233,3642.(SAVI) | 4,81 | 0,39 | 122,09 | 39,60 |

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 6. Modelos de regressão testados e ajustados para estimar a variável carbono orgânico arbóreo ($CARB = \beta_0 + \beta_1(MS-1) + \beta_2(MS-2) + \beta_3(MS-3) + \beta_4(MS-4) + \beta_5(RAZÃO) + \beta_6(NDVI) + \beta_7(SAVI)$)

| Nº | Modelo de Regressão | F | R ² _{Ai} | Syx | Syx (%) |
|----|----------------------------------------------------------------------|--------|------------------------------|-------|---------|
| 1 | 2515,0973 - 1894,4799.(NDVI) - 28855,8915.(MS-2) - 14271,6196.(MS-1) | 10,79* | 0,83 | 26,84 | 20,92 |
| 2 | 698,8845 - 17823,8816.(MS-3) | 2,19 | 0,16 | 59,52 | 46,39 |
| 3 | 519,9049 - 1707,3679.(MS-4) | 5,41 | 0,42 | 49,49 | 38,57 |
| 4 | 547,0322 - 55,9541.(RAZÃO) | 6,15 | 0,46 | 47,82 | 37,27 |
| 5 | 1301,6633 - 1624,7121.(NDVI) | 8,21* | 0,54 | 43,94 | 34,25 |
| 6 | 613,8228 - 1340,6330.(SAVI) | 4,68 | 0,38 | 51,32 | 40,01 |

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

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 dentre estes existir valores discrepantes, necessitando um maior número de informações para gerar um melhor ajuste.

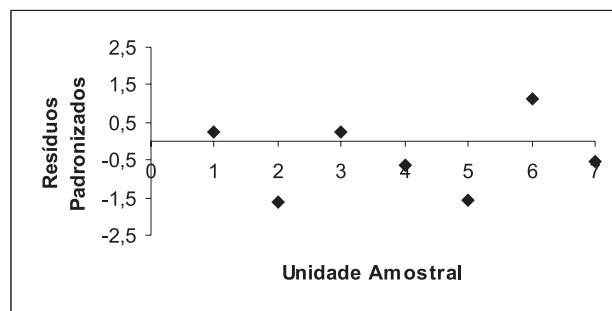


Figura 1. Distribuição dos resíduos do modelo de regressão selecionado para estimar a biomassa arbórea

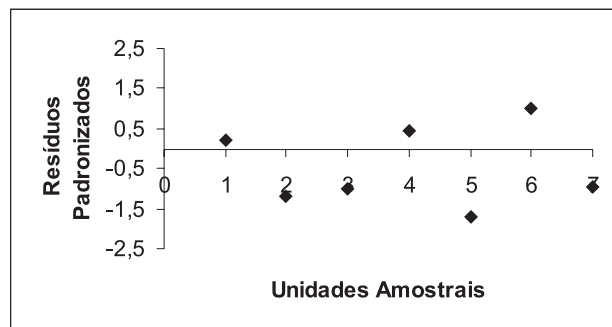


Figura 2. Distribuição dos resíduos do modelo de regressão selecionado para estimar o carbono arbóreo

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. Para obtenção dos

valores reais foi realizada a classificação dos povoamentos da área de estudo, nas mesmas classes de produção (Mg ha^{-1}), levando-se em consideração informações fornecida pela empresa, tais 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.

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 na Tabela 7.

Tabela 7. Biomassa e carbono orgânico arbórea real e estimada em hectare (ha)

| Classe (Mg ha^{-1}) | Biomassa | | Classe (Mg ha^{-1}) | Carbono | |
|-----------------------------------|-----------|---------------|-----------------------------------|-----------|---------------|
| | Real (ha) | Estimada (ha) | | Real (ha) | Estimada (ha) |
| 50 - 220 | 218,02 | 220,39 | 50 - 220 | 218,02 | 214,11 |
| 220 - 390 | 348,16 | 318,89 | 220 - 390 | 348,16 | 352,83 |
| > 390 | 0,00 | 11,06 | > 390 | 0,00 | 6,59 |
| TOTAL | 566,18 | 550,34 | TOTAL | 566,18 | 573,53 |

Pode-se observar na Tabela 7 que as diferenças totais quanto a área real e estimada com a utilização dos modelos, tanto na biomassa como no carbono orgânico, foram pequenas, sendo que para biomassa ocorreu uma sub-estimativa de 2,79%, e para o carbono orgânico uma superestimativa de 1,29%. Os erros tanto de sub-estimativa como de superestimativa podem decorrer em função dos mapas utilizados terem sido confeccionados em 2000, utilizando-se fotografias aéreas do ano 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 que ocorreram dentro dos intervalos de classe, ressalta-se que a segunda classe (220 - 390 Mg ha^{-1}) apresentou uma sub-estimativa de 8,41%, resultantes dos espaços entreabertos entre as copas das árvores, decorrentes dos desbastes realizados, permitindo que o solo e a vegetação arbustiva interajam conjuntamente com as árvores de *Pinus taeda*.

Nos plantios, em função de existirem árvores remanescentes de espécies diferentes daquela plantada, tais como: *Ocotea porosa*, *Araucaria angustifolia* e *Nectandra* sp. optou-se por ter uma classe fora dos limites

que foram encontrados, com finalidade de verificar se os modelos utilizados poderiam detectar esta variação, estas áreas com estas espécies não estariam sendo contabilizadas, podendo-se excluir as mesmas, 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 com a realização do procedimento obteve-se bons resultados.

Conclusões

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

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

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 ao encontro a contribuir e subsidiar possíveis ações ligadas a quantificação e ao monitoramento de áreas com potencialidades de projetos de seqüestro de carbono, proporcionando a tomada de decisões e negociações com bases científicas.

E importante salientar que os resultados deste estudo são válidos somente para o caso de plantios de *Pinus taeda* L., 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, Fazenda São Pedro I, Fazenda São Pedro II e III*. General Carneiro, 2000. 1 mapa: color; 80 x 100 cm. Escala 1:1.000.
- CHUVIECO, E. *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid: Ediciones Rialp, 1990. 453p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.
- HUETE, A.R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, New York, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.
- JACKSON, R.D.; HUETE, A.R. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, v. 11, p.185-200, 1991.
- PARANÁ. Secretária de Estado de Agricultura e Abastecimento, Instituto de Terras, Cartografia e Florestas. *Atlas do Estado do Paraná*, Curitiba, 1987. 73p.
- PEARSON, P.L.; MILLER, L.D. Remote sensing of standing crop biomass for estimating of the productivity of the shortgrass prairie. In: International Symposium on remote sensing of environment, 8. 1972. *Proceedings...* Ann Arbor: ERIM, 1972. p. 1357-1381.
- PETERSON, B.; GERLACH, F.; HUTCHINS, K. *IKONOS relative spectral response and radiometric calibration coefficients*. SPACE IMAGING, 2000. 5p. (Document Number: SE-REF-016)
- ROUSE, J.W.; HASS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation system in the great plains with ERTS. IN: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973. *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*. Curitiba: UFPR, 2003. 120f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- WATZLAWICK, L.F.; KIRCHNER, F.F. Estimativa de biomassa e carbono utilizando imagens de satélite de alta resolução. In: SANQUETTA, C.R.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M.A.B. (Eds.) *Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas*. Curitiba, 2004. p.133-152.