

Monitoramento da resposta fenológica através da utilização de imagens fração derivadas do sensor MODIS

Liana Oighenstein Anderson¹
Yosio Edemir Shimabukuro¹
Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão²
Dalton de Morrison Valeriano¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{liana,yosio,dalton}@dsr.inpe.br

²University of Oxford, School of Geography and the Environment
Mansfield Road Oxford OX1 3TB, United Kingdom
luiz.aragao@ouce.ox.ac.uk

Abstract. The distribution of the vegetation is largely related with abiotic factors, as climate, soil, relief and precipitation. The response of vegetation formations to the variance of these factors on time scale is called phenology. The study of phenology on regional and global scales is usually associated with satellite data, specific the vegetation index, as NDVI. This present work suggests the utilization of fraction images to study the phenological behavior of different vegetation formations. We used a time series of 2002 MODIS sensor data (vegetation index and the spectral bands), and the linear mixing model for this purpose. Our results showed that the fraction images are strongly related to the vegetation index images, and has the potentiality to detect and monitor the phenological response of the biomes studied.

Key Words: phenology, fraction images, MODIS sensor.

1. Introdução

A distribuição da vegetação e sua fenologia estão largamente associadas com os fatores climáticos, as características fisiográficas do terreno e as atividades humanas. Assim como muitos dos fenômenos ecológicos, estas se apresentam fortemente relacionadas a expressão dos genes e ao ambiente, e vem sendo estudada tanto em nível de organismos individuais, quanto em modelos de escalas regionais e globais (Chuine et al., 2000). O conhecimento da distribuição dos tipos de cobertura vegetal e suas variações fenológicas são hoje um aspecto indispensável para o planejamento de uma política coerente e eficiente de desenvolvimento sustentável, assim como para a compreensão e avaliação objetiva da convivência de diferentes ecossistemas, sejam naturais, semi-naturais, agrícolas ou industriais. A análise das variações fenológicas em nível regional e sua interligação com os diferentes componentes do meio geográfico (clima, solo, relevo, geologia, etc.) formam parte das informações necessárias para a compreensão do funcionamento dos ecossistemas em escala global.

Um melhor entendimento destas respostas é crucial para prever o funcionamento em longo prazo da dinâmica e da estabilidade de um ecossistema. Mudanças interanuais na temperatura e precipitação podem influenciar profundamente o status da fenologia, como o período de crescimento, a taxa de acumulação de biomassa e o período e taxa de senescência (Lee et al., 2002). A resposta dos ecossistemas a esta variabilidade é bastante grande, especialmente em áreas semi-áridas, onde a água é um fator limitante.

Em uma comunidade vegetal, tanto a fenologia, quanto à produtividade primária bruta são funções da disponibilidade espacial e temporal da água e da radiação, sendo que o monitoramento da produtividade primária em uma escala regional deve ter uma precisão bastante acurada das diferentes formações vegetais que compõe o ambiente. Garcia e Ustin (2001) discutem a existência de uma forte relação entre o padrão de precipitação e a produtividade primária de ecossistemas savânicos que, além disso, é dependente também da ecofisiologia das espécies e do micro-habitat.

Variações sazonais na precipitação, temperatura, energia incidente, comprimento do dia, cobertura de nuvem, e elevação do Sol têm mostrado influências nos padrões fenológicos dos diversos tipos de formações vegetais. Segundo Meinzer (1999) muitas florestas tropicais que passaram por um período prolongado da estação seca com pouca ou nenhuma chuva, apresentaram uma grande perda da primeira camada de solo. Foi sugerido que a competição por recursos limitados, como a água, pode ser minimizado, se houver um aumento na diversidade através do particionamento espacial e temporal dos recursos. Na sazonalidade de florestas tropicais, o principal mecanismo para retenção de água parece consistir de diferenças nos padrões de raízes, suas atividades e a fenologia das plantas.

Nos últimos anos, estudos relacionados à fenologia tiveram um aumento na importância devido ao contexto de mudanças climáticas. Estas mudanças podem alterar o início das fases fenológicas, como o período de crescimento da vegetação, e a distribuição de plantas e animais. Por outro lado, mudanças fenológicas da vegetação, como as mudanças na amplitude da distribuição de espécies, podem ser utilizadas como parâmetros para se entender as mudanças climáticas (Menzel et al., 2001).

Diversos estudos têm sido realizados com o objetivo de estabelecer a relação entre os padrões de precipitação e as diferentes formações vegetais, através da utilização de imagens de satélite, pois oferecem uma possibilidade para monitorar continuamente os processos dinâmicos da vegetação, suas mudanças e os impactos que isso pode implicar ao meio ambiente.

Os monitoramentos da vegetação em níveis globais, continentais e regionais, nas últimas décadas têm sido realizados com a utilização de dados fornecidos pelo sensor “Advanced Very High Resolution Radiometer” - AVHRR (Rodriguez Yi, 1998) com resolução espacial de 1 km no nadir, a bordo dos satélites da série NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Outro importante sensor para este tipo de pesquisa é o SPOT-VEGETATION, que vêm obtendo bons resultados (Carreiras et al., 2002).

Geralmente estes estudos utilizam-se de índices de vegetação, como o NDVI e o EVI. Alguns estudos têm utilizado o NDVI com o objetivo de avaliar a fenologia regional (Lu et al., 2003, Seen et al., 1995) e para desenvolver modelos fenológicos em escalas globais. Análises no padrão do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) para florestas temperadas (Spanner et al., 1990, Duchemin et al., 1999) e florestas boreais (Royer et al., 1996) têm mostrado grande consistência com a resposta da vegetação a sazonalidade.

Esta pesquisa propõe a utilização de imagens fração derivadas do modelo linear de mistura espectral para o estudo da fenologia de diferentes formações vegetais, a partir de uma série temporal de dados do sensor MODIS.

2. Área de estudo

A área de estudo proposta para a realização deste trabalho é o Estado do Mato Grosso, localizado na região Centro-oeste do Brasil, entre as coordenadas 06° 00' e 19° 45' de latitude sul e 50° 06' e

62° 45' de longitude oeste, com uma extensão territorial de cerca de 900.000 km² (**Figura 1**). Esta região apresenta uma grande diversidade de tipos de formações vegetais, além disso, nesta área vem ocorrendo uma alta taxa na conversão da cobertura vegetal, devido à utilização da agricultura mecanizada e pecuária nas áreas de cerrado, bem como o desmatamento e queimadas nas áreas de floresta.

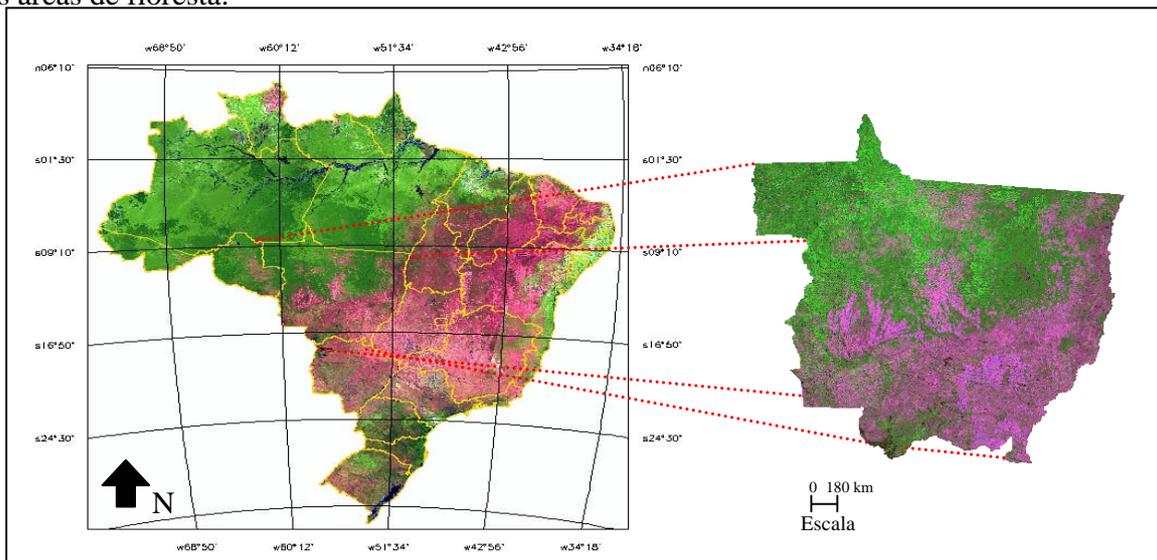


Figura 1- Localização geográfica da área de estudo.

3. Materiais e métodos

O banco de dados geográficos do Estado do Mato Grosso foi elaborado de forma a armazenar os dados relevantes para a realização do trabalho proposto nesta pesquisa. Para isso, foi utilizado o aplicativo SPRING 4.1 (Câmara et al., 1996).

Foram adquiridas 24 imagens quinzenais do sensor MODIS do produto índice de vegetação (MOD13). Estas imagens passaram por duas etapas de pré-processamento: utilização do aplicativo MRT (NASA/ESDIS, 2002) com o objetivo de reprojetar e converter para o formato geotiff; e utilização do programa Convgeotiff (Arai, 2002) com o objetivo de transformar a imagem para 8 bits. Em seguida as imagens foram importadas para o banco de dados.

Geraram-se mosaicos mensais, através da ferramenta de análise LEGAL (Linguagem Espacial de Geoprocessamento Algébrico) disponível no SPRING. O programa foi escrito de forma a selecionar os pixels, com base no valor mais alto do NDVI entre as datas, para a eliminação de nuvens. Esta etapa teve como objetivo reduzir o número de dados utilizados e tamanho do banco, com a finalidade de agilizar o tempo de processamento.

A partir dos mosaicos mensais, foi aplicado o modelo de mistura espectral para toda a série temporal, nas bandas do produto MOD13: azul, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio. Os modelos foram gerados independentemente, e partiu-se da hipótese que é possível encontrar um pixel puro ou *endmember* nas imagens MODIS, dada a diversidade e características da área estudada, para ser utilizado como dado de entrada para o modelo.

O modelo linear de mistura espectral visa estimar a proporção dos componentes, tais como solo, sombra e vegetação, para cada pixel, a partir da resposta espectral nas diversas bandas,

gerando imagens fração solo, vegetação e sombra (Shimabukuro e Smith, 1991). O modelo de mistura espectral pode ser escrito como:

$$r_i = a \cdot \text{veg}_i + b \cdot \text{solo}_i + c \cdot \text{sombra}_i + e_i \quad (\text{Equação 1})$$

Onde r_i é a resposta do pixel na banda i ; a , b e c são as proporções de vegetação, solo e sombra (ou água), respectivamente; veg_i , solo_i e sombra_i são as respostas espectrais das componentes vegetação, solo e sombra (ou água), respectivamente; e_i é o erro na banda i e i indica a banda a ser utilizada (Shimabukuro et al., 1997).

Para a etapa seguinte, partiu-se da hipótese que durante o período de seca ou de chuva analisado, os valores de reflectância encontrados para um pixel puro é o mesmo em todas as datas, e conseqüentemente, as mudanças ocorridas na resposta da vegetação são devido à influência da sazonalidade (Carreiras et al., 2003). Assim, foi selecionado dentre todos os modelos gerados, as respostas espectrais que mais se aproximaram da curva teórica da resposta de um pixel puro (resposta do solo, sombra e vegetação), de forma a gerar um modelo anual (**Figura 2**). Este modelo anual apresentou a curva de vegetação, derivada da imagem da estação chuvosa (mês de abril), enquanto que as curvas de sombra e solo foram derivadas de imagens da estação seca (meses de julho e agosto, respectivamente). Este modelo foi aplicado para toda a série temporal.

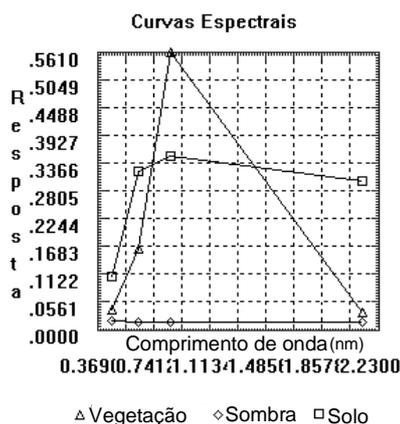


Figura 2- Curvas espectrais utilizadas para gerar as imagens fração da série temporal.

Além das imagens fração, utilizaram-se também as imagens índice de vegetação disponibilizadas no produto MOD13 (imagens NDVI e EVI), com o objetivo de avaliar a correlação entre os dados.

As áreas referentes às diferentes formações vegetais foram extraídas de um mapa de cobertura da terra no formato digital, gerado para o ano de 2002 a partir de dados multitemporais do sensor MODIS (Anderson, ined.). Este mapa foi importado para o banco de dados, onde foram discriminadas as seguintes fisionomias para a elaboração deste trabalho: Floresta O. Aberta, Formações Pioneiras, Savana Arbóreo Aberta, Savana Gramíneo-lenhosa, Savana Parque e áreas de cultura de soja. As definições das formações vegetais seguem as propostas no projeto RADAMBRASIL (1980).

O cruzamento dos dados das imagens fração e imagens índice de vegetação com o mapa de cobertura da terra foi realizado através da estatística da imagem por classes temáticas, resultando em uma tabela com os dados das imagens fração e índices de vegetação, para cada uma das classes de cobertura da terra, para todos os meses do ano de 2002. Esta tabela no formato Access

foi exportada para os aplicativos Excel e Statistica, onde foram gerados gráficos e realizados testes de correlação e significância a 5%. Analisou-se a relação das imagens fração com as imagens índice de vegetação.

4. Resultados e discussão

Os resultados da análise de correlação entre as imagens índice de vegetação e imagens fração solo, sombra e vegetação para a formação Floresta O. Aberta pode ser observado na **Tabela 1**.

	NDVI	EVI	SOMBRA	SOLO	VEGET
NDVI	1,00	0,09	0,20	-0,02	-0,20
EVI	0,09	1,00	-0,88	0,34	0,44

Tabela 1 – Resultado do teste de correlação para a formação Floresta O. Aberta. Os valores destacados em vermelho indicam correlação significativa a 5% ($p < 0,5$). O valor destacado em cinza indica a correlação mais alta entre as variáveis analisadas.

Na **Tabela 1** observou-se que a imagem fração sombra foi a única que apresentou correlação com uma imagem índice de vegetação, no caso EVI. Esse comportamento pode ser devido ao fato de que o dossel de florestas, por ser bastante irregular possui uma grande quantidade de sombras.

Na **Figura 3** observam-se os gráficos da resposta espectral dos índices de vegetação e imagens fração ao longo do ano de 2002, para a formação Floresta O. Aberta (**Figura 3a**) e o gráfico de correlação (**Figura 3b**) entre a imagem fração sombra e o EVI. É possível observar que durante o mês de setembro, existe uma elevação na resposta do índice EVI. Este comportamento também é evidente na curva da imagem fração sombra.

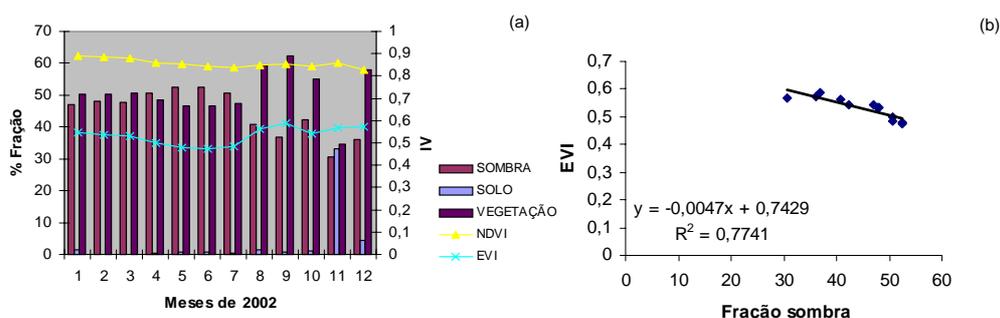


Figura 3- (a) Resposta espectral das imagens fração e índices de vegetação; (b) correlação entre EVI e imagem fração sombra para a formação Floresta O. Aberta, para o ano de 2002.

Os resultados da análise de correlação entre as imagens índice de vegetação e imagens fração solo, sombra e vegetação para a formação Savana Arbóreo Aberta, pode ser observado na **Tabela 2**.

	NDVI	EVI	SOMBRA	SOLO	VEGET
NDVI	1,00	0,84	0,09	-0,61	0,76
EVI	0,84	1,00	-0,45	-0,24	0,72

Tabela 2 – Resultado do teste de correlação para a formação Savana Arbóreo Aberta. Os valores destacados em vermelho indicam correlação significativa a 5% ($p < 0,5$). O valor destacado em cinza indica a correlação mais alta entre as variáveis analisadas.

Na Tabela 2 observou-se que para a formação Savana Arbóreo Aberta, tanto as imagens fração solo quanto vegetação possuem uma correlação significativa com as imagens NDVI e EVI, sendo que uma correlação mais alta para as imagem fração vegetação e NDVI.

Na **Figura 4** observam-se os gráficos da resposta espectral dos índices de vegetação e imagens fração ao longo do ano de 2002, para a formação Savana Arbóreo Aberta (**Figura 4a**) e o gráfico de correlação (**Figura 4b**) entre a imagem fração sombra e o NDVI. Nesta Figura é possível notar a semelhança entre o comportamento da imagem fração vegetação e os índices de vegetação. Para esta fisionomia vegetal, observa-se uma diminuição das respostas do índice de vegetação e imagem fração vegetação durante os meses da época seca, devido a forte sazonalidade presente neste bioma. É possível também observar o aumento da fração solo no período da seca, devido a perda de folhas neste ambiente.

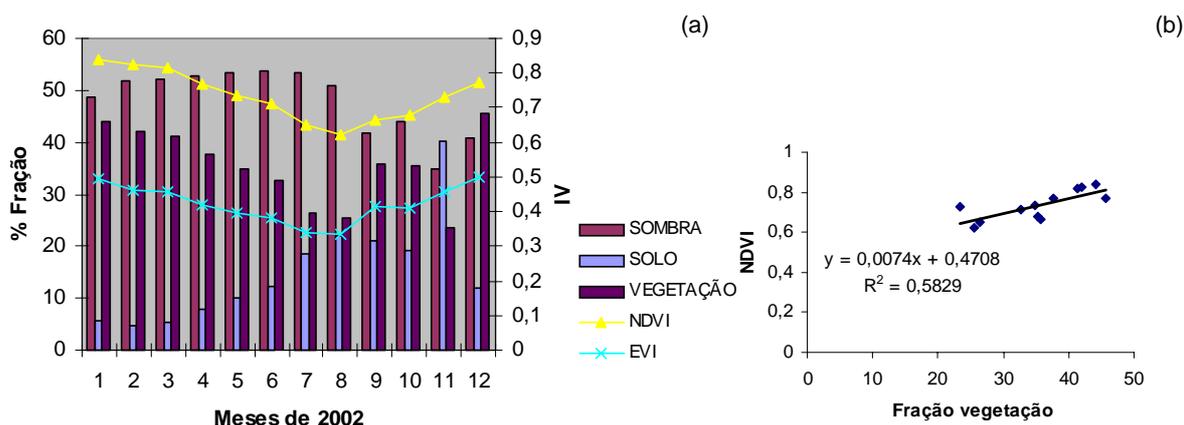


Figura 4- (a) Resposta espectral das imagens fração e índices de vegetação; (b) correlação entre NDVI e imagem fração vegetação para a formação Savana Arbóreo Aberta, para o ano de 2002.

Os resultados da análise de correlação entre as imagens índice de vegetação e imagens fração solo, sombra e vegetação para a formação Savana Parque podem ser observados na Tabela 3. Observa-se que apenas o NDVI apresentou correlação significativa com as imagens fração, sendo que a imagem fração solo foi a que apresentou correlação mais alta. Isto ocorre devido a este bioma ser formado em sua maior parte por campos de gramíneas, onde a resposta do solo é bastante alta. A correlação é negativa pois quanto maior a porcentagem de solo, conforme aproxima-se a estação seca, menor o valor do índice de vegetação.

	NDVI	EVI	SOMBRA	SOLO	VEGET
NDVI	1,00	0,43	0,59	-0,75	0,63
EVI	0,43	1,00	-0,44	0,03	0,56

Tabela 3 – Resultado do teste de correlação para a formação Savana Parque. Os valores destacados em vermelho indicam correlação significativa a 5% ($p < 0,5$). O valor destacado em cinza indica a correlação mais alta entre as variáveis analisadas.

Na **Figura 5** observam-se os gráficos da resposta espectral dos índices de vegetação e imagens fração ao longo do ano de 2002, para a formação Savana Parque (**Figura 5a**) e o gráfico de correlação (**Figura 5b**) entre a imagem fração solo e o NDVI.

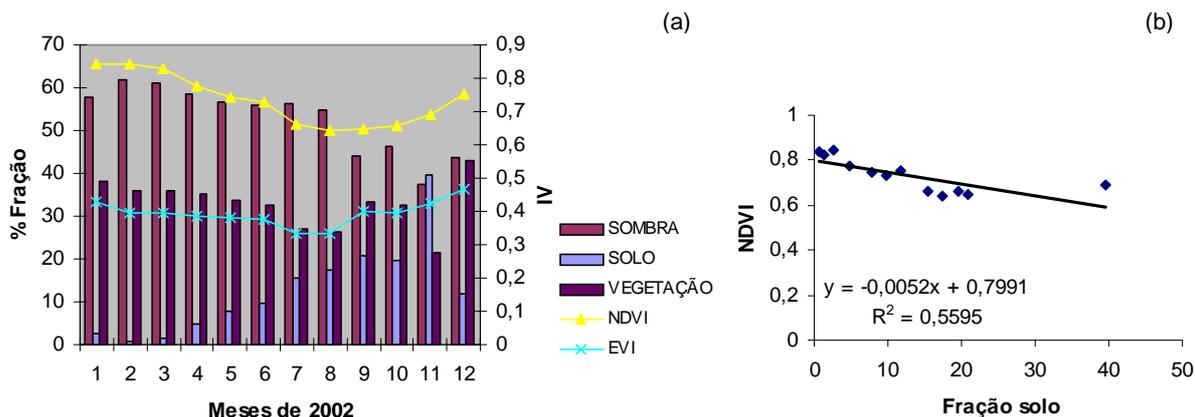


Figura 5- (a) Resposta espectral das imagens fração e índices de vegetação; (b) correlação entre NDVI e imagem fração solo para a formação Savana Parque, para o ano de 2002.

Na Figura 5 pode-se observar o que a fração solo apresenta-se com valores baixos no início e no final do ano, concordando com a estação chuvosa, na qual as gramíneas estão bastante vigorosas. Na estação seca (de junho a setembro) a resposta da fração solo aumenta enquanto a resposta do NDVI diminui.

5. Conclusões

Para a formação Floresta Ombrófila Aberta, observou-se que a imagem fração sombra é a que apresentou correlação mais alta com o índice de vegetação EVI. Isto pode ser devido ao fato de que o EVI foi desenvolvido para ser mais sensível a pequenas variações e não saturação para áreas de Floresta, diminuindo-se também a influência do solo na sua resposta.

A melhor correlação encontrada para a formação Savana Arbóreo Aberta, foi entre a imagem fração vegetação e o índice NDVI, sendo que a correlação com o índice EVI também foi significativa. A curva da resposta da imagem fração vegetação para esta formação foi a que se apresentou mais estável, e os seus valores oscilaram entre as curvas do EVI e NDVI.

A formação Savana Parque obteve a melhor correlação entre a imagem fração solo e o NDVI. Este resultado apresenta boa concordância com o comportamento sazonal deste bioma, que possui uma resposta rápida à precipitação.

Os resultados apresentados neste trabalho indicam a potencialidade da utilização das imagens fração, derivadas do modelo linear de mistura espectral, para o estudo da resposta fenológica de diferentes formações vegetais.

Agradecimentos

À Fundação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa de mestrado concedida à primeira autora. À FAPESP pelo financiamento do projeto (Proc. 2003/01727-0).

Referências bibliográficas

- Anderson, L.O.; Shimabukuro, Y.E.; Lima, A. & Medeiros, J.S. Mapeamento da cobertura da terra do Estado do Mato Grosso através da utilização de dados multitemporais do sensor MODIS. Submetido para a Revista Geografia, em agosto de 2004.
- Arai, E. (2002) comunicação pessoal.
- Câmara, G; Souza, R.C.M.; Freitas, U.M.; Garrido, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, May-June.1996.
- Carreiras, J.M.B.; Pereira, J.M.C.; Shimabukuro, Y.E.; Stroppiana, D. Evaluation of compositing algorithms over Brazilian Amazon using SPOT-4 VEGETATION data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 17, p. 43427-3440, 2003.
- Carreiras, J.M.B.; Shimabukuro, Y.E.; Pereira, J.M.C. Fraction images derived from SPOT-4 VEGETATION data to assess land-cover change over the State of Mato Grosso, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 23, p. 4979-4983, 2002.
- Chuine, I.; Cambon, G.; Comtois, P. Scaling phenology from the local to the regional level: advances from species-specific phenological models. **Global Change Biology**, 6: 934-952, 2000.
- Duchemin, B.; Guyon, D.; Lagouarde, J. P. Potential and limits of NOAA-AVHRR temporal composite data for phenology and water stress monitoring of temperate forest ecosystems. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n.5, p. 895-917, 1999.
- NASA Earth Science Data and Information Systems (NASA/ESDIS), 2002, versão 3.2.
- García, M.; Ustin, S. L. Detection of interannual vegetation responses to climatic variability using AVIRIS data in a coastal savanna in California. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, p.1480-1490, 2001.
- Lee, R.; Yu, F.; Price, K.P. Evaluating vegetation phenological patterns in Inner Mongolia using NDVI time-series analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 12, p. 2505-2512, 2002.
- Lu, H.; Raupach, M.R.; Mcvicar, T.M.; Barret, D.J. .Decomposition of vegetation cover into woody and herbaceous components using AVHRR NDVI time series. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, p. 1-18, 2003.
- Meinzer, F.C.; Andrade, J.L.; Goldstein, G.; Holbrook, N.M.; Cavelier, J.; Wright, S.J. Partitioning of soil water among canopy trees in a seasonally dry tropical forest. **Oecologia**, v.121, p. 293-301, 1999.
- Menzel, A.; Estrella, N.; Peter, F. Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. **Global Change Biology**, v.7, p.657-666, 2001.
- RADAMBRASIL Departamento Nacional de Produção Mineral **Folha SC. 21 - Juruena. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: DNPM, 1980. 456 p. (Levantamento dos Recursos Naturais, v.20).
- Rodriguez-Yi, J.L. **Mapeamento e Monitoramento da vegetação do estado do Mato Grosso através de imagens AVHRR-NOAA**. São José dos Campos. 135p. (INPE-6816-TDI/638). Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto - INPE, 1998.
- Royer, A.; Goïta, K.; Anseau, C.; Faizoun, A.; Saint, G. Analysis of boreal forest dynamics using the global vegetation index. **Remote Sensing Reviews**, v. 15, p. 265-282, 1996.
- Seen, D.L.; Mougín, E.; Rambal, S.; Gaston, A.; Hiernaux, P. (1995). Coupled with Multispectral Satellite Data II: Toward the control of its simulations by remotely sensed indices. **Remote Sensing of Environment**, 52:194-206.
- Shimabukuro, Y.E.; Mello, E.M.K.; Moreira, J.C.; Duarte, V. **Segmentação e classificação da imagem sombra do modelo de mistura para mapear desflorestamento na Amazônia**. São José dos Campos: INPE, 1997. 16 p. (INPE-6147-PUD/029).
- Shimabukuro, Y.E.; Smith, J.A. The least-square mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16-20, 1991.
- Spanner, M. A., Pierce, L. L., Running, S. W., and Peterson, D. L. The seasonality of AVHRR data of temperate coniferous forests: relationship with leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 33, p. 97-112, 1990.