

# ESTIMATIVA DE VOLUME DE MADEIRA EM PLANTIOS DE *Eucalyptus* spp. UTILIZANDO DADOS HIPERESPECTRAIS E DADOS TOPOGRÁFICOS<sup>1</sup>

Vanessa Canavesi<sup>2</sup>, Flávio Jorge Ponzoni<sup>2</sup> e Márcio Morisson Valeriano<sup>2</sup>

**RESUMO** – A disponibilidade de dados hiperespectrais trouxe expectativas nos meios acadêmicos e empresariais quanto à potencialidade de sua aplicação no setor florestal. O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial da aplicação de dados hiperespectrais do sensor Hyperion EO-1 na quantificação da variável biofísica volume de madeira em plantios de *Eucalyptus* spp. e o impacto do sombreamento do relevo nessa quantificação. Para isso, estabeleceram-se correlações entre os dados espectrais e o volume de madeira, seguidos da definição de modelos de regressão linear múltipla como descritores das relações estabelecidas. O efeito do relevo sobre a reflectância dos dosséis de *Eucalyptus* spp. foi levado em consideração. Os dados Hyperion EO-1 foram convertidos para valores de FRB de superfície, os quais passaram a constituir os dados fundamentais de todo o trabalho. A área de estudo contemplou os plantios do gênero *Eucalyptus* spp. pertencentes à empresa Votorantim Celulose e Papel (VCP), localizados no Município de Capão Bonito, SP. Foram coletados dados espectrais de amostras localizadas em diferentes condições do relevo. No estabelecimento das relações com volume de madeira, o cálculo de índices de vegetação mediante o emprego de dados hiperespectrais resultou em modelos com maiores valores de R<sup>2</sup> quando compensados os efeitos topográficos de iluminação, comprovando maior potencial de aplicação desses dados.

Palavras-chave: Anisotropia da vegetação, Parâmetros biofísicos e SRTM.

## STAND VOLUMES ESTIMATE *Eucalyptus* spp. PLANTATIONS IN FORESTS USING HYPERSPECTRAL AND TOPOGRAPHIC DATA

**ABSTRACT** – The availability of orbital hyperspectral data has brought new perspectives to both academic and corporate sectors solving demands in forestry science. The main objective of this work was to evaluate the potential of Hyperion EO-1 hyperspectral data to quantify the biophysical timber volume in *Eucalyptus* spp stands and the effect of hill shading in that quantification. For this, the correlations between spectral data and timber volume were performed following the use of Multiple Linear regression models as the descriptors of the relationships established. The relief effect on the *Eucalyptus* spp. canopy reflectance was taken into account. The Hyperion EO-1 data were converted to BRDF surface values, which were considered the basis of the entire work. The study area was located in the municipality of Capão Bonito (the State of São Paulo, Brazil) and included *Eucalyptus* spp. stands managed by the Votorantim Papel e Celulose company (VCP). Spectral samples were collected in different topographic conditions. In the establishment of the relationship with timber volume, the vegetation indices estimated using hyperspectral data resulted in models with higher R<sup>2</sup> when considering the topographic illumination effect, showing higher applicability potential of this data.

Keywords: Vegetation anisotropy, Biophysical parameters and SRTM.

### 1. INTRODUÇÃO

A demanda crescente por produtos florestais fez que as empresas do setor investissem em pesquisas voltadas para o melhoramento genético, definição de tratamentos silviculturais como, adubação, plantio em diferentes

espaçamentos e no desenvolvimento de bancos de dados (georreferenciados ou não) que auxiliam o processo de tomada de decisão no âmbito da produção florestal. Atualmente, o grau de complexidade das informações necessárias para a otimização desse processo de decisão tornou-se tão grande que são

<sup>1</sup> Recebido em 25.11.2008 e aceito para publicação em 02.03.2010.

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Brasil. E-mail: <vanessa.canavesi@cptec.inpe.br> e <flavio@dsr.inpe.br>.



comuns esforços em busca de alternativas. Entre essas alternativas sempre ventiladas pelos técnicos atuantes no setor, destacam-se técnicas de sensoriamento remoto e de geoprocessamento.

A aplicação dessas técnicas no estudo e monitoramento de plantios florestais tem, até o momento, oferecido poucas alternativas para as empresas efetuarem a atualização cadastral de seus plantios e a programação das atividades a serem empregadas corriqueiramente na administração desses mesmos plantios. Os motivos que explicam essa ainda tímida contribuição talvez residam no fato de que existe forte sinergismo entre as variáveis florestais, aliado à inerente ambiguidade dos dados gerados por sensores remotos. Essa comunhão de fatores resulta elevados graus de incerteza, que comprometem o desempenho e credibilidade das informações geradas.

Outro fator importante e que exerce influência nos resultados da aplicação das técnicas de sensoriamento remoto sobre estudos e ou, avaliação da cobertura florestal refere-se ao relevo. Dadas as grandes extensões territoriais ocupadas por plantios florestais comerciais, por exemplo, é esperado que eles ocupem terreno com relevo diferenciado. Essa variação de relevo implica, então, diferenças nas quantidades de radiação eletromagnética recebida pelos plantios para um mesmo posicionamento solar (LIESENBERG et al., 2007; POCEWICZ et al., 2007; STEININGER, 2000). Como consequência, espera-se que um sensor remotamente situado registre diferenças na radiância refletida por plantios florestais, mesmo que estes sejam compostos por indivíduos de mesma espécie e idade, cultivados em um mesmo espaçamento e submetidos a idênticos tratamentos culturais. Esse fato se deve à diminuição da densidade de fluxo radiante (a partir da radiância) na proporção do cosseno do ângulo de incidência da luz solar na superfície do terreno (SELLERS, 1965). Tal mecanismo encontra condições amplamente variáveis em função do relevo

Apesar dessas esperadas limitações, a disponibilidade de dados hiperespectrais aerotransportados e orbitais trouxe expectativas positivas ao setor florestal. Os dados coletados em bandas estreitas e de forma contígua no espectro eletromagnético podem permitir, por exemplo, a identificação de diferenças estruturais e bioquímicas decorrentes da adoção de tratamentos culturais diferenciados, auxiliando, assim, no processo de tomada de decisão no cotidiano de empresas

florestais. Esse processo de decisão é totalmente fundamentado em duas vertentes da administração florestal, o inventário e o manejo florestal, que dependem quase que exclusivamente de trabalhos realizados em campo.

Atualmente, os dados oriundos de inventário florestal são armazenados em bancos de dados geográficos, o que tem sistematizado as informações sobre povoamentos florestais (BOLFE et al., 2003). Tais bancos de dados são alimentados por produtos de sensoriamento remoto, permitindo, prioritariamente, a elaboração de mapas temáticos oriundos de atividades de manejo como desbastes, corte raso, manutenção de aceiros etc.

Diferentemente da classificação, a qual é tipicamente direcionada pelo entendimento estatístico da resposta dos padrões espectrais, a estimativa de variáveis biofísicas é feita geralmente por modelos empíricos e semiempíricos. Parâmetros como fechamento de copa, área basal ou volume de madeira são introduzidos como variáveis dependentes e podem ser preditos ou estimados utilizando dados contidos em uma imagem gerada por um sensor remoto (FRANKLIN, 2001).

Alguns estudos foram feitos com o objetivo de estimar o volume de madeira utilizando dados de sensores remotos multiespectrais, os quais alcançaram diferentes graus de sucesso, na maioria das vezes com erros superiores àqueles alcançados pelo método tradicional. Como exemplo, citam-se os trabalhos de Thenkabail et al. (2003) e Kayitakire et al. (2006), utilizando imagens do sensor IKONOS e Ponzoni e Shimabukuro (1998), Lu et al. (2004) e Mäkelä e Pekkarinen (2004) utilizando dados do sensor TM/Landsat-5. Mais recentemente têm surgido trabalhos fundamentados em dados hiperespectrais e estimativas de variáveis biofísicas, destacando os estudos de Gong et al. (1995), Fernandes et al. (2002) e Hu et al. (2000), os quais trabalharam com estimativas do Índice de Área Foliar (IAF) utilizando o CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*). Já Schlerf et al. (2005) empregaram o sensor aerotransportado HyMap e dados de campo para estimar o Índice de Área Foliar (IAF) e volume de madeira, concluindo que o emprego de dados hiperespectrais na quantificação do volume implicou resultados superiores aos dados multiespectrais.

Os estudos realizados até então não avaliaram a influência da geometria de iluminação na estimativa de variáveis biofísicas, por meio de dados de sensores remotos.

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar o potencial da aplicação de dados hiperespectrais na caracterização espectral de plantações do gênero *Eucalyptus* spp., visando à espacialização do volume de madeira e levando em consideração a influência da geometria de iluminação ocasionada pelo relevo.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área de Estudo

O Município de Capão Bonito (Figura 1) está localizado na Zona Fisiográfica do Paranapiacaba, Vale do Alto do Paranapanema, com acessos pelas SP 127 e SP 258, na Região Sudoeste do Estado de São Paulo, a 24°00'14 S e a 48°20'54" W. Nessa posição há diferenças angulares do Sol nas diferentes estações do ano. Capão Bonito limita-se ao norte, com os município de Itapetininga; a leste com São Miguel Arcanjo, ao sul com Ribeirão Grande e Itapeva e com Taquarivaí a oeste. Os principais rios que passam pelo município são: rio das Almas, rio Paranapanema e ribeirão Paranapitanga. Distanto 226 km da capital, abrange uma área de 1.642 km<sup>2</sup> e sua altitude média é de 705 m (CEPAM, 2005). No município estão presentes plantios de *Eucalyptus* spp. pertencentes à indústria Votorantim Celulose e Papel.

Os materiais utilizados neste trabalho foram os Fatores de Reflectância Bidirecional (FRB) de superfície, obtidos da imagem do sensor Hyperion, índices de

vegetação, dados geomorfométricos locais (TOPODATA – [www.dpi.inpe.br/topodata](http://www.dpi.inpe.br/topodata)) derivados de imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission* – RABUS et al., 2003) e dados cadastrais fornecidos pela empresa Votorantim Celulose e Papel (VCP).

### 2.2 Imagem do Sensor Hyperion

O sensor Hyperion está a bordo do satélite EO-1 (*Earth Observing-1*) e foi o primeiro sensor hiperespectral orbital lançado. A órbita desse satélite é idêntica à do satélite Landsat 7, com uma defasagem temporal de 1 min, Sol-síncrona e uma altitude de 705 km, com um tempo de revisita de 16 dias.

Esse sensor coleta imagens com altas resoluções radiométrica (16 bits) e espectral. A resolução espacial das imagens geradas por esse sensor é de 30 m, e cada cena gerada possui 7,7 km de largura por 42 km de extensão, com uma extensão opcional de 185 km (USGS, 2005). Nesse sensor há dois detectores separados para aquisição de imagens: um na região do VNIR (visível-infravermelho próximo), que abrange a região espectral de 356 a 1.000 nm e outro no SWIR (infravermelho de ondas curtas), abrangendo a região de 900 a 2.578 nm. Suas 242 bandas estão distribuídas no espectro eletromagnético (356 a 2.578 nm) de maneira contígua (BECK, 2003).



**Figura 1** – Localização da área de estudo.  
**Figure 1** – Study area location.

A imagem do sensor Hyperion selecionada para este trabalho é referente ao dia 20 de agosto de 2003 e foi adquirida no USGS (*United States Geological Survey*). Essa imagem passou por uma fase de pré-processamento, a qual contou com as seguintes etapas: correção do *striping*, correção atmosférica, correção de ruídos na imagem e correção geométrica, resultando em uma imagem contendo valores de FRB de superfície. Na etapa de correção de ruídos na imagem foram utilizadas as ferramentas EFFORT (*Empirical Flat Field Optical Reflectance Transformation*) e MNF (*Minimum Noise Fraction*), ambas disponíveis no aplicativo ENVI 4.2 (RSI, 2005).

O pré-processamento da imagem Hyperion é uma etapa fundamental antes da análise dos dados. O sensor Hyperion, por estar em uma plataforma orbital e operar em bandas estreitas, possui relação sinal ruído modesta (~50:1), o que, juntamente com os efeitos atmosféricos, demanda uma etapa de pré-processamento, a qual inclui a correção atmosférica e a minimização dos ruídos na imagem (DATT et al., 2003).

### 2.3 Cálculo dos Índices de Vegetação

Índices de Vegetação são as combinações do FRB de superfície determinados em dois ou mais comprimentos de onda que estão associados a uma propriedade particular da vegetação. Eles têm sido concebidos levando-se em consideração as propriedades espectrais de folhas isoladas ou de dosséis vegetais (JENSEN, 2000).

Os Índices de Vegetação foram calculados a partir de funções específicas do aplicativo ENVI 4.2, por ocasião do processamento de dados hiperespectrais, dentro do intervalo espectral compreendido entre 400 e 2.500 nm.

Foram utilizados os índices de vegetação descritos a seguir. Esses índices foram avaliados quanto à sua potencialidade na espacialização do volume de madeira, e alguns foram adaptados para comprimentos de onda disponíveis para os dados Hyperion.

*1. Normalized Difference Vegetation Index* ou Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (Eq. 1) tem sido um dos mais utilizados índices de vegetação. Ele se baseia na alta absorção da clorofila na região que é verificada na região espectral do vermelho e na alta reflectância explicada pela estrutura interna

das folhas na região do infravermelho próximo. Ele pode saturar em coberturas vegetais densas com valores de IAF elevados. O valor de NDVI varia entre -1 e 1. Geralmente em vegetações saudáveis, o índice apresenta valores em torno de 0,2 e 0,8 (ROUSE et al., 1973).

$$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_{VERM}}{\rho_{IVP} + \rho_{VERM}} \quad (1)$$

*2. Red Edge NDVI* ou Índice de Vegetação da Diferença Normalizada na Borda Vermelha (Eq. 2) é uma modificação do tradicional NDVI e utilizado em dados com alta resolução espectral e difere do NDVI porque utiliza bandas na borda vermelha em vez de regiões genéricas de absorção da clorofila e de reflexão por conta das características estruturais dos tecidos foliares. O índice NDVI<sub>705</sub> é sensível a pequenas mudanças nas quantidades de folhas do dossel, assumindo, então, importância quando se considera a deciduidade. Seu valor varia de -1 a 1 e a amplitude comum em vegetação sadia é de 0,2 a 0,9 (GITELSON e MERZLYAK, 1994).

$$NDVI_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705}} \quad (2)$$

*3. Vogelmann Red Edge Index 1* ou Índice de Vegetação da Diferença Normalizada na Borda Vermelha de Vogelmann 1 (Eq. 3) é sensível aos efeitos combinados da concentração da clorofila na folhagem, área foliar do dossel e conteúdo de água nas folhas. É utilizado em estudos da fenologia da vegetação (inclusive crescimento), agricultura de precisão e modelagem da produtividade da vegetação. O valor desse índice varia entre 0 e 20, mas em vegetação sadia são geralmente encontrados valores entre 4 e 8 (VOGELMANN et al., 1993).

$$VOG_1 = \frac{\rho_{740}}{\rho_{720}} \quad (3)$$

*4. Photochemical Reflectance Index* ou Índice de Reflectância Fotoquímica (Eq. 4) é sensível às mudanças nos pigmentos carotenoides (principalmente a xantofila) na folhagem. Tais pigmentos são indicativos da eficiência do uso da luz fotossintética ou da taxa de dióxido de carbono armazenada pela folhagem por unidade de energia absorvida. Esse índice é usado em estudos de estresse e de produtividade da vegetação. Os valores variam entre -1 e 1, e valores comuns para vegetação sadia ficam entre -0,2 e 0,2 (GAMON et al., 1992).



$$PRI = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{531} + \rho_{570}} \quad (4)$$

5. *Anthocyanin Reflectance Index 1* ou Índice de Reflectância da Antocianina (Eq. 5) está relacionado à antocianina presente na folhagem, e aumentos no seu valor indicam mudanças na folhagem do dossel, seja por crescimento da planta ou por morte. Os valores variam de 0,001 a 0,1 (GITELSON et al., 2001).

$$ARI_1 = \left( \frac{1}{\rho_{530}} \right) - \left( \frac{1}{\rho_{700}} \right) \quad (5)$$

6. *Water Band Index* ou Índice da Banda de Água (Eq. 6) se relaciona à quantidade de água no dossel. É utilizado em análise de estresse do dossel, previsão e modelagem de produtividade, análise da condição do perigo de fogo e estudos fisiológicos de ecossistemas. A variação desse índice é entre 0,8 e 1,2 (PENUELAS et al., 1996).

$$WBI = \frac{\rho_{900}}{\rho_{970}} \quad (6)$$

7. *Moisture Stress Index* ou Índice de Estresse Hídrico (Eq. 7) é sensível ao aumento do conteúdo de água foliar. Quando isso ocorre, há aumento da absorção na banda em torno de 1.599 nm. A absorção em 819 nm não é afetada pela alteração do conteúdo de água, servindo, então, como referência. Nesse índice, altos valores indicam estresse hídrico ou baixo conteúdo de água nas folhas. As aplicações desse índice são as mesmas do *Water Band Index*. Os valores variam de 0 a mais de 3, e os valores mais comumente encontrados em vegetações verdes são de 0,4 a 2 (HUNT JR. e ROCK, 1989).

$$MSI = \frac{\rho_{1599}}{\rho_{819}} \quad (7)$$

8. *Normalized Difference Infrared Index* ou Índice Infravermelho da Diferença Normalizada (Eq. 8) também é sensível a mudanças no conteúdo de água no dossel. Usa a formulação da diferença normalizada em vez de uma relação simples e os valores aumentam com o incremento do conteúdo de água. Entre as aplicações estão o manejo agrícola, monitoramento do dossel florestal e detecção de estresse. Varia de -1 a 1, e os valores mais encontrados na vegetação sadia são em torno de 0,02 e 0,6 (HARDISKY et al., 1983).

$$NDII = \frac{\rho_{819} - \rho_{1649}}{\rho_{819} + \rho_{1649}} \quad (8)$$

## 2.4 Dados Topográficos e Fator de Iluminação

Os dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) originais foram processados no escopo do TOPODATA (VALERIANO, 2005) para a derivação de variáveis geomorfométricas, entre as quais a declividade do terreno (ângulo zenital) e a orientação das vertentes (ângulo azimutal), que foram utilizadas neste trabalho. Essas informações permitiram a identificação de locais que, no momento da passagem do satélite, tivessem condições de iluminação idênticas. Para isso, propõe-se um Fator de Iluminação (FI), conforme demonstrado na equação 9.

$$FI = \sqrt{((\cos(\varphi_{x,y} - \varphi_s) + (\cos(\theta_{x,y} - \theta_s)))^2} \quad (9)$$

em que:

$\varphi_{x,y}$  = orientação das vertentes ou imagem azimute;

$\varphi_s$  = azimute solar (no momento de aquisição da imagem);

$\theta_{x,y}$  = declividade ou imagem zênite; e

$\theta_s$  = zênite solar (no momento de aquisição da imagem).

Essa equação não contempla o ângulo de visada do sensor, pois foi concebida considerando a visada ao nadir. A equação acima foi inserida no aplicativo ENVI 4.2 e, utilizando as imagens ângulos zenital e azimutal, foi calculada a imagem referente ao Fator de Iluminação. Esta imagem foi então “fatiada” em classes de iluminação, as quais foram definidas em função da amplitude definida entre os valores mínimos e máximos desse fator. Para a data da passagem do sensor Hyperion (20/08/2003), o azimute solar era de 46,15° e o zênite, de 49,52°.

## 2.5 Dados Cadastrais

Os dados cadastrais utilizados referiam-se ao ano de 2003 (data da passagem do satélite) e contemplavam os polígonos (ou talhões) vegetados por *Eucalyptus* spp. e atributos relacionados a eles, como espécie, data do plantio, volume de madeira, em um total de 126 talhões. Estes dados foram fornecidos pela empresa VCP e inseridos em banco de dados georreferenciados no aplicativo SPRING 4.2 (CAMARA et al., 1996).

## 2.6 Relação entre os dados hiperespectrais e o volume de madeira

Os dados de volume referentes a cada talhão foram relacionados com os dados provenientes do sensor Hyperion e apresentados a seguir. Para calcular o FRB de superfície por talhão e para cada índice de vegetação encontrada, foi realizada uma média aritmética simples, ocorrendo o mesmo em cada índice de vegetação calculado.

Para que o volume de madeira pudesse ser espacializado em toda a área de estudo foi aplicada a regressão linear múltipla, em que os dados de volume de madeira de cada talhão foram considerados como a variável dependente (Y) e os valores do FRB de superfície e os índices de vegetação nesses talhões como variáveis independentes ( $X_i$ ), como mostra a equação 10. Os valores de  $b_{is}$  correspondem aos coeficientes gerados na seleção das variáveis.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \dots + \beta_n X_n \quad (10)$$

O aplicativo utilizado para gerar os modelos foi o SPSS 10.0. O método escolhido para a seleção das variáveis foi o *stepwise*. Após a geração do modelo a equação foi inserida no aplicativo ENVI 4.2 e por meio da ferramenta *Band Math* se calculou a imagem “Volume de Madeira” para a área de estudo. Foram utilizados dados de 88 e 38 talhões para gerar o modelo e para validar os resultados, respectivamente.

Esse mesmo procedimento foi realizado considerando-se a iluminação no terreno no momento da aquisição da imagem. Para isso, a imagem obtida no item 2.4, contendo as classes de iluminação, foi utilizada como máscara para recortar os talhões, separando-se as partes que possuíam as mesmas condições de iluminação. Os valores de FRB de superfície médio foram calculados para essas novas partes, assim como os índices de vegetação, sendo geradas equações separadas para cada condição de iluminação. Esse procedimento possibilitou avaliar a influência da geometria de iluminação no estabelecimento das correlações entre dados espectrais e volume de madeira.

## 3. RESULTADOS

O cálculo do fator de iluminação gerou imagem com valores variando de 0,65 a 1,39 (amplitude dos fatores de iluminação). Os valores menores que 1 indicam vertentes voltadas para o lado oposto ao Sol, ou seja,

pixels com pouca iluminação ou escuros. Valores maiores que 1 apontam vertentes voltadas para o Sol, ou seja, pixels iluminados, e valores muito próximos a 1 indicam locais planos.

Os valores dos fatores de iluminação foram subdivididos em intervalos arbitrários com o objetivo de estabelecer classes, que foram denominadas segundo a intensidade de iluminação. Foram, então, definidas cinco classes de iluminação: muito iluminado (1,242 a 1,39), iluminado (1,094 a 1,242), plano (0,946 a 1,094), pouco iluminado (0,798 a 0,946) e escuro (0,650 a 0,798). A imagem resultante dessa classificação encontra-se na Figura 2. A classe de iluminação “muito iluminado” foi descartada, pois não havia amostras suficientes (número de pixels) nos talhões analisados.

O volume de madeira foi estimado para toda a área de estudo, utilizando-se a equação 11.

$$\begin{aligned} Vol = & 294,288 + C1326 * (-1,374) + C1253 * \\ & 0,694 + C1710 * 0,68 + C1114 * 0,251 \\ & + C1144 * (-0,758) + C1134 * 0,654 \end{aligned} \quad (11)$$

em que C1326 corresponde ao FRB de superfície na banda posicionada no comprimento de onda de 1.326 nm, e assim por diante. Os índices de vegetação não participaram dessa equação. O  $R^2$  ajustado para essa equação foi de 0,709. De posse da equação 11 foi gerada

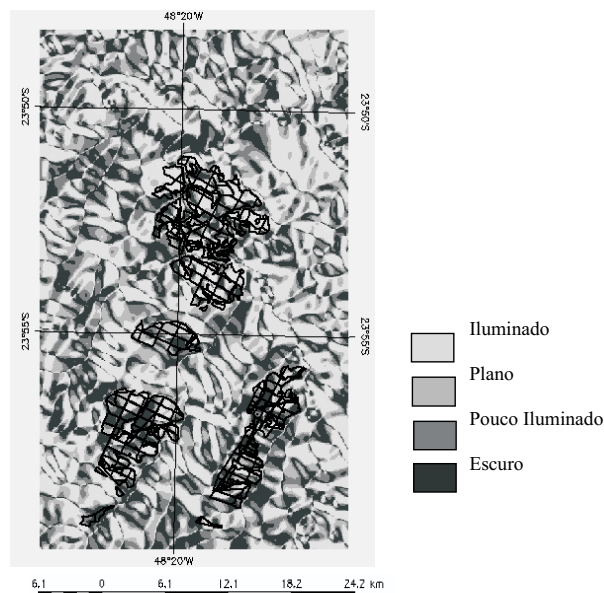


Figura 2 – Classes de iluminação e posicionamento dos talhões.  
Figure 2 – Illumination ranges and stands positioning.

a imagem “volume de madeira”. Utilizando-se os talhões separados para o processo de validação, foi calculado o volume médio de madeira sobrepondo os polígonos desses talhões na imagem gerada (volume calculado). Os resultados foram comparados com o volume de madeira fornecido pela empresa (volume observado), conforme apresentados na Figura 3. O erro mediano foi de + 209 m<sup>3</sup> por hectare. O erro mediano foi utilizado em vez do erro médio, pois se refere ao valor que está situado no meio da fila ordenada dos valores dos erros, não sendo afetado por valores extremos (MURTEIRA e BLACK, 1983).

Já nos cálculos considerando a iluminação do terreno e o método de seleção de variáveis *stepwise* foram geradas as seguintes equações:

- Classe Iluminado

$$Vol = -670,521 + VOG1 * 196,969 + C1336 * (-0,279) + C1710 * 3,44 + C1760 * (-3,253) + ARI1 * 69707,919 + C559 * 0,795$$

- Classe Plano

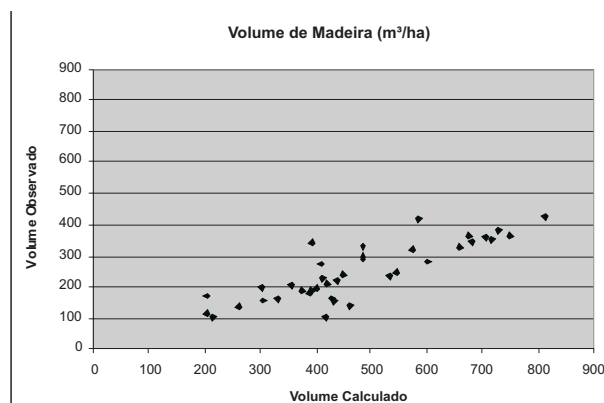
$$Vol = 558,121 + C1114 * 0,157 + C1326 * (-1,056) + C1235 * 1,461 + C1276 * (-0,862) + C1810 * 0,296$$

- Classe Pouco Iluminado

$$Vol = -816,459 + C1306 * (-1,056) + C1215 * 0,532 + MSI * 1488,912 + C824 * 0,369 + NDVI * 929,989$$

- Classe Escuro

$$Vol = -664,1 + C1669 * 2,114 + C963 * 0,916 + C1790 * (-1,604) + PRI * (-876,687) + C1316 * (-1,123) + C953 * (-0,363) + WBI * 676,37$$



**Figura 3** – Volume de madeira calculado versus volume de madeira observado.

**Figure 3** – Estimated versus observed timber volume.

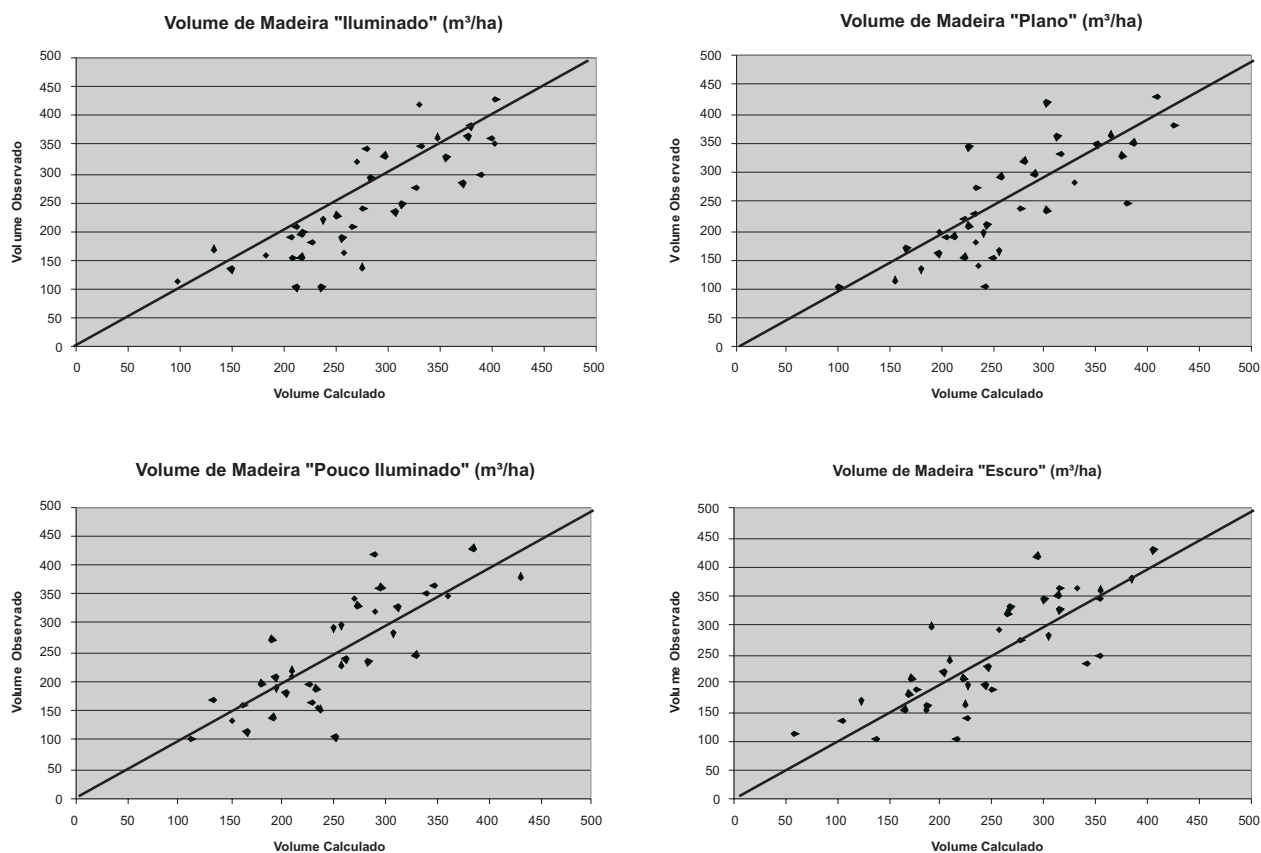
Os valores de R<sup>2</sup> ajustados nos modelos foram de 0,621; 0,662; 0,589; e 0,704 nas classes iluminado, plano, pouco iluminado e escuro, respectivamente, sem geradas mais quatro imagens de “volume de madeira” correspondentes a cada uma das classes de iluminação. Também, foram comparados os resultados obtidos pelo volume calculado *versus* volume observado utilizando os 38 talhões separados para a validação. A Figura 4 mostra esses resultados.

#### 4. DISCUSSÃO

Em todos os modelos gerados, com exceção da classe “plano”, houve a participação dos índices de vegetação. *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) possui sua formulação baseada na diferença da reflectância da vegetação na região do vermelho e do infravermelho próximo e está relacionado ao vigor vegetativo. Este índice, juntamente com o *Moisture Stress Index* (MSI), participaram da equação gerada para a classe de iluminação pouco iluminado, a que apresentou o melhor resultado neste estudo. O NDVI também foi incluído em modelos para predição de volume nos trabalhos de Foody et al. (2003) e Lu et al. (2004).

O índice *Anthocyanin Reflectance Index I* (ARI1), por utilizar um comprimento de onda localizado na região do visível em sua formulação (500 nm) e outro na região do infravermelho próximo (700 nm), possui características semelhantes ao NDVI, compartilhando as mesmas funções. O índice *Vogelmann Red Edge Index I* (VOG1) utiliza em sua formulação os comprimentos de onda 740 e 720 nm, os quais estão localizados na borda vermelha. Essa região do espectro eletromagnético é utilizada em muitos estudos relacionados à produtividade da vegetação (CLEVERS et al., 1994; SCHLERF et al., 2005; GALVÃO et al., 2009). Ambos participaram da equação gerada para a classe “iluminado”.

A equação gerada para a classe de iluminação “escuro” contou com os índices *Water Band Index* (WBI) e *Photochemical Reflectance Index* (PRI). O primeiro índice contempla na sua formulação os comprimentos de onda de 900 e 970 nm, ambos localizados na região do infravermelho próximo e é utilizado na predição e modelagem da produtividade. No segundo índice aparecem na fórmula os comprimentos de onda de 531 e 570 nm, ambos localizados na região do visível, mais especificamente no verde, sendo também utilizado em estudos da produtividade da vegetação.



**Figura 4** – Volume de madeira calculado versus volume de madeira observado para cada classe de iluminação.  
**Figure 4** – Volume of timber calculated versus the volume of timber observed for each illumination class.

Apesar das inclusões de determinados índices no estabelecimento de relações entre parâmetros biofísicos e radiométricos em diferentes situações de iluminação, é difícil assegurar os motivos que justificariam esses resultados, uma vez que está se tratando aqui de relações empíricas. Os resultados aqui apresentados servem principalmente para comprovar a interferência seletiva dos níveis de iluminação, comandados pelos condicionantes topográficos, em diferentes comprimentos de onda e, assim, na participação de relações (índices) entre valores de FRB nas relações entre parâmetros biofísicos e radiométricos.

Os valores para  $R^2$  ajustado para os modelos variaram de 0,589 a 0,704. Thenkabail et al. (2003), utilizando sensores multiespectrais para estimar volume de madeira e dados dos sensores IKONOS e ETM+/Landsat-7 para espacializar o volume de madeira na área de estudo, encontraram valores de  $R^2$  variando de 0,34 a 0,69. Hall et al. (2006) também

realizaram um trabalho com o mesmo contexto, obtendo o  $R^2$  de 0,69 para dados do sensor ETM+/Landsat-7. Em trabalhos utilizando dados de sensores hiperespectrais na estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) foram encontrados valores de  $R^2 = 0,80$  (GONG et al., 1995), de  $R^2$  variando de 0,51 a 0,86 (FERNANDES et al., 2002) e de  $R^2$  variando de 0,16 a 0,67 (HU et al., 2000), todos utilizando o sensor CASI. Empregando dados do HyMap, Schlerf et al. (2005) encontraram  $R^2$  de 0,67 na estimativa do IAF e 0,79 na estimativa do volume.

O erro mediano encontrado na validação dos resultados do o primeiro modelo gerado (sem considerar a iluminação) ficou em torno de + 200 m<sup>3</sup> por hectare. Esse erro foi considerado alto e pode ser explicado pelo modo com que as variáveis foram coletadas, em que o talhão inteiro foi utilizado para o cálculo do FRB de superfície média e dos índices de vegetação, englobando diferentes



condições de iluminação. Uma interpretação prática para isso seria a escala de trabalho em que o modelo foi desenvolvido, pois quando se calcula o FRB de superfície média para grandes áreas, locais com diferentes geometrias de iluminação são considerados iguais, reduzindo, assim, a acurácia dos resultados (FRANKLIN, 2001).

Em estudos semelhantes realizados por Hall et al. (2006) foi encontrado um erro de 70,3 m<sup>3</sup>/ha utilizando dados do sensor ETM+/Landsat-7 para estimativa de volume em uma floresta temperada. Mäkelä e Pekkarinen (2004) encontraram um erro de 71 a 80 m<sup>3</sup>/ha usando dados TM.

## 5. CONCLUSÃO

A geometria de iluminação e a topografia exercem influência no processo de espacialização do volume de madeira utilizando dados orbitais. O erro mediano encontrado na etapa de validação dos resultados foi maior quando a iluminação não foi considerada na coleta das amostras de geração do modelo. Quando a iluminação foi considerada e as amostras coletadas em diferentes condições de iluminação, o erro mediano baixou, e o melhor resultado foi alcançado na classe de iluminação “pouco iluminado”.

Os índices de vegetação calculados a partir de bandas estreitas estavam presentes em três das cinco equações de espacialização do volume de madeira a partir de dados do sensor Hyperion, confirmando a importância desses índices nesse tipo de estudo.

Os resultados alcançados utilizando dados hiperespectrais na espacialização da variável dendrométrica volume de madeira foram superiores aos encontrados na literatura, em que foram utilizados dados de sensores multiespectrais. Este fato confirma a expectativa gerada pelo lançamento desses dados nos meios empresarial e acadêmico e a sua aplicabilidade em estudos de florestas.

## 6. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudo concedida aos autores; e à empresa Votorantim Celulose e Papel, pelos dados vetoriais e cadastrais fornecidos.

## 7. REFERÊNCIAS

- BECK, R. **EO-1 User Guide**. 2003, 74p. Disponível em: <<http://eo1.usgs.gov/documents.php>>. Acesso em: 02 maio de 2006.
- BOLFE, E. L. et al. Verificação da exatidão em classificação digital de povoamentos florestais em imagem orbital mediante três índices. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2003. p.2671-2677.
- CAMARA, G. et al. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling” **Computers & Graphics**, v.3, n.20, p.395-403, 1996.
- CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL – CEPAM. Zanadréa, P. São Paulo: Cidade Universitária, 2005. Disponível em: <<http://www.cepam.sp.gov.br/v10/arquivos/redescobrimdo/Cap%E3o%20Bonito.pdf>>. Acesso em 20 jul 2005.
- CLEVERS, J. G. P. W. et al. A framework for monitoring crop growth by combining directional and spectral remote sensing information. **Remote Sensing of Environment**, v.50, n.2, p.161-170, 1994.
- DATT, B. et al. Preprocessing EO-1 Hyperion hyperspectral data support the application of agricultural indexes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.41, n.6, p.1246-1259, 2003.
- FERNANDES, R. et al. A multiscale approach to mapping effective leaf area index in boreal Picea marina stands using high spatial resolution CASI imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, p.3547-3568, 2002.
- FOODY, G. M.; BOY, D. S.; CUTLER, M. E. J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. **Remote Sensing of Environment**, v.85, p.463-474, 2003.
- FRANKLIN, S. E. **Remote sensing for sustainable forest management**. Boca Raton: Lewis, 2001. 407p.



- GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; BREUNIG, F. M. Relações entre índices de vegetação e produtividade de soja com dados de visada fora do nadir do sensor Hyperion/EO-1. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2009. p.1095-1102.
- GAMON, J. A.; PENUELAS, J.; FIELD, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**, v.41, n.1, p.35-44, 1992.
- GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves: spectral features and relation to chlorophyll estimation. **Journal of Plant Physiology**, v.143, p.286-292, 1994.
- GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N.; CHIVKUNOVA, O. B. Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. **Photochemistry and Photobiology**, v.71, n.1, p.38-45, 2001.
- GONG, P.; PU, R.; MILLER, J. R. Coniferous forest leaf area index estimation along the Oregon transect using compact airborne spectrographic imager data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.61, p.1107-1117, 1995.
- HALL, R. J. et al. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. **Forest Ecology and Management**, v. 225, p.378-390, 2006.
- HARDISKY, M. A.; KLEMAS, V.; SMART, R. M. The influences of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alterniflora* canopies. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.49, n.1, p.77-83, 1983.
- HU, B.; INANNEN, K. & MILLER, J. R. Retrieval of leaf area index and canopy closure from CASI data over the BOREAS flux tower sites. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, p.255-274, 2000.
- HUNT JR., E. R.; ROCK, B. N. Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances. **Remote Sensing of Environment**, v.30, n.1, p.43-54, 1989.
- JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. New York: Prentice-Hall, 2000. 544p.
- KAYITAKIRE, F.; HAMEL, C.; DEFOURNY, P. Retrieving forest structure variables based on image texture analysis and IKONOS-2 imagery. **Remote Sensing of Environment**, v.102, p.390-401, 2006.
- LIESENBERG, V.; GALVÃO, L. S.; PONZONI, F. J. Variations in reflectance with seasonality and viewing geometry: implications for classification of Brazilian savannah physiognomies with MISR/Terra data. **Remote Sensing of Environment**, v.107, p.276-286, 2007.
- LU, D. et al. Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. **Forest Ecology and Management**, v.198, p.149-167, 2004.
- MÄKELÄ, H.; PEKKARIEN, A. Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data. **Forest Ecology and Management**, v.196, p.245-255, 2004.
- MURTEIRA, B.; BLACK, G. **Estatística descritiva**. Lisboa: McGraw-Hill, 1983.
- PENUELAS, J. et al. The reflectance at the 950-970 region as an indicator of plant water status. **International Journal of Remote Sensing**, v.14, p.1887-1905, 1996.
- POCEWICZ, A. et al. View angle effects on relationships between MISR vegetation indices and leaf area index in a recently burned ponderosa pine forest. **Remote Sensing of Environment**, v.107, p.322-333, 2007.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. Relações entre índices de vegetação (NDVI e SAVI) e parâmetros biométricos de plantios de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus camaldulensis* em Cachoeira do Manteiga (MG). **Revista Árvore**, v.22, n.3, p.357-366, 1998.

- RABUS, B. et al. The shuttle radar topography mission- a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v.57, n. 4, p.241-262, 2003.
- ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: ERTS SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. **Proceedings...** Washington: NASA, 1973. p.309-317.
- RESEARCH SYSTEMS INC., RSI. ENVI version 4.2 – The environment for visualizing images. 2005.
- SCHLERF, M.; ATZBERGER, C.; HILL, J. Remote sensing of forest biophysical variables using HyMap imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v.95, n.1, p.177-194, 2005.
- SELLERS, W. D. **Physical climatology**. Chicago: University of Chicago Press, 1965. 272p.
- STEININGER, M. K. Satellite estimation of tropical secondary forest above ground biomass: data from Brazil and Bolivia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, p.1139-1157, 2000.
- THENKABAIL, P. S. et al. Detecting floristic structure and pattern across topographic and moisture gradients in a mixed species Central African forest using IKONOS and Landsat-7 ETM+ images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 4, p.255-270, 2003.
- UNITES STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. EO-1 (Earth Observing-1). Sensors/ dados SRTM. Disponível em: <<http://eo1.usgs.gov>>. Acesso em: 01 ago 2005.
- VALERIANO, M. M. **Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3595-3602. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/10.29.11.41/doc/3595.pdf>> Acesso em: 04 jun. 2006.
- VOGELMANN, J. E.; ROCK, B. N.; MOSS, D. M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v.14, p.1563-1575, 1993.