



## TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA EM AMBIENTES FLORESTAIS

---

Ângela Maria Klein Hentz<sup>1</sup>, Marieli Sabrina Ruza<sup>2</sup>, Ana Paula Dalla Corte<sup>3</sup>, Carlos Roberto Sanquetta<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Eng. Florestal. Mestranda do PPG em Engenharia Florestal - UFPR – Curitiba, PR, Brasil – [angelakhentz@gmail.com](mailto:angelakhentz@gmail.com)

<sup>2</sup> Graduanda em Engenharia Florestal – UFPR, Curitiba, PR, Brasil

<sup>3</sup> Eng. Florestais, Professores do Departamento de Ciências Florestais – UFPR - Curitiba, PR, Brasil

**Recebido em: 12/04/2014 – Aprovado em: 27/05/2014 – Publicado em: 01/07/2014**

---

### RESUMO

Este trabalho teve como objetivos testar a relação entre três índices de vegetação, sendo: NDVI, SAVI e EVI, com dados de biomassa arbórea em fragmento de floresta ombrófila mista (FOM) e posteriormente ajustar equações a partir das quais fosse possível estimar os valores de biomassa a partir do índice de maior correlação. Para a geração dos índices utilizou-se cena do satélite Landsat 8, que possui resolução espacial de 30 metros. Os dados de biomassa arbórea foram obtidos de 4 parcelas permanentes instaladas em São João do Triunfo, pertencentes ao projeto PELD sítio 9. Depois de coletados os valores de biomassa e dos índices, observou-se que a maior correlação foi dada com o índice SAVI, que foi, portanto utilizado para o ajuste de modelos estimativos. Foram testados 5 modelos, observou-se que o melhor ajuste foi dado pela equação que considerava do índice na sua forma logaritimizada, que obteve  $R^2_{aj.}$  de 0,87 e  $S_{yx}$  27,54%. Essa equação, porém, apresentou tendenciosidade quando plotados os resíduos, desta forma indicou-se utilizar outra equação, como a número cinco, que obteve valores de  $R^2_{aj.}$  e  $S_{yx}$  (%) semelhantes e, uma melhor distribuição de resíduos, porém ainda apresentou maiores erros nas extremidades do gráfico. Logo, foi possível verificar que o uso de imagens de satélite permite a estimativa da biomassa arbórea com erros aceitáveis, a partir do uso de equações que relacionam o índice de vegetação com os valores de biomassa obtidos em inventários florestais.

**PALAVRAS-CHAVE:** SAVI; Índice de vegetação, Landsat 8, Floresta Ombrófila Mista.

### REMOTE SENSING TECHNIQUES FOR ESTIMATION OF BIOMASS IN FOREST ENVIRONMENTS

#### ABSTRACT

This study aimed to test the relationship between three vegetation index, they are: NDVI, SAVI and EVI, using data from tree biomass in fragment of Mixed Ombrophyllous Forest (FOM) and subsequently adjust equations with the index with the highest correlation. For the generation of the indices was used Landsat scene 8, which has a spatial resolution of 30 meters. The arboreal biomass data was obtained

from 4 permanent plots established in São João do Triunfo, Minas Gerais State, Brazil, belonging to the project PELD site 9. After collected biomass values and indices, was observed that the highest correlation was given with the index SAVI, which was, therefore used for the adjustment of estimated models. Five models were tested, and it was observed that the best fit was given by the equation that it considered the index on its logarithmic form, who obtained  $R^2_{aj.}$  of 0.87 and  $S_{yx}$  27.54 %. This model however, showed in graphical analysis, distribution problems in the waste. In this case is indicated that are use another equation, such as the number five, who obtained values of  $R^2_{aj.}$  and  $S_{yx}(\%)$  similar, and a better distribution of waste, but still presented larger errors in the extremities of the chart. Therefore, it was verified that the use of satellite images allows the estimation of tree biomass with acceptable errors, using equations that relate vegetation index values with biomass obtained in forestry inventories.

**KEYWORDS:** SAVI; Vegetation index, Landsat 8, Mixed Ombrophylous Forest.

## INTRODUÇÃO

Segundo FIGUEIREDO FILHO et al. (2010) a floresta ombrófila mista é de extrema importância científica e ambiental, pois dos 83% da superfície originalmente cobertos por essa unidade fitoecológica. Existem apenas 5% de remanescentes para estudos (PIRES, 2003).

ESPÍNDULA et al. (2012) afirmaram que a vegetação faz parte de um dos principais elementos do ecossistema. E seus estudos estão sendo cada vez mais relevantes, em virtude de suas modificações fisiológicas e morfológicas.

Dentre os métodos empregados para analisar as condições de uma floresta seja ela natural ou implantada, a quantificação de biomassa vegetal é uma das ferramentas mais utilizadas. SANQUETTA et al. (2002) definiram a biomassa florestal como a massa de matéria biológica vegetal, viva ou morta, existente na floresta ou apenas na fração arbórea, sendo comumente utilizado o termo fitomassa para referir-se a biomassa vegetal.

A mensuração da biomassa é realizada principalmente por meio de métodos convencionais, ou seja, destrutivos. Porém, esse processo de mensuração tem sido repensado, pois é um trabalho oneroso que demanda muito tempo (CASSOL, 2013; QURESHI et al., 2012).

A utilização de dados oriundos de sensores remotos para a estimativa da biomassa se tornou uma opção interessante, pois além da facilidade da aplicação, reduz o custo e tempo despendidos com inventários florestais (LE MAIRE et al., 2011). O uso das tecnologias provenientes do sensoriamento remoto demonstra ser efetivas na análise da cobertura vegetal, permitem acompanhar as contínuas mudanças no crescimento, acúmulo de biomassa e carbono ocorrentes na dinâmica de um ecossistema florestal natural.

De acordo com MATOS e KIRCHNER (2008) o sensoriamento remoto tem um papel fundamental na quantificação das áreas e na estimativa indireta de biomassa, aplicando o resultado de modelos matemáticos em equações desenvolvidas com os valores digitais dos sensores remotos. Da mesma forma, WATZLAWICK et al. (2009) afirmaram que o avanço no processamento das imagens de satélite são responsáveis pela crescente utilização desses métodos para caracterizar a estrutura das florestas e, conseqüentemente sua biomassa e carbono estocado.

O ajuste de valores espectrais permite obter índices de vegetação que podem ser comparados com indicadores ecológicos da estrutura e dinâmicas das florestas. Estes índices provenientes do processamento digital evidenciam informações a respeito da quantidade de biomassa verde e dos parâmetros de crescimento e desenvolvimento da vegetação (VIGANÓ et al., 2011).

Os índices de vegetação, de acordo com JENSEN (2009), são medidas radiométricas adimensionais, que indicam a abundância relativa e a atividade da vegetação verde, incluindo o índice de área foliar (IAF), porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila, biomassa verde e radiação fotossinteticamente absorvida (RFAA). Que minimizam os efeitos da iluminação da cena, declividade da superfície e geometria de aquisição que influenciam os valores de refletância da vegetação.

De acordo com ROSA et al. (2013) esses índices de vegetação podem ser utilizados empiricamente para estimar a quantidade de biomassa. Segundo BARET e GUYOT (1991) a produção primária demonstra uma estreita relação com a radiação solar absorvida pela vegetação. PONZONI et al. (2012) mencionaram que a maioria dos índices baseiam-se no comportamento antagônico da vegetação nas regiões espectrais do vermelho e infravermelho próximo e, que a princípio quanto maior for a densidade da cobertura vegetal, menor será a refletância no visível, devido a maior presença de pigmentos fotossintetizantes.

Dentre estes índices um dos mais utilizados é o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), que segundo JENSEN (2009) é um índice baseado em razão, é não linear e pode ser influenciado por efeitos ruidosos aditivos, tais como radiação de trajetória atmosférica. Também afirmou que o NDVI é importante, porque a razão reduz muitas formas de ruídos que em alguns casos são apresentados nas imagens.

Embora extremamente útil na estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação, o NDVI apresenta problemas de saturação em áreas densamente vegetadas e não-linearidade nas relações com o índice de área foliar (LAI) e com a fração de radiação fotossinteticamente absorvida (fPAR). O NDVI é também seriamente afetado pela geometria de aquisição (Sol-alvo-sensor), a estrutura do dossel vegetal, efeitos atmosféricos e substrato (GOWARD et al., 1991).

Desta forma, alguns outros índices buscam resultados melhorados em relação ao NDVI, como o caso do SAVI (Índice de Vegetação Ajustado para o Solo), que considera a influência das características dos solos no cálculo dos índices de vegetação (HUETE, 1997). Da mesma forma, o EVI (Índice de Vegetação Melhorado) é um índice que otimiza o sinal da vegetação, e melhora a sua detecção em regiões de maior densidade de biomassa (PONZONI et al., 2012).

Segundo WATZLAWICK et al. (2009) busca-se associar às estimativas o conteúdo de biomassa e carbono aos dados de radiação ou reflectância de imagens de satélite para obter melhor estimativas dos valores de biomassa. Diversos autores já aplicam o índices de vegetação para estimativas de biomassa, sendo em geral encontrada forte correlação entre os índices utilizados e biomassa mensurada, podendo-se citar os trabalhos de WATZLAWICK et al., (2009), WATZLAWICK et al. (2006), MACIEL et al. (2009), BOLFE et al. (2012), BOLFE et al. (2009), entre outros. Em função da importância dessas estimativas e a possibilidade de obtenção de informações remotas, este trabalho teve como objetivo integrar as técnicas de sensoriamento remoto para predições de biomassa com a modelagem de um fragmento da Floresta Ombrófila Mista.

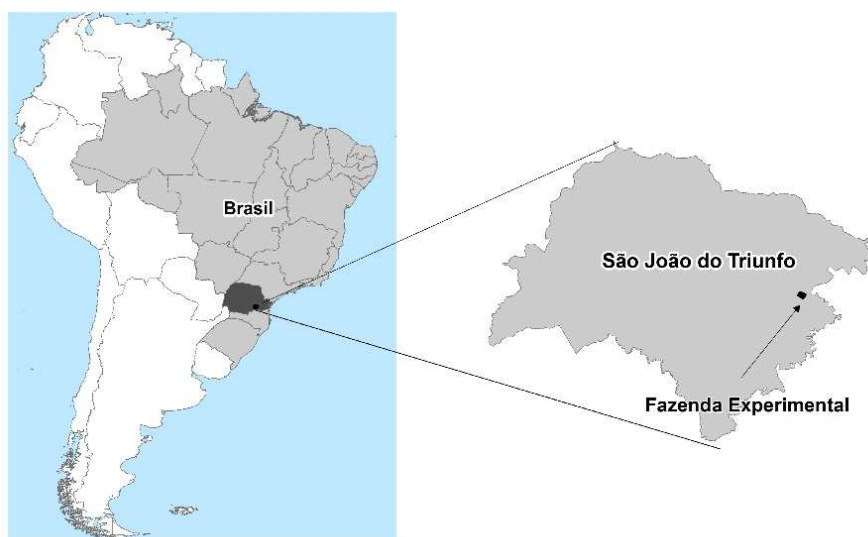
## MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dados de parcelas permanentes pertencentes ao Projeto Ecológico de Longa Duração (PELD) – Sítio 9 (Floresta com araucária e suas transições), instaladas na estação experimental da Universidade Federal do Paraná - São João do Triunfo, Paraná, Brasil, para o desenvolvimento do presente estudo.

### CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A estação experimental situa-se no município de São João do Triunfo, região Centro-Sul do Paraná e aproximadamente 125 km da capital do estado, Curitiba (PIZZATO 1999), conforme apresentado na Figura 1.

De acordo com a classificação climática de Köppen, a região apresenta clima do tipo Cfb, caracterizado por ser mesotérmico úmido e de verões brandos, umidade relativa média de 80,1% e precipitação média de 1615 mm (DURIGAN, 1999). A área em estudo possui aproximadamente 32 ha, está sob as seguintes coordenadas geográficas: 25°34'18" latitude Sul e 50°05'56" longitude Oeste de Greenwich, e altitude de 780m (SANQUETTA et al., 2001).



**Figura 1-** Localização da área de estudo.

Segundo a classificação do IBGE (2012) a tipologia vegetal dominante é Ombrófila Mista Montana, enquadrando-se como uma vegetação secundária avançada ou uma formação primária bastante alterada.

De acordo com DURIGAN (1999) os solos identificados nos talhões da estação experimental foram Latossolo vermelho escuro, Latossolo vermelho amarelo, Cambissolos e Neossolos litólicos.

### ORIGEM DOS DADOS

Os dados foram oriundos de quatro parcelas permanentes instaladas em São João do Triunfo em 1995, e mensuradas anualmente conforme especificado por SANQUETTA (2008).

A área total de estudo compreendeu de 3 parcelas quadradas de 1 hectare (100m x 100m) e uma parcela irregular com 0,5 hectare, totalizando 3,5 hectares.

Essas parcelas foram divididas em 100 subparcelas e 50 subparcelas, respectivamente, de 100m<sup>2</sup> (10m x 10m).

Nas parcelas instaladas, anualmente foi mensurado o DAP (diâmetro à altura do peito), a 1,30m em relação ao nível do solo, com auxílio de fita métrica. Também foram registrados indivíduos mortos e ingressos, identificados quanto à família, gênero e espécie e classificados de acordo com o sistema *Angiosperm Phylogeny Group III* (APG III, 2009).

LIPINSKI et al. (2013) estimaram a altura total e biomassa arbórea aérea para os dados mensurados de 1995 à 2012. Para estimar a altura total foi utilizada uma equação para a espécie *Araucaria angustifolia* (Bertol) Kuntze e, outra para as demais espécies. A estimativa da biomassa foi construída com base na equação desenvolvida por RATUCHNE (2010).

## PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

As imagens utilizadas foram obtidas do satélite Landsat 8, que iniciou sua operação em 2013. Esse satélite é multiespectral e leva a bordo como principal sensor o OLI (*Operational Land Imager*) proporcionando a cobertura da face da Terra.

Foi utilizada uma cena deste satélite, com órbita/ponto 221/078, datada de 30 de agosto de 2013. As bandas multiespectrais tem resolução espacial de 30 metros, seguindo as características da família Landsat.

## ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Com as imagens do satélite foram confeccionados 3 índices de vegetação, os quais normalmente são relacionados em trabalhos de vegetação, e estão descritos a seguir.

### a) Índice de vegetação por diferença normalizada – NDVI

O índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) é uma relação entre medidas espectrais (refletância - r) de duas bandas, a do infravermelho próximo (800-1100 nm) e a do vermelho (600-700 nm), e visa eliminar diferenças sazonais do ângulo do Sol e minimiza os efeitos da atenuação atmosférica, observados para dados multitemporais. O cálculo do NDVI foi realizado com a Equação 1, a seguir:

Equação 1

Em que:

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

R = refletância na banda referente ao vermelho, adimensional.

### b) Soil Adjusted Vegetation Index - SAVI

O SAVI foi um índice desenvolvido com o objetivo de melhorar os valores de NDVI sem necessidades de medições em campo para cada área de análise (JENSEN, 2009). Foi elaborada uma constante L, que representa o fator de ajuste

para o substrato do dossel (VIGANÓ et al., 2011). O SAVI é dado pela equação 2, a seguir:

## Equação 2

Em que:

NIR = refletância na banda referente ao infravermelho próximo, adimensional

R = refletância na banda referente ao vermelho, adimensional

L = Fator de correção para o solo, adimensional (0,5)

A constante L apresentou valores de 0 a 1, variando segundo a própria biomassa. Sendo o adequado, segundo HUETE (1988), L = 1 para baixas densidades de vegetação, L = 0,5 para médias densidades de vegetação, L = 0,25 para altas densidades de vegetação.

Foi utilizado L = 0,5 devido às características da floresta, em sucessão média/avançada. Foram também testadas algumas variações na constante, porém que não se mostraram melhores para realçar a vegetação, desta forma manteve-se o valor 0,5.

### c) Índice de vegetação melhorado – EVI

O índice de vegetação melhorado (EVI) foi desenvolvido para otimizar o sinal da vegetação, melhorando a sensibilidade de sua detecção em regiões com maiores densidades de biomassa, e para reduzir a influência do sinal do solo e da atmosfera sobre a resposta do dossel. Nesse sentido, o EVI é calculado através da Equação 3 (JENSEN, 2009):

## Equação 3

Em que:

G = fator de ganho (2,5);

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

R = refletância na banda referente ao vermelho, adimensional;

B = refletância na banda referente ao azul, adimensional;

L = fator de ajuste para os solos (1,0);

C1 e C2 = coeficientes para correção da banda vermelha em função do espalhamento atmosférico por aerossóis, descrevem a banda azul (6,0 e 7,5, respectivamente).

O EVI é um NDVI modificado, contendo um fator de ajuste para solos (L), e dois coeficientes (C1 e C2), que descreve o uso da banda azul para correção da banda vermelha quanto ao espalhamento atmosférico por aerossóis. Esses coeficientes (C1, C2 e L) são empiricamente determinados, assumem valores de 6,0; 7,5; e 1,0, respectivamente. O G é um fator de ganho ajustado em 2,5. Este algoritmo tem melhorado a sensibilidade para regiões de alta biomassa, permite um melhor desempenho do monitoramento da vegetação por meio da diminuição da influência do sinal proveniente do substrato abaixo do dossel e, através da redução da influência atmosférica (HUETE et al., 1997; HUETE et al., 1999; HUETE et al., 2002).

Enquanto o NDVI é sensível à clorofila, o EVI é mais sensível às variações na resposta estrutural do dossel, incluindo o índice de área foliar (LAI), a fisionomia da planta e a arquitetura do dossel (HUETE et al., 2002).

## ESTIMATIVAS DE BIOMASSA

Depois de calculados os índices de vegetação, foram plotados sobre estes as parcelas de inventário permanente e desta forma definidos quais os pixels (30 x 30 metros compondo 900 m<sup>2</sup>) dos índices encontravam-se inteiramente dentro das parcelas, sendo estes então os limites úteis dos quais foram obtidos os valores considerados no estudo. Foram identificados 17 pixels, dos quais foram observados os valores dos três índices (NDVI, SAVI e EVI).

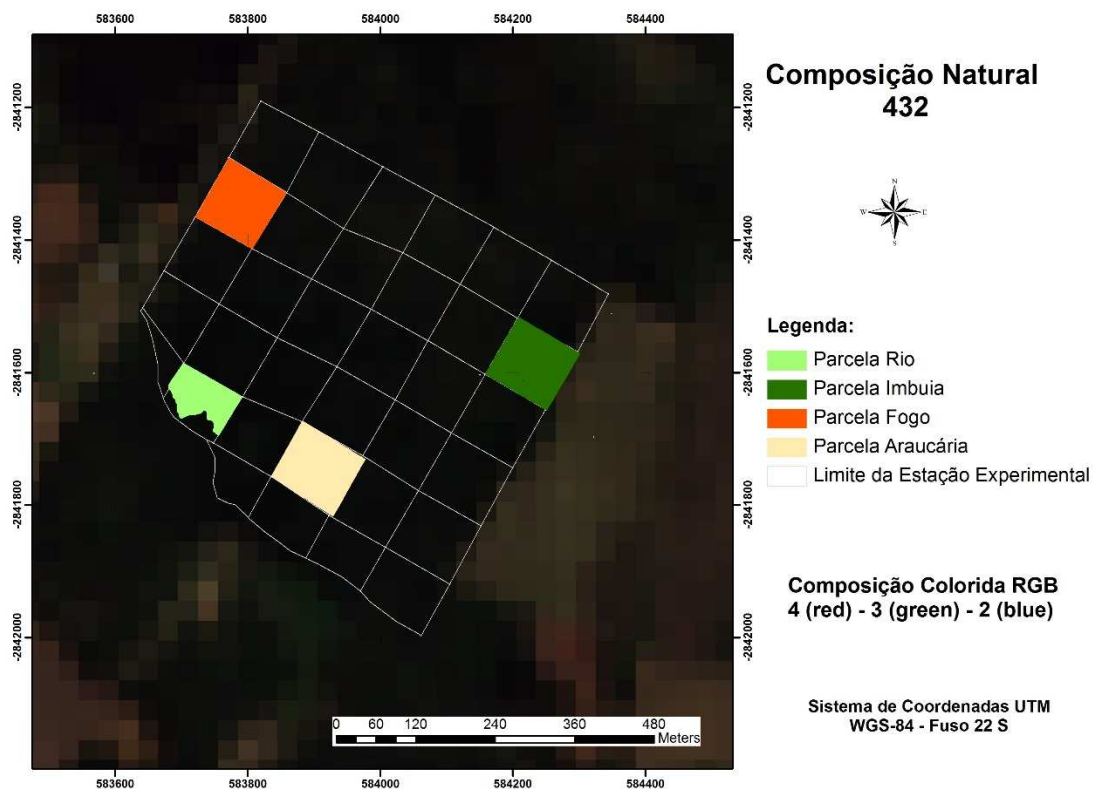
Foram identificadas quais árvores das parcelas encontravam-se dentro de cada limite útil e, foram somados os valores de biomassa (soma de todas as árvore integrantes) de cada limite útil, sendo obtidos assim os valores de biomassa observada.

Desta forma, para cada um dos 17 limites úteis foi possível obter quatro informações: NDVI, SAVI, EVI e biomassa real. Os três índices foram correlacionados com a biomassa real a fim de identificar qual melhor explicaria esta variável.

Por fim foram geradas equações considerando como variáveis independentes os valores dos índices, obtendo-se assim as biomassas estimadas. As equações estão foram avaliadas quanto aos parâmetros Coeficiente de Determinação Ajustado (R<sup>2</sup>aj), Erro Padrão da Estimativa em percentual (S<sub>yx</sub>%), análise gráfica dos resíduos e então se decidiu por uma equação que melhor estimasse os valores de biomassa na área de estudo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das bandas da imagem do satélite Landsat 8 (composição colorida na Figura 2) foi possível elaborar os três índices de vegetação propostos neste estudo (NDVI, EVI e SAVI), conforme representado na Figura 3. Percebe-se que a maior variação nas escalas dos índices no interior da área de estudo, deu-se para o SAVI.



**Figura 2** – Composição colorida da área de estudo.

**Figura 3** – Índices de   vegetação para a área de estudo.  
 a) NDVI - Índice de  vegetação por diferença normalizada; b) EVI - Índice de vegetação melhorado; c) SAVI - Índice de Vegetação Ajustado para o Solo.

Depois de confrontadas as árvores com os limites úteis, observaram-se as características dos indivíduos de cada parcela. O resumo destas características, por parcela, está na Tabela 1. Observa-se que os maiores valores de biomassa encontram-se na parcela Imbuia, assim como, na parcela Araucária os menores valores.

**Tabela 1** - Características da biomassa

| Parcela          | Total de biomassa (kg/parcela) |            |           |           |           | Média  |
|------------------|--------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|--------|
|                  | Amostra 1                      | Amostr a 2 | Amostra 3 | Amostra 4 | Amostra 5 |        |
| <b>Araucária</b> | 12.133                         | 15.025     | 10.691    | 16.252    | 15.312    | 13.883 |
| <b>Imbuia</b>    | 20.046                         | 14.964     | 22.066    | 10.874    | 30.789    | 19.748 |
| <b>Fogo</b>      | 17.595                         | 14.308     | 14.957    | 17.151    | 14.628    | 15.728 |
| <b>Rio</b>       | 13.982                         | 16.166     | -         | -         | -         | 15.074 |

Os valores de biomassa arbórea calculados para cada limite útil (pixel de  $900 \text{ m}^2$ ) variaram de  $10.690,89$  até  $30.788,98 \text{ kg}$ , com média de  $12.959,51 \text{ kg}/900\text{m}^2$ . Dessa forma, a média total de biomassa encontrada dentro dos limites úteis foi de  $144 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ . MACIEL et al. (2009) encontraram  $481,98 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de biomassa em ambiente de diferentes tipos de floresta ombrófila. MATOS e



KIRCHNER (2008) também encontraram valores de biomassa superiores a este trabalho, na média de 343,06 t.ha<sup>-1</sup> para floresta ombrófila densa.

Os valores de cada índice para cada limite útil foi observado e correlacionado com os valores reais de biomassa das árvores encontradas neste mesmo limite. Observou-se que o índice que obteve a melhor correlação foi o SAVI, com o valor de 0,30. Valores próximos foram encontrados por CASSOL (2013), que também dentre os três índices aqui considerados encontrou a maior correção para SAVI.

WATZLAWICK et al. (2009) encontraram também a melhor correlação entre SAVI e biomassa, quando comparados com NDVI e Razão de bandas, em estudo na Floresta Ombrófila Mista (FOM) com uso de imagens do satélite IKONOS. Da mesma forma FERRAZ et al. (2013) encontraram a melhor correlação para SAVI em floresta estacional semidecidual, comparando-se os três índices avaliados neste estudo.

Sendo o SAVI o índice com maior correlação, ele foi utilizado para a estimativa de biomassa arbórea, a partir de modelos que foram desenvolvidos e avaliados quanto ao seu ajuste. Também foram plotados os valores de SAVI e Biomassa em um gráfico a fim de observar qual a característica da relação entre eles, conforme apresentado na Figura 4.

#### **Figura 4 – Relação entre a biomassa arbórea real e o índice SAVI.**

Observa-se na Figura 3 que a maior densidade de pontos apresentou uma relação crescente, porém com uma dispersão bastante elevada e, que três pontos apresentaram-se distanciados em relação a tendência da maioria. Esses três pontos foram mantidos, pois não foi possível identifica-los como *outliers*, visto que quando se trabalha com florestas nativas existem altas variações de biomassa, assim como dos índices, devido a variações de refletância das diferentes espécies. PONZONI et al. (2012) comentaram que em alguns casos a diferença entre a vegetação primária e regeneração pode mascarar a relação direta entre biomassa e os índices, devido a quantidade de sombras no dossel.

Com os valores do índice SAVI e da biomassa arbórea real, ajustaram-se 5 modelos. Foram utilizados tanto os valores originais de SAVI como por diversas transformações, a fim de minimizar erros.

Inicialmente buscou-se utilizar as equações para estimarem dois coeficientes, o de intersecção e a variável x, porém observou-se que com a existência do coeficiente  $\beta_0$ , os valores de  $\beta_1$  tornavam-se não significativos. Desta forma tomou-se  $\beta_0$  sempre na origem e as equações foram ajustadas com base em  $\beta_1$ . As equações ajustadas estão apresentadas na Tabela 2, juntamente com as estatísticas de ajuste, neste caso o Coeficiente de Determinação Múltipla Ajustado ( $R^2_{aj.}$ ) e o Erro Padrão da Estimativa em percentual ( $S_{yx}\%$ ).

**Tabela 2** – Equações ajustadas, coeficientes e estatísticas para estimativa de biomassa arbórea a partir do índice SAVI

| Número | Modelo                                  | $\beta_0$ | $\beta_1$ | $R^2_{aj}$ | $S_{yx}$ (%) |
|--------|---|-----------|-----------|------------|--------------|
| 1      | $Y = \beta_0 + \beta_1 * SAVI$          | 0         | 411,6857  | 0,8346     | 34,34        |
| 2      | $Y = \beta_0 + \beta_1 * \ln(SAVI)$     | 0         | 4.546,398 | 0,8713*    | 27,54*       |
| 3      | $Y = \beta_0 + \beta_1 * (SAVI)^2$      | 0         | 7,823857  | 0,6447     | 57,93        |
| 4      | $Y = \beta_0 + \beta_1 * (SAVI)^{-1}$   | 0         | 536.175,4 | 0,7877     | 41,44        |
| 5      | $Y = \beta_0 + \beta_1 * \sqrt{(SAVI)}$ | 0         | 2.670,395 | 0,8692     | 27,98        |

\* Representa o melhor valor para a estatística considerada.  $S_{yx}$  (%) = Erro padrão da estimativa em percentual;  $R^2_{aj}$  = Coeficiente de determinação múltipla ajustado;  $\beta_0$  e  $\beta_1$  = Coeficientes ajustados.  $\ln$  = valor logaritimizado; SAVI = Valor do Índice de Vegetação Ajustado para o Solo; Y = variável dependente (biomassa) estimada.

Considera-se sempre que o valor de  $R^2_{aj}$  deve ser o mais próximo de 1, assim como o  $S_{yx}$ (%) deve ser o menor possível. A partir dessas estatísticas então, demonstrou-se a superioridade da Equação 2 para a estimativa de biomassa arbórea nos limites deste estudo. Em sequência de melhor ajuste, apresentam-se as Equações 5, 1, 4 e com pior ajuste a Equação 3.

Os resultados apresentados na Tabela 2 são semelhantes aos encontrados por WATZLAWICK et al. (2009), que observaram para diversos índices valores de erro variando de 22% a 61%, de  $R^2_{aj}$  máximo de 0,73. Para a equação com o uso somente de SAVI os mesmos autores verificaram erro de 40% e  $R^2_{aj}$  de 0,57, que indicou que o SAVI não teve relação tão significativa com a biomassa como no presente estudo. WATZLAWICK et al. (2006) para plantios de *Pinus taeda* L. encontraram maior correlação entre NDVI (quando comparado a outros índices) e biomassa, e conseguiram elaborar equações com  $S_{yx}$ (%) que variaram de 20% até 46%, aproximadamente.

BOLFE et al. (2012) também com uso do SAVI encontraram valores de  $R^2$  entre 0,24 e 0,62 em diversos estágios de vegetação em áreas de sistemas agroflorestais, e ainda indicaram que os valores de  $R^2$  diminuíram nas parcelas com maiores valores de biomassa, devido à saturação de valores com o aumento da área foliar (HUETE et al., 2002; CASSOL, 2013).

Por fim, os ajustes foram ainda avaliados quanto a análise gráfica dos resíduos. Dessa forma, os resíduos em percentual foram plotados sob o eixo de valores de biomassa arbórea real. Observa-se na Figura 4 que o Modelo 2, que obteve os melhores valores para  $R^2_{aj}$  e  $S_{yx}$ (%) apresentou tendenciosidade nos resíduos. Os outros modelos apresentaram um distribuição melhor dos resíduos ao longo da linha, porém em todos os casos apresentando maiores erros nas duas extremidades.

**Figura 4** – Distribuição gráfica de resíduos das equações ajustadas para a biomassa arbórea a partir do índice SAVI. a) ; b) ; c) ; d) ; e)

Devido a tendenciosidade da Equação 2, pode-se escolher como melhor equação de estimativa a Equação 5, a qual apresentou valores de  $R^2_{aj}$  e  $S_{yx}$  (%) muito semelhantes à Equação 2, mas que se mostra superior devido a melhor distribuição de resíduos.

Quanto aos pontos distantes da maioria, estes podem ser explicados pela mesma razão que foi observado por WATZLAWICK et al. (2006), que comentaram que esse fato possivelmente é decorrente do número reduzido de pares de dados utilizados para o ajuste, além da existência de valores discrepantes, sendo portanto o ideal utilizar maior número de dados para elaborar um ajuste melhor.

## CONCLUSÕES

Após a análise de correlação entre os valores dos índices de vegetação com os valores de biomassa arbórea real observada, foi identificado que o índice SAVI apresentou a maior correlação, portanto, foi utilizado para o ajuste de modelos para a estimativa da biomassa.

As equações elaboradas com o índice SAVI mostraram-se adequadas, alcançaram valores de  $R^2_{aj}$  entre 0,64 e 0,87, e  $S_{yx}$  (%) entre 27 e 57%, resultados considerados bons comparando-se com trabalhos semelhantes encontrados na literatura.

A equação que obteve os melhores resultados estatísticos foi a que considerou o valor de SAVI logaritimizado, porém esta equação apresentou tendenciosidade na plotagem dos resíduos. Desta forma decidiu-se utilizar a Equação 5 () para a estimativa da biomassa arbórea.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APG III – Angiosperm Phylogeny Group. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. **Botanical Journal of the Linnean Society**. 17p, 2009.

BARET, F.; GUYOUT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APOAR assessment. **Remote sensing of environment**, v. 35, n. 2, p. 161-173, 1991.

BOLFE, E. L.; FERREIRA, M. C.; BATISTELLA, M. Avaliação da correlação entre índices de vegetação e biomassa epígea de sistemas agroflorestais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** São José dos Campos. p. 2603-2610, 2009.

BOLFE, E.L.; BATISTELLA, M.; FERREIRA, M.C. Correlação de variáveis espectrais e estoque de carbono da biomassa aérea de sistemas agroflorestais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 1261-1269, 2012.

CASSOL, H. L. G. **Estimativa de biomassa e estoque de carbono em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista com uso dados ópticos de sensores remotos**. 2013. 143 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

DURIGAN, M. E. **Florística, dinâmica e análise proteica de uma Floresta Ombrófila Mista em São João do Triunfo - PR**. 1999. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

ESPÍNDULA, A.; SOUZA, E. M. F. R.; VICENS, R. S.; CRUZ, C. B. M. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação (Mata Atlântica): comparações das curvas espectrais de sensores multiespectrais e hiperespectrais. IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. **Anais....** Recife, p. 2-6, 2012.

FERRAZ, A. S.; SOARES, V. P.; SOARES, C. P. B.; RIBEIRO, C. A. S. A. GLERIANI, J. M. Uso de imagens do satélite IKONOS II para estimar biomassa aérea de um fragmento de floresta estacional semidecidual. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais....** Foz do Iguaçu, PR, Brasil, p. 2794 – 2801, 2013.

FIGUEIREDO FILHO, A.; DIAS, A. N.; STEPKA, T. F.; SAWCZUK, A. R. Crescimento, mortalidade, ingresso e distribuição diamétrica em Floresta Ombrófila Mista. **Floresta**, v. 40, n. 4, 2010.

GOWARD, S. N.; MARKHAM, B.; DYE, D. G.; DULANEY, W.; YANG, J. Normalized Difference Vegetation Index Measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer. **Remote Sensing and the Environment**, v. 35, n. 2, p. 257-277, 1991.

HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25 p. 295–309, 1988.

HUETE, A.; DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E.P., GAO, X., FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.

HUETE, A. R.; JUSTICE, C.; LEEUWEN, W. V. **MODIS vegetation index (MOD13) Algorithm theoretical basis Document Version 3**, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland 20771, USA, p. 122., 1999.

HUETE, A.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; LEWEEEN, W. A. Comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, n. 59, p. 440-451, 1997.

IBGE. 2012. **Manual técnico da vegetação brasileira: sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres, técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos**. 2a ed. IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 275p., 2012.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução da 2ª edição por (pesquisadores do INPE): José Carlos N. Epiphanyo (coordenador); Antonio R. Formaggio; Athos R. Santos; Bernardo F. T. Rudorff; Cláudia M. Almeida; Lênio S. Galvão. São José dos Campos: Parêntese, p. 672, 2009.

LE MAIRE, G.; MARSDEN, C.; NOUVELLON, Y.; GRINAND, C.; HAKAMADA, R.; STAPE, J. L.; LACLAU, J. P. MODIS NDVI time-series allow the monitoring of *Eucalyptus* plantation biomass. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n.10, p 2613 - 2625, 2011.

LIPINSKI, E. T. CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A. Estoque e dinâmica da biomassa e do carbono ao longo de 17 anos em uma floresta ombrófila mista. **21º Evento de Iniciação Científica**. 2013.

MACIEL, M. de N. M.; BASTOS, P. C. de O.; CARVALHO, J. O. P. de; WATRIN, O. dos S. Uso de imagens orbitais na estimativa de parâmetros estruturais de uma floresta primária no município de Paragominas, estado do Pará. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, PA, n. 52, p. 159-178, 2009.

MATOS, F. D. A.; KIRCHNER, F. F. Estimativa da floresta ombrófila densa de terra firme na amazônia central com o satélite Ikonos II. **FLORESTA**, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 157 - 171. 2008.

PIZZATO, W. **Avaliação biométrica da estrutura e da dinâmica da floresta ombrófila mista em São João do Triunfo - PR: 1995 a 1998**. 1999. 172f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

PIRES, P. T. L. **Alternativas políticas e jurídicas para a gestão das florestas de Araucária no estado do Paraná**. 2003. 210f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

PONZONI, F. J.; SHIMBUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. São José dos Campos, SP, Oficina de Textos, 2ª edição, 176 p., 2012.

QURESHI, A.; PARIVA. S.; PADOLA, R.; HUSSAIN, S. A. A review of protocols used for assessment of carbon stock in forested landscapes. **Environmental Science & Police**. v. 16, p. 81-89. 2012.

RATUCHNE, L. C. **Ajuste e seleção de equações alométricas para a estimativa de biomassa, carbono e nutrientes em uma Floresta Ombrófila Mista**. 2010. 102f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual do Centro Oeste, Guarapuava, 2010.

ROSA, P. A.; BREUNIG, F. M.; BALBINOT, R.; GALVÃO, L. S. Dinâmica da floresta do Parque Estadual do Turvo com índices de vegetação. **Floresta e ambiente**, v. 20, n. 4, p. 487-499, 2013.

SANQUETTA, C. R. **Manual para instalação e medição de parcelas permanentes nos Biomas Mata Atlântica e Pampa**. [S.l.]: Rede Map. [Curitiba]: Funpar, p. 43, 2008.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R. et al. (Eds.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: [s.n.], p. 119-140, 2002.

SANQUETTA, C. R.; PIZZATO, W.; PÉLICO NETTO, S.; EISFELD, R. L.; FIGUEIREDO FILHO, A. Estrutura vertical de um fragmento de Floresta Ombrófila Mista no Centro-Sul do Paraná. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 3, p. 61-64, 2001.

VIGANÓ, H. A.; BORGES, E. F.; FRANCA-ROCHA, W. J. S. Análise do desempenho dos índices de vegetação NDVI e SAVI a partir de imagens Aster. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** Curitiba, p. 1828-1834, 2011.

WATZLAWICK, L. F.; KOEHLER, H. S.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em plantios de *Pinus taeda* L. utilizando imagens do satélite Ikonos II. **Ciência e Natura**, UFSM, v. 28, n°1, p. 45 - 60, 2006.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com Araucária utilizando imagens do satélite Ikonos II. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 2, p. 169-181, 2009.