

## Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) através de Fotografias Hemisféricas e Índices de Vegetação em plantios clonais de Eucalipto

Yhasmin Gabriel Paiva<sup>1</sup>  
Aristides Ribeiro<sup>1</sup>  
André Quintão de Almeida<sup>1</sup>  
José Marinaldo Gleriane<sup>2</sup>  
José Eduardo Macedo Pezzopane<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Viçosa — DEA/UFV  
Av. P.H. Holfs - Departamento de Engenharia Agrícola – 36570-000 – Viçosa – MG.  
Brasil. yhasminp@hotmail.com / andre.almeida@ufv.br / ribeiro@ufv.br /

<sup>2</sup> Universidade Federal de Viçosa — DEF/UFV  
Av. P.H. Holfs - Departamento de Engenharia Florestal – 36570-000 – Viçosa – MG.  
gleriani@gmail.com

<sup>3</sup> Centro de Ciências Agrárias / Universidade Federal do Espírito Santo – CCA/UFES  
Alto Universitário, Caixa Postal 16 - 29500-000 - Alegre – ES.  
jemp@npd.ufes.br

**Abstract:** Leaf Area Index (LAI) is a biophysical variable that expresses the growth of a certain vegetal community. It shows close relation with the productivity in which this community is found. Among the indirect methods to determine the LAI, one may find the Fisheye Photography, which may be successfully applied on Eucalyptus crops. The importance of vegetation indexes (VI's) in order to map the LAI is used to estimate the fraction of Photosynthetically Active Radiation absorbed by the plants canopy. The scope of this work was to evaluate the relation between LAI collected from Hemispheric Photographs and the Vegetation Index images of the Modis and Landsat TM5 on crops of cloned Eucalyptus. The research was carried out on forest crops located in the Southern of Minas Gerais State, Brazil. FIA collections were done in August 2008. NDVI images were taken from the Instituto Nacional de Pesquisas Especiais (INPE). Correction for reflectance values was performed. The VI's EVI and NDVI, products of the MODIS sensor, were taken from the National Aeronautics and Space Administration (NASA). Hemispheric Photographs showed to be an alternative method for achieving estimated LAI. LAI revealed a good relation with IVs, being the NDVI from the MODIS sensor the one that related the best.

**Palavras-chave:** Leaf Area Index (LAI), Fisheye Photography, Landsat TM5, MODIS

### 1. Introdução

O Índice de Área Foliar (IAF) é uma variável biofísica que expressa a taxa de crescimento de uma determinada comunidade vegetal, apresentando estreita relação com a produtividade em que esta se encontra (Lang e Mcmurtrie, 1992). O IAF representa a capacidade que a planta tem para explorar o espaço disponível sendo a razão entre a superfície total das folhas de vegetais em relação à superfície total do terreno (Art, 2001).

As folhas são os órgãos fotossintetizantes por excelência, conseqüentemente há uma estreita relação entre o IAF e a atividade fotossintética. Através do IAF é possível estimar uma série de parâmetros, dentre eles a produtividade primária (Vargas et al. 2002) com o aumento de disponibilidade de superfície fotossinteticamente ativa.

Os métodos indiretos para determinar o IAF são muito utilizados visto que estes não oneram uma destruição em massa da vegetação. Dentre eles têm-se a fotografia hemisférica ou lentes “olhos de peixe” que pode ser aplicado com sucesso em plantios

de Eucaliptos (Macfarlane et al., 2000, Macfarlane, 2007). Este equipamento mede a fração de abertura do dossel em múltiplos ângulos de visada em ordem analiticamente separada e quantificada em ângulo e área foliar.

Uma fonte de dados alternativa para a modelagem é tida através da técnica do sensoriamento remoto. Com dados adequados, as estimativas do modelo podem ser em escalas espaciais e temporais permitindo a comparações de padrões espaciais, sazonais para variações inter-anuais da atividade da vegetação a ser avaliada (Heinsch et al., 2006). Recentemente, pesquisadores têm implementado o sensoriamento remoto como entrada de dados para modelos ecofisiológicos que estimam a produtividade da floresta utilizando as imagens de satélite (Chirici et al., 2007, Meng et al., 2007, Coops et al, 2007 Nightingale et al, 2008, ).

Os Índices de Vegetação (IV's) foram concebidos para ressaltar o comportamento espectral da vegetação e estão baseados fundamentalmente nas diferenças quantitativas entre a radiação refletida e a transmitida por esses dois tipos de alvos (Jackson e Huete, 1991).

Segundo Xavier e Vettorazzi (2004), a importância dos índices de vegetação para mapear o índice de área foliar (IAF) é para a estimativa da fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelos dosséis das plantas (Walter-Shea et al, 1997), bem como da biomassa e percentagem da cobertura verde da superfície. Com o aumento da quantidade de vegetação, a refletância vermelha (600-700 nm) decresce devido à absorção pela clorofila e a refletância próxima ao infravermelho (NIR) aumenta por causa da luz dispersa pelos tecidos do mesófilo.

O “Enhanced Vegetation Index” (EVI), produto do sensor MODIS, foi desenvolvido para otimizar o sinal da vegetação, melhorando a sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa, além do monitoramento da vegetação através de uma ligação do sinal de fundo do dossel e a redução das influências atmosféricas (Justice et al., 1998).

No caso do “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI), vários estudos mostraram a sua alta correlação com parâmetros associados com o vigor e produtividade das plantas, tais como: biomassa foliar verde, índice de área foliar, conteúdo de clorofila e estado das culturas (Chapelle et al., 1992, Cohen et al., 2003).

O Brasil está entre os países maiores exportadores de celulose do mundo (Arcel, 2008), sendo que o gênero *Eucalyptus* ocupa atualmente a maior superfície plantada. Neste contexto, é evidente a importância da realização de estudos que possibilitem compreender e otimizar a eficiência da produção destas florestas.

Este estudo tem por objetivo avaliar a relação entre o IAF coletado através das Fotografias Hemisféricas e as imagens Índices de Vegetação do Sensor MODIS e LANDSAT TM5 em plantios clonais do gênero Eucalipto.

## **2. Metodologia de Trabalho**

### **2.1. Áreas de estudo**

O presente estudo foi realizado em plantios florestais de Eucalipto pertencentes à empresa Celulose Nipo-brasileira S/A (CENIBRA) localizada a leste do Estado de Minas Gerais.

Trabalhou-se em duas regionais da empresa, onde foram escolhidos quatro talhões clonais pertencentes aos projetos: Milagres e Sorós (Regional do Rio Doce) e Vai e Volta e Barrinhas (Regional de Cocais), conforme apresentado na Figura 1.

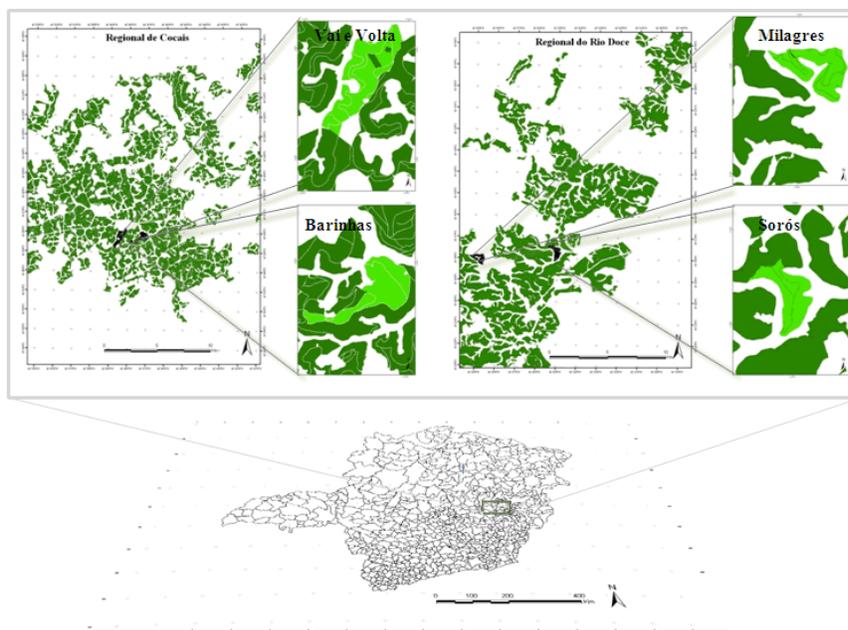


Figura 1. Localização em M.G. das Regionais de Cocais e Rio Doce, evidenciando os talhões de estudo.

Os talhões foram selecionados considerando os tipos de clone, datas de plantio e a altimetria das duas regionais trabalhadas (Tabela 1). Foram alocadas nove parcelas de 30 x 30 m bem distribuídas ao longo de cada talhão.

Tabela 1. Dados dos talhões

Regional	Projeto	Área (ha)	Coordenadas		Altitude (m)	Clone	Idade (meses)
			Latitude	Longitude			
Rio Doce	Milagres	40	19°17'44"S	42°25'01"W	300	2719	58
	Soros	77	19°28'16"S	42°48'23"W	250	2719	32
Cocais	Barrinhas	30	19°17'59"S	42°28'41"W	1070	372	58
	Vai e Volta	74	19°28'13"	42°47'13"W	970	372	32

## 2.2. Coletas do IAF por Fotos Hemisféricas

As coletas do Índice de Área Foliar foram realizadas no mês de Agosto de 2008, período em que a estação seca é evidenciada.

Para a estimativa do IAF através das fotos hemisféricas, utilizou-se os seguintes equipamentos: Câmera Fotográfica Nikon; Lente Nikon; Tripé com altura ajustada à 1,3 m do solo e nível de bolha.

Foram obtidas quatro imagens por parcela, sendo a coleta realizada a partir de duas diagonais alternando linhas e entrelinhas de plantio.

Para o processamento das imagens, trabalhou-se com o software Hemisfer v1.4.2, desenvolvido para analisar dosséis a partir de imagens hemisféricas.

## 2.3. Aquisição e Processamento das Imagens de Satélite

### 2.3.1 Imagens NDVI – LANDSAT-TM5

Adquiriu-se a imagem gratuitamente (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>) através do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Esta, possui resolução temporal de 16

dias e espacial de 30 metros. O período trabalhado correspondeu ao mesmo em que foram realizadas as coletas em campo.

O NDVI foi calculados através da equação 1 (Deering et al., 1975).

$$NDVI = \left( \frac{IVP - V}{IVP + V} \right) \quad (1)$$

em que: V corresponde à reflectância na faixa espectral do vermelho e IVP à reflectância na faixa espectral do infravermelho próximo.

No cálculo das imagens índice de vegetação, têm-se reconhecido a importância de trabalhar a partir dos valores de reflectância (Guyot e Gu, 1994, Xavier e Vettorazzi 2004, Thenkabai et al., 2004)

Para a correção radiométrica sobre os valores do NDVI, adotou-se a correção das bandas em níveis de cinza para valores de radiâncias (Markham e Baker, 1987) através da segunda equação, representando a energia solar refletida de cada pixel, unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda

$$L_i = L_{i, min} + \frac{L_{i, max} - L_{i, min}}{255} \times ND \quad (2)$$

em que:  $L_i$  é a radiância espectral na banda  $i$ ;  $L_{i, max}$  e  $L_{i, min}$  são as radiâncias espectrais mínimas e máximas ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ ), respectivamente;  $ND$  é a intensidade do pixel (número digital – número inteiro de 0 a 255); e  $i$  são as bandas (1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7) do satélite TM Landsat 5.

Para a obtenção dos valores de radiância em reflectância nas bandas 3 e 4, utilizou-se a equação 3:

$$\rho = \frac{\pi * L_i}{\cos\theta * d_i * E_{oi}} \quad (3)$$

onde:  $L_i$  é a reflectância espectral na banda  $i$ ;  $d_i$  o inverso do quadrado da distância Terra-Sol em unidade astronômica;  $E_{oi}$  o valor médio da irradiância solar exoatmosférica na banda  $i$  em  $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$  (constante solar);  $\theta$  o ângulo solar zenital;  $L_i$  é a radiância espectral na banda  $i$  em  $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ .

O inverso do quadrado da distância Terra-Sol pode ser estimado por Duffie e Beckman (1980):

$$d_i = 1 + 0,033 * \cos\left(NDA \frac{2\pi}{365}\right) \quad (4)$$

em que: NDA é o dia Juliano, que representa, o dia do ano contado consecutivamente a partir de 1 de janeiro até a data da imagem.

### 2.3.2. Imagens EVI/NDVI - MODIS

Os IV's EVI e NDVI, produtos do sensor MODIS foram obtidos gratuitamente, no período correspondente ao das coletas a campo, através da National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Cada imagem é um produto referente a múltiplas observações de um período de 16 dias, em que foram aplicados filtros de qualidade, de nuvem e de geometria de visada, que eliminam, por exemplo, dados com contaminação por nuvem. Para padronizar os dados de reflectância ao nadir e computar os índices de vegetação, é aplicado ao produto MODIS o modelo de reflectância bidirecional de Walthall (BRDF) (Anderson,

et al., 2003). O EVI pode ser calculado através da seguinte equação (Justice et al., 1998):

$$EVI = 2,5 * \left( \frac{IVP - V}{L + IVP + C_1 * V - C_2 * AZUL} \right) \quad (5)$$

em que: L é fator de ajuste para o solo; C1 e C2 são coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera; *azu*, *ver* e *IVP* são as reflectâncias da região espectral do azul, vermelho e infravermelho respectivamente. Os valores dos coeficientes dos coeficientes são: L=1, C1=6, C2=7.5 e o fator de ganho G= 2,5.

A equação do NDVI, produto MODIS é a mesma já citada anteriormente (equação 1).

Os dados MODIS são disponibilizados inicialmente no formato HDF (“*Hierarchy Data Format*”), com um nível de quantização de 16 bits. Para o pré-processamento deve ser definido sistema de projeção utilizado, neste caso coordenada UTM (Projeção Universal Transversal de Mercator) através do software desenvolvido pela NASA: MRT – *MODIS Reprojection Tool*. A resolução radiométrica foi convertida para 8 bits através do software ConvGeotiff.

#### 2.4. Análise Estatística

Os resultados foram reportados em termos de coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e nível de significância ( $p > 0,95$ ) entre os dados IV’s e o IAF das fotografias hemisféricas.

### 3. Resultados e Discussão

A Figura 2 ilustra o padrão de cobertura foliar para os quatro talhões clonais de Eucalipto em estudo. Observa-se que o projeto barrinhas (Figura 2-a) indica em uma interpretação “visual”, maior quantidade de folhas em relação aos demais.

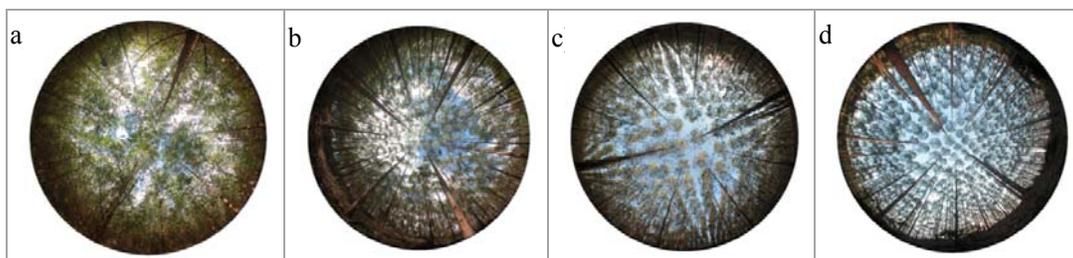


Figura 2. Fotografias Hemisféricas dos talhões: a)Barrinhas; b)Vai e Volta; c)Soros e d)Milagres.

Os valores do IAF após o processamento digital são apresentados em ordem crescente no eixo das abscissas para cada talhão (Figura 3). Comparando os projetos de Barrinhas e Vai e Volta, com o mesmo clone e idade de 32 e 58 meses respectivamente, verifica-se que o primeiro apresenta maiores valores de IAF em todas as parcelas. A diferença de idade é um fator de grande influência para esta resposta. A idade jovem explica melhor o crescimento exponencial da relação atividade/ano da planta. Quando se atinge os valores máximos da curva, o IAF decresce e posteriormente se mantém.

Os valores do IAF estimados pelas fotografias hemisféricas corroboram com os apresentados por Neto, et al. (2008) nas mesmas idades trabalhadas.

O mesmo comportamento não foi observado para talhões de Milagres e Sorós. A maioria das parcelas apresentou IAF semelhante, sendo que três parcelas se distinguiram em maiores valores para o plantio de 32 meses (Soros). Xavier et al, 2002, avaliando a resposta do o incremento do IAF de clones Eucalipto com idades de 15 a 18

meses, verificou assim como neste estudo, distintos comportamentos: uma queda não-linear com a idade, uma linear, e um IAF constante ao longo do crescimento.

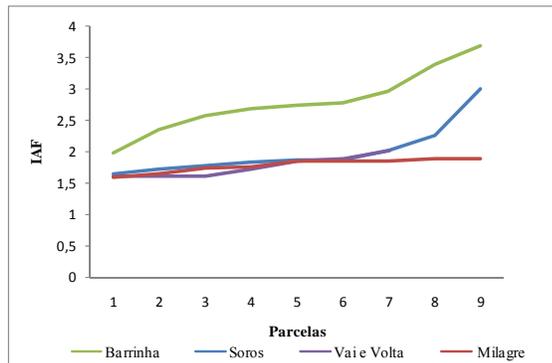


Figura 3. IAF das fotografias hemisféricas nas parcelas dos quatro talhões trabalhados.

As respostas espectrais dos índices de vegetação são expostas na Figura 4. Dos IV's trabalhados, têm-se que o NDVI do sensor LANDSAT/TM5 apresentou maiores valores de reflectância nos talhões estudados, seguido do NDVI e EVI do MODIS respectivamente.

Nota-se um aumento na curva de reflectância espectral para os talhões de Vai e Volta e principalmente o de Barrinhas. Neto, et al. (2006), verificaram para as duas regionais trabalhadas, que a de Cocais apresenta maiores valores da relação de Radiação Fotosinteticamente Ativa (RFA) e Radiação Global em quatro anos avaliados, ou seja, há uma maior disponibilidade energética para os processos fotossintéticos desta região.

Com os valores de reflectancias dos IV's encontrados nos talhões que se localizam nas maiores altitudes, entende-se que existe um maior incremento de biomassa em relação a regional do Rio Doce (250 m). Com altitude média de cerca de 1000 m, e assim menores temperaturas, os talhões de Cocais têm, em geral, um rendimento fotossintético que superam os talhões do Rio Doce, ou seja, ocorre um maior ganho no balanço de Carbono com a respiração (mitocondrial e fotorrespiração) reduzida, maior alocação de assimilados e consequentemente maior produtividade.

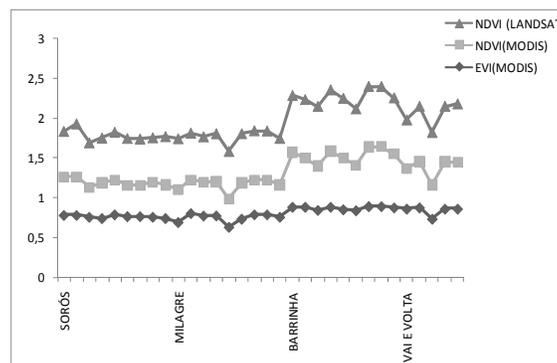


Figura 4. Reflectancia dos IV's para as parcelas dos quatro talhões.

A relação entre o IAF e as imagens IV's (Figura 5), demonstra ser significativa ( $p > 0,95$ ), sendo que o NDVI do MODIS apresenta maiores valores no coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,42$ ), seguido do NDVI do LANDSAT-TM5 ( $r^2 = 0,36$ ) e pelo NDVI do MODIS ( $r^2 = 0,273$ ). Xavier et al (2004) encontrou boa correlação do IAF com o

NDVI de imagens LANDSAT-TM5 para florestas de Eucalipto. Gong, et al. (2003) verificou o mesmo para plantios florestais de coníferas com imagens TM. Paiva et al. (2006) verificaram correlações significativas em florestas tropicais nativas, usando o EVI do MODIS.

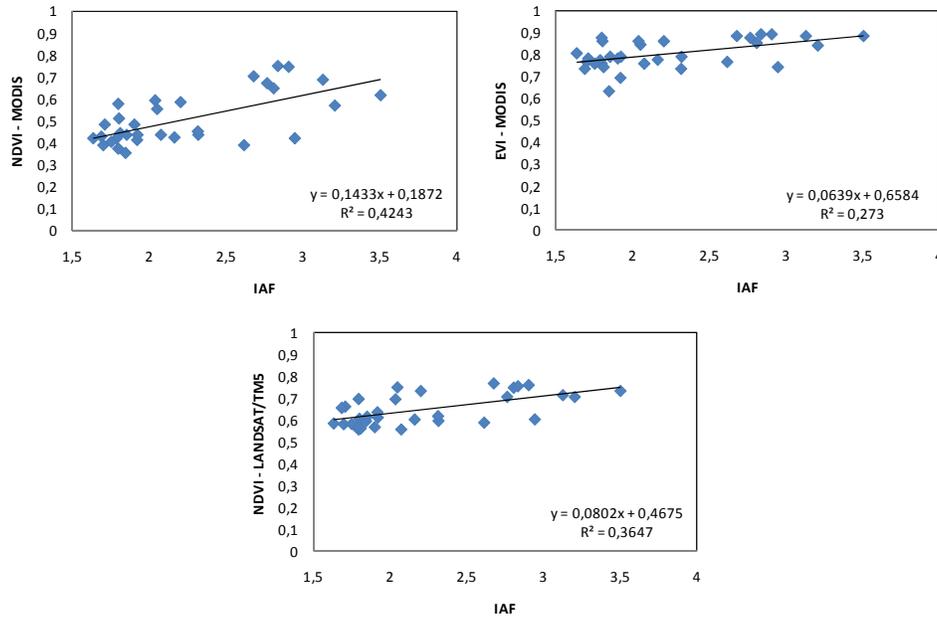


Figura 5. Diagrama de dispersão da relação IV's x IAF.

### 3. Conclusões

- As Fotografias Hemisféricas apresentaram como um método alternativo com boa estimativa do IAF;
- O IAF estimado apresentou correlação significativa com os IV's, sendo o NDVI do sensor MODIS o melhor correlacionado.

### 4. Referências

Anderson, L.O.; Latorre, M. L.; Shimabukuro, Y. E.; Arai, E.; Júnior, O. A. C. **SENSOR MODIS: UMA ABORDAGEM GERAL**. INPE. São José dos Campos, 2003

Aracruz Celulose. Disponível em: <[http://www.aracruz.com.br/show\\_prd.do?act=stcNews&menu=true&id=107&lastRoot=16&lang=1](http://www.aracruz.com.br/show_prd.do?act=stcNews&menu=true&id=107&lastRoot=16&lang=1)>. Acesso em: 08/11/2008.

Art, H. W. (ed) **Dicionário de ecologia e ciências ambientais**. Rio Claro: Ed. UNESP, Melhoramentos. 583p. 2001.

Chapelle, E.M.; Kim, M.S.; McMurtrey J.E. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): an algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll A, chlorophyll B, and carotenoids in soybean leaves. **Remote Sensing of Environment**, v. 39, n. 3, p. 239-247, 1992.

Chirici, G.; Barbat, A.; Maselli, F. Modelling of Italian forest net primary productivity by the integration of remotely sensed and GIS data. **Forest Ecology and Management**. 246 (2007) 285–295

Cohen, W.B.; Maieringer, T. K.; Yang, Z.; Gower, S.T.; Turner, D. P.; Ritts, W. D.; Berterretche, M.; Running, W. S.; Comparisons of land cover and LAI estimates derived from ETM+ and MODIS for four sites in North America: a quality assessment of 2000/2001 provisional MODIS products. **Remote Sensing of Environment** 88 (2003) 233–255

- Coops, N C. T.; Black, A.; Jassal, R. (Paul) S.; Trofymow J.A. (Tony); Morgenstern, K. Comparison of MODIS, eddy covariance determined and physiologically modelled gross primary production (GPP) in a Douglas-fir forest stand. **Remote Sensing of Environment** 107 (2007) 385–40.
- Gong, P.; Pu, R.; Biging, G. S.; Larrieu, M. R. Estimation of Forest Leaf Area Index Using Vegetation Indices derived from Hyperion Hyperspectral data Ieee Transactions on Geoscience. **Remote Sensing**, Vol. 41, No. 6, June 2003
- Guyot, G.; G, X. Effect of Radiometric Corrections on NDVI-Determined from SPOT-HRV and Landsat-TM Data. **Remote Sens. Environ.** 49:169-180 (1994)
- Justice, C. O. Et Al., The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 36, 1228–1249, 1998
- Lang, A. R. G.; Mcmurtrie, R. E. Total leaf areas of single trees of *Eucalyptus grandis* estimated from Macfarlane, C. ; Arndt, S. K.; Livesley, S. J.; Edgar, Donald, A. C. A.; Adams, M. A.; Eamus, D. Estimation of leaf area index in eucalypt forest with vertical foliage, using cover and fullframe fisheye photography. **Forest Ecology and Management** 242 (2007) 756–763
- Macfarlane, C.; Grigg, A.; Evangelista, C. Estimating forest leaf area using cover and fullframe fisheye photography: Thinking inside the circle. **Agricultural and Forest Meteorology** 146 (2007) 1–12
- Meng, Q.; Cieszewski, C.J.; Madden, M.; Borders, B. A linear mixed-effects model of biomass and volume of trees using Landsat ETM+ images. **Forest Ecology and Management** 244 (2007) 93–101
- Neto, A. J. S.; Ribeiro, A.; Zolnier, S.; Leite, F. P. Variabilidade sazonal da relação entre a radiação fotossinteticamente ativa e a radiação global na bacia do rio Doce, Estado de Minas Gerais. **Acta Sci. Agron. Maringá**, v. 28, n. 3, p. 427-431, July/Sept., 2006
- Neto, C. J.G.; Stape, J.L.; Hakamada, E.; Silva, S. R. Relationship between leaf area index and productivity in Eucalyptus plantations. **Anais.. International Conference on Process controlling Productivity in Tropical Plantations – IUFRO**, 2008.
- Nightingale, J.M; Hill, M.J.; Phinn, S.R.; Davies, I.D.; Held, A.A.; Erskine, P.D. Use of 3-PG and 3-PGS to simulate forest growth dynamics of Australian tropical rainforests I. Parameterisation and calibration for old-growth, regenerating and plantation forests. **Forest Ecology and Management**. 254 (2008) 107–121.
- Paiva, Y. G. ; Xavier, A.C. ; Silva, A. G. ; Pezzopane, J.E.M. . Relação entre índice de área foliar, índice de vegetação EVI e dados climatológicos, na floresta nacional de Pacotuba-E.S. In: XXXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2006, João Pessoa. Anais, 2006. v. 1. p. 1-5.
- Thenkabail, P.S.; Enclona, E.A.; Ashton, M.S. Legg, C.; Dieu, M. J. Hyperion, IKONOS, ALI, and ETM+ sensors in the study of African rainforests. **Remote Sensing of Environment** 90 (2004) 23–43 transmittances of the sun’s beam. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 58, p. 79-92, 1992.
- Vargas, L. A.; Andersen, M.N.; Jensen, C.R.; Jorgensen, U. Estimation of leaf area index, light interception and biomass accumulation of *Miscanthus sinensis* ‘Goliath’ from radiation measurements. **Biomass and Bioenergy**, n. 22, p.1–14. 2002
- Walter-Shea, E. A., Privette, J., Cornell, D., Mesarch, M. A., and Hays, C. J., Relations between directional spectral vegetation indices and leaf area and absorbed radiation in alfalfa, **Remote Sensing of Environment**, 61:162-177, 1997.
- Xavier, A. C.; Vettorazzi, C. A. Mapping leaf area index through spectral vegetation indices in a subtropical watershed. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 9, p. 1661-1672, 2004.