

Efeito da correção atmosférica em imagens do satélite Rapideye na estimativa do índice de área foliar de *Eucalyptus*

Italo Ramos Cegatta ¹
Clayton Alcarde Alvares ²
José Luiz Stape ²
Paulo Cesar Sentelhas ¹

¹ Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ,
Universidade de São Paulo – USP
Av. Pádua Dias, 11 – CEP 13418-900, Piracicaba, SP, Brasil
{italo.cegatta, pcsentel.esalq}@usp.br

² Suzano Papel e Celulose
Av. Dr. José Lembro, 1010, Jardim Bela Vista, CEP: 18207-780, Itapetininga, SP, Brasil
{calcarde, stape}@suzano.com.br

Abstract. The determination of leaf area index (LAI) is essential to understand the process of conversion of radiation into forest biomass. Currently, it is possible to estimate LAI from satellite images. However, there are not many studies related to the effect of the atmospheric correction of the images on the estimation of LAI in homogeneous *Eucalyptus* forests. The aim of this study was to verify if images with atmospheric correction can generate more accurate results, in comparison to raw images. The ceptometer was used to estimate LAI in field of 5 clones planted in the cities of Três Marias-MG and Borebi-SP. It was used Rapid Atmospheric Correction tool to atmospheric correction in the images provided by Rapideye sensor. The index of simple vegetation ratio was calculated from the raw images and with atmospheric correction to compare with the data collected in the field. The relation between the vegetation index of pre-processed and raw images presented a linear relationship and an angular coefficient sensitive to the date and place of image collection. The model adjusted from the image with atmospheric correction obtained better performance in relation to the image without processing, however there was no significant gain and the two methods can be considered for the estimation of LAI in clonal *Eucalyptus* plantations.

Palavras-chave: vegetation index, simple ratio, ceptometer, forestry, índice de vegetação, razão simples, ceptômetro, silvicultura.

1. Introdução

A produção de biomassa está diretamente relacionada com a absorção de radiação solar pelo dossel e a eficiência de conversão do aparato fotossintético (Binkley et al., 2013). O índice de área foliar (IAF) é definido como a superfície fotossintética de tecido foliar por unidade de área projetada no solo. A determinação do IAF é importante, pois expressa a capacidade do dossel em interceptar e absorver a radiação solar (Jonckheere et al., 2004). Os métodos diretos para determinação do IAF são trabalhosos e exigem o abate das árvores em todas as classes de diâmetro da população, quantificação da área foliar individual e o monitoramento da queda de folheto. Por esses motivos, são utilizados equipamentos que permitem a estimativa do IAF por meio de métodos indiretos com maior praticidade, como AccuPAR LP-80 e LI-COR LAI-2000 (Mattos, 2015). Recentemente, com o avanço da tecnologia de sensoriamento remoto, a utilização de satélites de alta resolução espacial, temporal e espectral permitiram a estimativa do IAF de povoamentos florestais com bastante acurácia (Flores, 2003; Alvares et al., 2013; Almeida et al., 2015). O pré-processamento das imagens de satélite por meio da correção atmosférica é recomendado quando se trabalha com cenas de datas diferentes, entretanto há uma carência de estudos relacionados ao IAF em florestas plantadas e homogêneas (Mannschatz et al., 2014; Ali et al., 2015). O presente trabalho tem como objetivo verificar se

a correção atmosférica das imagens de satélite tem efeito significativo na estimativa do IAF de florestas plantadas de *Eucalyptus*.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado em dois experimentos do programa cooperativo TECHS -Tolerância de Eucalyptus Clonais aos Estresses Hídrico, Térmico e Biológico (www.ipef.br/techs), que conta com uma ampla rede experimental no Brasil e Uruguai (Stape et al., 2014). Cada módulo do programa possui um ensaio clonal, plantado no arranjo 3 x 3 m, e cada clone possui uma parcela de 8 linhas por 10 plantas, totalizando 80 plantas e 720 m².

O estudo foi realizado nos módulos experimentais instalados em Três Marias-MG e Borebi-SP, onde foram selecionados 5 clones, presentes em ambos os sítios. A Tabela 1 mostra as características climáticas dos locais em que foi realizado o estudo.

Tabela 1. Caracterização climática dos sítios estudados.

| Local | Lat | Long | Alt | Tmin | Tmax | UR | RAD | PPT | ETP |
|----------------|--------|--------|-----|------|------|----|------|------|------|
| Três Marias-MG | -18,25 | -45,10 | 806 | 17 | 28,7 | 62 | 20.2 | 792 | 1610 |
| Borebi-SP | -22,73 | -49,00 | 656 | 14,4 | 28,4 | 69 | 16.7 | 1701 | 1147 |

Lat = latitude (°); Long = longitude (°); Alt = altitude (m); Tmin = temperatura mínima média (°C); Tmax = temperatura máxima média (°C); UR = umidade relativa média (%); RAD = radiação global média (MJ m⁻² d⁻¹); PPT = precipitação média anual (mm); ETP = evapotranspiração potencial (mm).

2.2 Coleta do IAF

As medições do IAF foram realizadas em campanhas semestrais (maio e outubro). Utilizando o ceptômetro (Accupar LP80, Decagon), foram tomadas 4 medições (Norte, Sul, Leste e Oeste) em 6 pontos, totalizando 24 medidas de radiação abaixo do dossel por parcela. As medições ocorreram com aparelho nivelado 1 m acima do solo e preferencialmente entre 11 e 14 horas, em dias sem nuvens e sem vento excessivo. A radiação externa foi medida em intervalos de no máximo 20 minutos.

O índice de área foliar de cada parcela (clone) foi estimado pelo método indireto de inversão da radiação fotossinteticamente ativa transmitida pelo dossel, conforme a Equação 1 (Mattos, 2015).

$$IAF = \frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2K} \right) f_b - 1 \right] \ln \tau}{A(1 - 0,047f_b)} \quad (1)$$

em que: K = coeficiente de extinção de luz, f_b = fração da radiação PAR que incide na forma direta; τ = fração da PAR observada abaixo do dossel pela PAR observada acima do dossel e $A = 1,118$.

2.3 Processamento das imagens

Foram utilizadas imagens do sensor Rapideye, que possui resolução espacial de 5 m e 5 bandas espectrais, azul (0,440 – 0,510 μm), verde (0,520 – 0,590 μm), vermelho (0,630 – 0,685 μm), vermelho_{edge} (0,690 – 0,730 μm) e infravermelho próximo (0,760 – 0,850 μm). Para minimizar o efeito da data de coleta, as imagens utilizadas tiveram, no máximo, 30 dias de diferença em relação a coleta do IAF em campo (Tabela 2).

Tabela 2. Datas de coleta da imagem de satélite Rapideye, medição do IAF em campo e idade do plantio, para os sítios estudados.

| Cidade | Coleta da imagem Rapideye | Medição do IAF | Idade do plantio (anos) |
|----------------|---------------------------|----------------|-------------------------|
| Três Marias-MG | 10/10/2014 | 15/10/2014 | 2,5 |
| Três Marias-MG | 28/05/2015 | 03/06/2015 | 3,1 |
| Borebi-SP | 06/10/2014 | 30/10/2014 | 2,7 |
| Borebi-SP | 10/04/2015 | 04/05/2015 | 3,3 |
| Borebi-SP | 05/10/2015 | 07/10/2015 | 3,7 |
| Borebi-SP | 25/05/2016 | 24/06/2016 | 4,3 |

A partir da imagem bruta, foi realizada a conversão do número digital de cada pixel para valores de refletância, conforme a Equação 2 e metadados de cada imagem.

$$REF_i = ND_i * 0,01 * \frac{\pi * d^2}{IS_i * \cos Zh} \quad (2)$$

em que: i = banda espectral, ND = número digital, d = distância terra-sol, IS = irradiância no topo da atmosfera, Zh = ângulo zenital.

Para avaliar os efeitos atmosféricos na estimativa do IAF, foi realizada a correção atmosférica das imagens utilizando a ferramenta *Rapid Atmospheric Correction*, disponível no software Erdas Imagine 2015.

Foi calculado para todas as cenas, com e sem correção atmosférica, o índice de vegetação *Simple Ratio* modificado, que consiste na divisão da banda do infravermelho próximo pela banda do vermelho_{edge}. Para o cômputo do índice de vegetação e posterior correlação com o IAF medido em campo, foi calculada a média dos 12 pixels internos de cada parcela.

2.4 Ajuste dos Modelos

Com o objetivo de avaliar se a correção atmosférica possibilita um melhor ajuste entre o índice de vegetação e o IAF, foi ajustado um modelo de regressão linear simples para cada método (com e sem correção atmosférica). Realizou-se a validação cruzada dos modelos, utilizando 70% dos dados para ajuste e 30% para validação. A escolha do modelo foi baseada nos critérios de precisão, exatidão e confiança, calculados respectivamente pelos indicadores: coeficiente de correlação (r), índice de Willmott (d) e índice de desempenho (c), sendo o último o resultado da multiplicação dos índices r e d (Camargo e Sentelhas, 1997). Todo o processamento e ajuste dos modelos foi realizado no ambiente de programação R (R Core Team, 2016).

3. Resultados e Discussão

O índice de vegetação calculado a partir de diferentes métodos de processamento de imagem estabelece uma correlação linear positiva, como pode ser observado na Figura 1. Para cada cena, há um coeficiente angular específico sugerindo um importante efeito do dia e local de coleta da imagem. Esta variação é dada pelo fato dos parâmetros utilizados na correção atmosférica serem específicos para dia, data e hora de coleta da imagem. É possível notar no gráfico que as duas cenas adquiridas quando as florestas contavam menos que 3 anos possuem os valores mais baixos de índices de vegetação, sendo ambas as cenas adquiridas no mês de outubro, onde o IAF tende a ser menor devido a menor disponibilidade de água. É possível realizar um comparativo entre o índice de vegetação calculado para as cenas de Borebi-SP nas

idades 2,7 e 3,7 anos, ambas coletadas nos dias 06/10/2014 e 05/10/2015, respectivamente. Em 2014, para a primeira cena, o acumulado de chuva nos últimos 30 dias somou 62 mm, entretanto, em 2015 foram registrados 185 mm de chuva 30 dias antes da coleta de da imagem. Esta maior disponibilidade de água no sistema pouco antes da coleta da imagem pode ter alterado os padrões de refletância da folha, e assim resultado em um índice de vegetação maior.

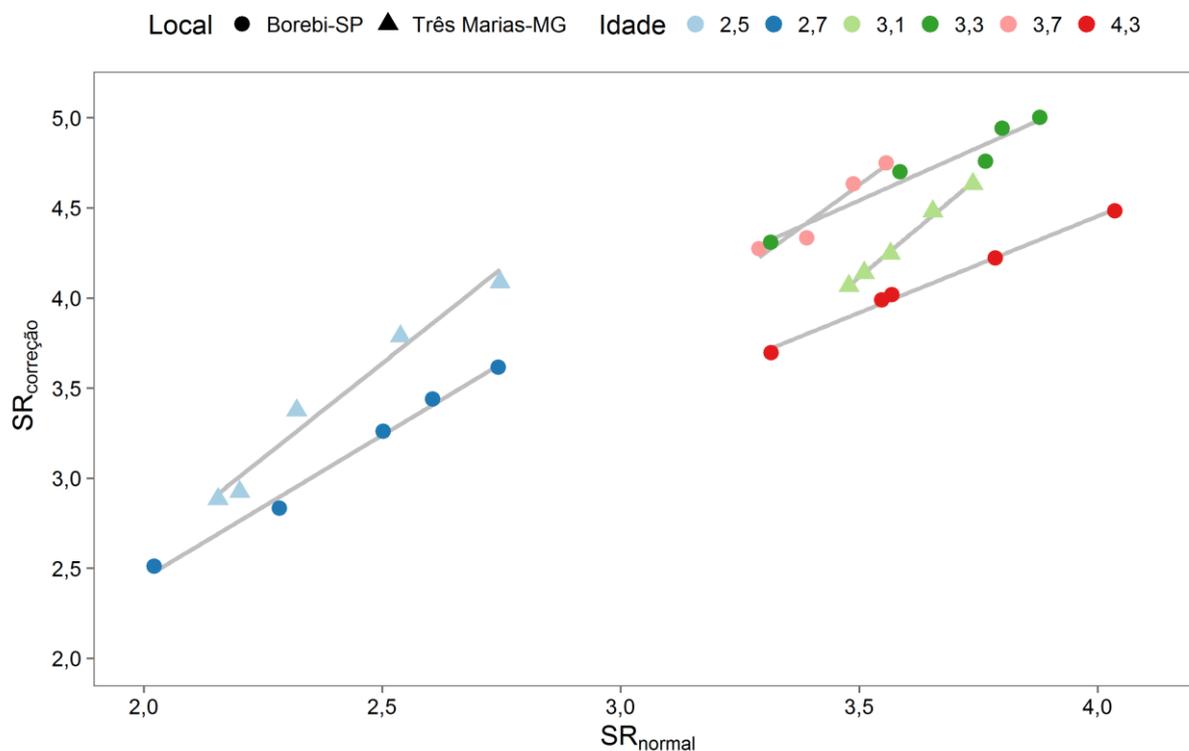


Figura 1. Relação entre o índice de vegetação (SR) calculado com imagem simples (SR_{normal}) e com correção atmosférica (SR_{correção}).

A Figura 2 apresenta o ajuste linear entre o IAF e o índice de vegetação calculado a partir de diferentes processamentos, considerando todos os clones em todas as idades. É possível notar que o índice com correção atmosférica (SR_{correção}) varia entre 2,5 e 5, enquanto o índice sem correção atmosférica (SR_{normal}) apresenta amplitude entre 2 e 4. Esta diferença de amplitude não tem impacto significativo quando se ajusta uma reta para predição, entretanto pode gerar problemas nos valores extremos quando se ajusta relação exponencial, conforme encontrado por Flores (2003) e Alvares et al. (2015).

O modelo ajustado a partir da imagem com correção atmosférica obteve melhor desempenho considerando todos os critérios propostos. A precisão, indicada pelo coeficiente de correção (r) e relacionada ao grau de dispersão dos dados, foi superior no modelo que calcula o índice de vegetação com imagem pré-processada. Já a exatidão (d), que expressa o quanto os valores preditos se afastam dos valores observados, não teve alteração significativa entre os dois modelos. Por fim, o índice de desempenho (c) calculado para os dois modelos, indica uma maior confiabilidade para aquele que utilizou como base imagens de satélite com correção atmosférica. Pode-se considerar ainda que os dois modelos apresentaram boa acurácia, uma vez que ambos apresentaram valores satisfatórios de precisão, exatidão e confiança.

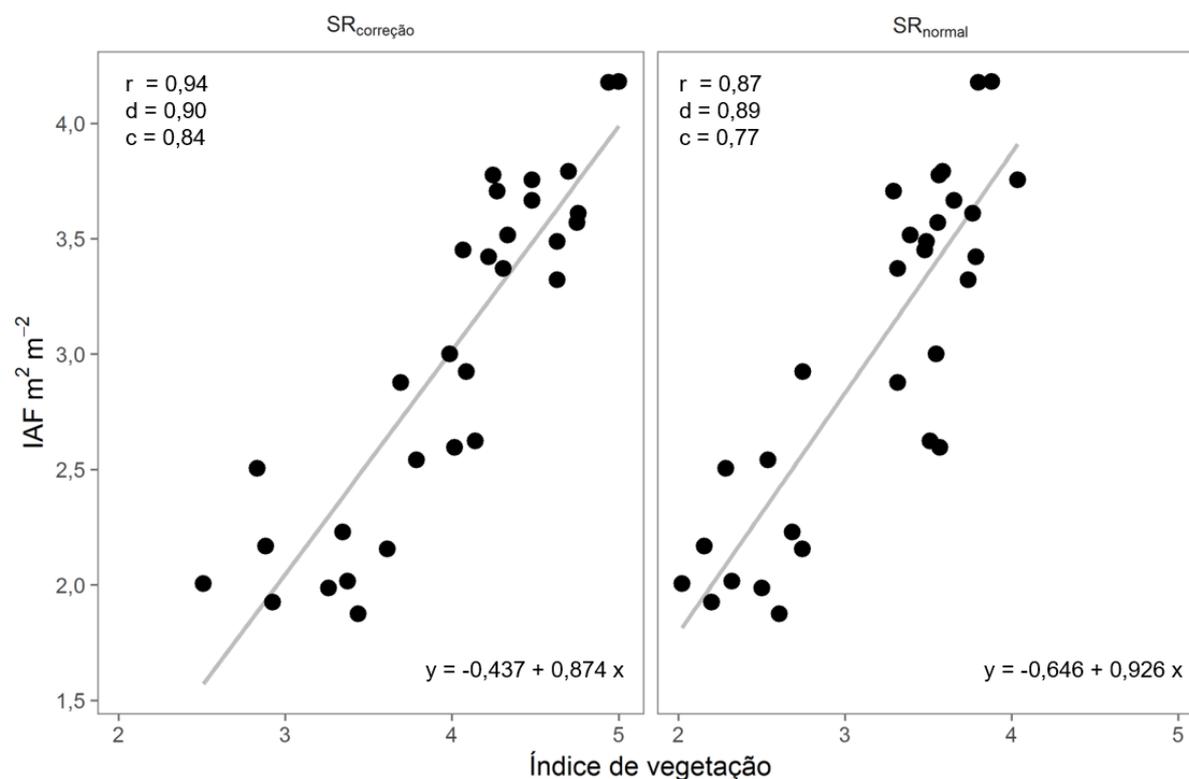


Figura 2. Análise de regressão entre IAF e índices de vegetação calculados a partir de imagens brutas (SR_{normal}) e pré-processadas (SR_{correção}).

4. Conclusões

A utilização de imagens de satélite do sensor Rapideye foi eficiente na estimativa do IAF a partir do índice de vegetação SR. O pré-processamento das imagens através da correção atmosférica aumentou a acurácia do modelo preditivo em comparação às imagens brutas. Entretanto não foi observado ganho significativo, de forma que os dois métodos podem ser considerados para a determinação do IAF em plantios clonais de *Eucalyptus*.

Agradecimentos

Ao projeto TECHS-IPEF e à todas as empresas participantes do programa pela coleta de dados e manutenção dos sítios experimentais.

Referências Bibliográficas

Ali, M.; Montzka, C.; Stadler, A.; Menz, G.; Thonfeld, F.; Vereecken, H. Estimation and validation of RapidEye-based time-series of Leaf Area Index for winter wheat in the Rur catchment (Germany). *Remote Sensing*, v. 7, n. 3, p. 2808–2831, 2015.

Almeida, A. Q.; Ribeiro, A.; Delgado, R. C.; Rody, Y. P.; De Oliveira, A. S.; Leite, F. P. Índice de área foliar de Eucalyptus estimado por índices de vegetação utilizando imagens TM - landsat 5. *Floresta e Ambiente*, v. 22, n. 3, p. 368–376, 2015.

Alvares, C. A.; Mattos, E. M. De; Campoe, O. C.; Marrichi, A. H. C.; Stape, J. L. Uso de sensoriamento remoto na estimativa do índice de área foliar em Eucalyptus. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), p. 6429–6436, 2015, João Pessoa. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2015.

Alvares, C. A.; Munhoz, J. S. B.; Stape, J. L.; Stahl, J.; Andrade, L.; Santos, G.; Lima, R.; Coutinho, R. T.; Hoinacki, R.; Fox, T. Caracterização da dinâmica dos índices de vegetação NDVI e EVI em plantações de Pinus do Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), p. 2866–2875, 2013, Foz do Iguaçu. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2013.

Binkley, D.; Campoe, O. C.; Gspaltl, M.; Forrester, D. I. Light absorption and use efficiency in forests: Why patterns differ for trees and stands. **Forest Ecology and Management**, v. 288, p. 5–13, 2013.

Camargo, A. P.; Sentelhas, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.

Flores, F. J. **Using remote sensing data to estimate leaf area index and foliar nitrogen of loblolly pine plantations**. 2003. Tese (Doutorado). North Carolina State University., Raleigh, 2003.

Jonckheere, I.; Fleck, S.; Nackaerts, K.; Muys, B.; Coppin, P.; Weiss, M.; Baret, F. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 121, n. 1–2, p. 19–35, 2004.

Mannschatz, T.; Pflug, B.; Borg, E.; Feger, K. H.; Dietrich, P. Uncertainties of LAI estimation from satellite imaging due to atmospheric correction. **Remote Sensing of Environment**, v. 153, p. 24–39, 2014.

Mattos, E. M. **Caracterização da sazonalidade do crescimento do lenho, da copa e da eficiência do uso da luz em clones do gênero Eucalyptus**. 2015. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, Brasil, 2015.

R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. **R Foundation for Statistical Computing**, v. 3.3.0, 2016. Disponível em: <<http://www.r-project.org>>.

Stape, J. L.; Binkley, D.; Grattapaglia, D.; Campoe, O.; Alvares, C.; Mattos, E.; Otto, M.; Hakamada, R.; Moraes, M.; Wilcken, C. Fatores hídricos e as decisões de silvicultura, de melhoramento e de proteção na eucaliptocultura. In: Encontro Brasileiro de Silvicultura, 3, 2014, Campinas. **Anais...** Curitiba: Embrapa Florestas, 2014. p. 81-98.