

# ANÁLISE DA DINÂMICA SAZONAL DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DO SENSOR MODIS EM ALGUMAS FITOFISIONOMIAS DO BIOMA CERRADO

## SEASONAL VEGETATION INDICES DYNAMICS OF SELECTED BRAZILIAN SAVANNA PHYSIOGNOMIES OBTAINED WITH MODIS DATA

Veraldo Liesenberg 1 , Flávio Jorge Ponzoni 2 , Lênio Soares Galvão 2

1 Bolsista DTI-7F/CNPq; 2 Pesquisador Titular, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Av. dos Astronautas, 1758, 12.227-010 - São José dos Campos, SP, Brasil  
e-mail: vlberg@ltid.inpe.br; flavio@ltid.inpe.br; lenio@ltid.inpe.br

### RESUMO

Imagens geradas pelo sensor *MODerate Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo dos satélites TERRA e AQUA, foram usadas para investigar a dinâmica sazonal da vegetação de cerrado através dos índices *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Enhanced Vegetation Index* (EVI) calculados a partir do fator de reflectância bidirecional (FRB) de superfície, composição de 16 dias, e com 1-km de resolução espacial. Cinco fitofisionomias (*Floresta Estacional semi-decídua*, *Floresta Estacional decídua*, *Floresta Pluvial*, Savana Arborizada e Savana Parque) de uma área de estudo localizada na porção noroeste do Estado de Minas Gerais foram investigadas. Os resultados mostraram que as cinco fitofisionomias exibiram perfis pronunciados de NDVI e EVI com maiores e menores valores ocorrendo nas estações chuvosa (Novembro a Abril) e seca (Maio a Outubro), respectivamente. Os perfis foram concordantes com o padrão geral de precipitação. Índices de vegetação obtidos do MODIS/TERRA foram, em geral, levemente superiores aos obtidos pelo MODIS/AQUA, mas as diferenças não foram estatisticamente significativas. Finalmente, a máxima discriminação espectral entre as fitofisionomias ocorreu no final da estação seca para ambos os índices de vegetação. Entretanto, o NDVI mostrou um melhor desempenho discriminatório do que o EVI.

**Palavras-chave:** MODIS, NDVI, EVI, Cerrado e índices de vegetação.

### ABSTRACT

Images collected by the *MODerate Imaging Spectroradiometer* (MODIS) sensor, onboard the TERRA and AQUA platforms, were used to investigate the seasonal dynamics of savanna vegetation through the analysis of the *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) and *Enhanced Vegetation Index* (EVI) obtained with *Bidirectional Reflectance Factor* (BRF) 16-day composite data (Level 3 data), and with 1-km of spatial resolution. Five selected Brazilian savanna physiognomies (*Floresta Estacional semi-decídua*, *Floresta Estacional decídua*, *Floresta Pluvial*, *Cerrado stricto sensu* and *Cerrado Ralo*) in a study area located in the northwestern portion of Minas Gerais State were investigated. The results showed that vegetation indices (VI) profiles over the selected physiognomies exhibited a seasonal contrast with a pronounced dry season from May to October and a rainy growing season from November to April. VI profiles followed the general precipitation pattern. Vegetation indices obtained from MODIS/TERRA were slightly higher than those obtained from MODIS/AQUA, but the differences were not statistically significant. Finally, the maximum discrimination among the physiognomies under study occurred at the end of the dry season. However, NDVI showed better discrimination results than EVI.

**Key-words:** MODIS, NDVI, EVI, savanna and vegetation indices.

## INTRODUÇÃO

Diante da necessidade de monitorar continuamente a vegetação, novos sensores têm adquirido dados em diferentes resoluções espacial, espectral, temporal e radiométrica. Como exemplo, pode ser citado o sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) (JUSTICE et al., 1998) a bordo dos satélites TERRA e AQUA, lançados em 1999 e 2002, respectivamente.

O sensor MODIS fornece dados que são processados e distribuídos na forma de inúmeros produtos. Um destes produtos é o MOD13 que consiste de dois índices de vegetação: o *Normalized difference vegetation index* (NDVI) e o *Enhanced vegetation index* (EVI). Segundo HUETE et al. (2002), as composições de dados de 16 dias do sensor MODIS permitem análises regulares da vegetação em nível global, incluindo a avaliação de aspectos fenológicos e a detecção de mudanças.

Além destes dois índices de vegetação, o MOD13 disponibiliza dados em quatro bandas espectrais usadas para a geração destes índices, a saber: azul (459-479nm), vermelho (620-670nm), infravermelho próximo (841-876nm), e infravermelho médio (2105-2155nm); e ainda informações sobre a data de aquisição no intervalo de 16 dias, a geometria de aquisição correspondente a cada pixel selecionado e a qualidade dos dados. Os dados MOD13 utilizados neste trabalho correspondem a resolução espacial nominal de 1-km e já foram fornecidos com correção atmosférica.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a dinâmica da vegetação de cerrado através da análise dos índices NDVI e do EVI obtidos do produto MOD13 e plotados para cinco fitofisionomias do Cerrado de uma área de estudo localizada no noroeste do Estado de Minas Gerais.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Localização da área de estudo

A área de estudo está localizada no noroeste do Estado de Minas Gerais (MG) entre as coordenadas 14°27'S, 43°28'W (superior direito) e 15°48'S, 45°15'W (inferior esquerdo). Em relação à cobertura vegetal, há cinco fitofisionomias predominantes. De acordo com o sistema brasileiro de classificação da vegetação (IBGE, 1992), as fitofisionomias são Floresta Estacional semi-decídua (FESD), Floresta Estacional decídua (FED), Floresta Pluvial (FP), Savana Arborizada (AS) e Savana Parque (SP). Segundo o sistema de classificação do Cerrado proposto por RIBEIRO e WALTER (1998), as fitofisionomias SA e SP são equivalentes na área de estudo ao Cerrado *stricto sensu* e ao Cerrado ralo, respectivamente.

A deciduidade na estação seca varia de 20% a 50% para FESD, e é maior do que 50% para a FED. FP ocorre em áreas próximas ao rio São Francisco e abrange uma variedade de tipologias. SA e SP apresentam pequenas palmeiras, arbustos retorcidos e inclinados sobre um substrato de gramíneas. Entretanto, a SA mostra um estrato arbóreo dominante e um maior percentual de cobertura de copas do que SP. O clima é caracterizado por uma estação chuvosa bem definida, ocorrendo entre Novembro a Abril, e por uma estação seca ocorrendo de Maio a Outubro. Em geral, a média anual de precipitação é de 925mm, e um percentual superior a 85% de precipitação concentra-se na estação chuvosa.

### Aquisição de dados do sensor MODIS

Um conjunto de dados referentes a 23 datas, coletado pelos sensores MODIS/TERRA e MODIS/AQUA no ano de 2004, foi utilizado. Os dados correspondem especificamente ao produto MOD13A2 que inclui dois índices de vegetação com 1-km de resolução espacial, quatro bandas espectrais radiometricamente calibradas, geo-retificadas e espacialmente co-registradas entre si. Todos os dados dos sensores MODIS foram fornecidos pelo *Land Processes* (LP) da *NASA Distributed Active Archive Center* (DAAC) e ordenados através do *EOS Data Gateway*.

O algoritmo usado para gerar o produto MOD13 opera com uma base de pixels e requer múltiplas observações (16 dias) para gerar os dois índices de vegetação supra mencionados. Em função da

sobreposição espacial promovida pelo largo campo de imageamento, múltiplas observações podem ser obtidas de um determinado pixel no mesmo dia. Em teoria, segundo HUETE et al. (1999), um total de 64 observações pode ser obtido sobre o período de 16 dias, dependendo evidentemente da latitude considerada.

Uma vez que todos os dados do período de 16 dias são coletados, o algoritmo aplica um filtro nos dados baseado na qualidade em função da presença de aerossóis, cobertura de nuvens e geometria de visada. Pixels contaminados e advindos de visadas extremas (off-nadir) são considerados apenas em condição de extrema falta de dados, mas são classificados nesse caso como sendo de baixa qualidade. Um pixel de alta qualidade é aquele livre de nuvens ou contaminação atmosférica e adquirido com visada próxima ao nadir.

Índices de vegetação gerados no produto MOD13 incluem o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e o *Enhanced Vegetation Index* (EVI). Segundo HUETE et al. (2002), ambos os índices de vegetação são designados para monitorar padrões temporais e espaciais da atividade fotossintética em uma consistente base global. De acordo com esses autores, o NDVI é usado para permitir significativas comparações de variações sazonais, interanuais e de longo prazo da estrutura da vegetação, fenologia e parâmetros biofísicos. O NDVI pode ser obtido pela equação:

$$NDVI = \left( \frac{\rho_{(IVP)} - \rho_{(Vermelho)}}{\rho_{(IVP)} + \rho_{(Vermelho)}} \right) \quad [\text{adimensional}] \quad \text{Eq. 2.1}$$

onde:

- $NDVI$  = *Normalized Difference Vegetation Index*;
- $\rho_{(Vermelho)}$  = Fator de reflectância bidirecional na banda do vermelho; e
- $\rho_{(IVP)}$  = Fator de reflectância bidirecional na banda do IVP.

Por outro lado, o EVI foi desenvolvido para otimizar a resposta da vegetação melhorando a sensibilidade para as variações estruturais e arquitetônicas do dossel de fitofisionomias com maior densidade de biomassa em relação ao NDVI e reduzindo as influências atmosféricas e do solo (HUETE et al., 2002). O EVI pode ser obtido da equação:

$$EVI = \left( \frac{\rho_{(IVP)} - \rho_{(Vermelho)}}{\rho_{(IVP)} + C_1 \rho_{(Vermelho)} - C_2 \rho_{(Azul)} + L} (G) \right) \quad [\text{adimensional}] \quad \text{Eq. 3.2}$$

onde:

- $EVI$  = *Enhanced Vegetation Index*;
- $\rho_{(Azul)}$  = Fator de reflectância bidirecional na banda do azul;
- $\rho_{(Vermelho)}$  = Fator de reflectância bidirecional na banda do vermelho;
- $\rho_{(IVP)}$  = Fator de reflectância bidirecional na banda do IVP;
- $C_1$  e  $C_2$  = Coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera para as bandas do vermelho e azul, respectivamente;
- $L$  = Fator de ajuste para o solo;
- $G$  = Fator de ganho.

Segundo HUETE et al. (1994) e HUETE et al. (1997) os coeficientes para os sensores MODIS são  $L=1$ ,  $C_1=6$ ,  $C_2=7.5$  e  $G=2.5$ .

### Seleção e Análise de dados

A primeira etapa consistiu na seleção de pixels em áreas homogêneas e representativas das cinco fitofisionomias mencionadas anteriormente. Esta seleção foi baseada na análise comparativa de mapas prévios de vegetação (e.g., IBGE, 2004) e de campanhas de campo para a caracterização e para a seleção de áreas potenciais e representativas de cada fitofisionomia em análise.

Após a definição das áreas representativas de cada fitofisionomia, um conjunto de 10 pixels foi selecionado para cada classe, e estes foram usados para a extração de espectros (10 pixels, 5 fitofisionomias, totalizando

50 espectros) em cada data, índice e sensor. Estes índices (NDVI e EVI) foram plotados em função da data juliana de aquisição com seus respectivos desvios padrões. Considerando que as imagens são constituídas por pixels registrados em diferentes datas e condições angulares de iluminação e de visada com alguma diferença, essas variações também foram avaliadas para cada fisionomia.

Para avaliar a significância das dinâmicas dos perfis espectro temporais nas bandas disponíveis no MOD13, como bem do NDVI e do EVI, os dados foram submetidos aos seguintes testes estatísticos: teste de normalidade de *Kolmogorov-Smirnoff*, igualdade entre as variâncias através da análise de resíduo e o teste *t* de *Student*. O teste *t* de *Student* foi empregado para verificar se as diferenças encontradas nas bandas espectrais, bem como nos índices de vegetação de ambos os sensores (TERRA e AQUA) foram significativamente diferentes. Assim, pôde-se avaliar se a caracterização espectral de uma dada fisionomia foi afetada pela adoção de dados de um ou outro sensor. Finalmente, a última etapa da análise deste trabalho foi a inspeção da distância espectral Euclidiana entre pares de fitofisionomias usando os índices de vegetação NDVI e EVI. A distância Euclidiana pode ser obtida da equação:

$$DE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad [\text{adimensional}] \quad \text{Eq. 3.3}$$

onde:

- $DE$  = Distância Euclideana;
- $x_i$  = valor do índice de vegetação para a classe  $x$  no pixel  $i$  (enumeração completa);
- $y_i$  = valor do índice de vegetação para a classe  $y$  no pixel  $i$  (procedimento amostral); e
- $n$  = número de variáveis.

A Distância Euclidiana é uma das medidas de dissimilaridade bastante utilizada no sensoriamento remoto. No presente trabalho adaptou-se a Distância Euclideana para avaliar a discriminação de diferentes pares de fitofisionomias. Desta maneira, Distâncias Euclideanas foram calculadas entre os resultados obtidos para cada procedimento de amostragem e a enumeração completa. Logo, quanto menor a Distância Euclideana, menor o potencial de discriminação entre o par de fitofisionomias analisado.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ângulos solares zenitais dos pixels utilizados neste estudo estiveram compreendidos em sua maioria no intervalo de 20° a 45°, com valores máximos ocorrendo na estação seca e decrescendo em direção a estação chuvosa. As maiores variações angulares foram verificadas no período chuvoso, provavelmente associadas a variabilidade de datas para a composição de 16 dias em função dos maiores índices de cobertura de nuvens. Essa dinâmica é importante uma vez que a análise de índices de vegetação como o NDVI ou EVI, para cada fitofisionomia deve levá-la em consideração devido às propriedades não isotrópicas da cobertura vegetal (GOEL, 1988; KUMAR, 1972; PONZONI, 2001).

Os perfis dos índices de vegetação (NDVI e EVI) exibiram uma dinâmica associada à variação sazonal ou ao regime de precipitação pluviométrica. Os maiores e os menores valores de ambos os índices foram observados nas estações chuvosa (Novembro a Abril) e seca (Maio a Outubro), respectivamente. Em geral, imagens adquiridas durante a estação chuvosa mostraram maiores desvios padrões em relação à estação seca. Nesse sentido observou-se que os índices de vegetação mostraram sensibilidade à variação fenológica da vegetação decorrente, muito provavelmente, à mudança nos regimes de chuva no período de aproximadamente um mês.

Do mês de Novembro para o mês de Abril (estação chuvosa), incrementos nos índices de vegetação foram verificados para todas as fitofisionomias, sendo relativamente maiores para a FED e para a FESD. Do mês de Abril para o início de Outubro (estação seca), a precipitação decresceu abruptamente produzindo decréscimo nos valores dos índices de vegetação em graus variados de acordo com a fitofisionomia analisada.

Apesar das diferenças encontradas entre os ângulos solares zenital, os índices de vegetação obtidos pelo MODIS a bordo da plataforma TERRA foram sensivelmente maiores do que os obtidos por este sensor na plataforma AQUA. A distribuição dos dados pelo teste de *Kolmogorov-Smirnoff* mostrou normalidade dos

dados e a análise de resíduo igualdade entre as variâncias. A aplicação do teste *t* de *Student* a um nível de significância de  $p < 0,05$  mostrou com uma maior frequência similaridades entre os índices de vegetação calculados a partir de ambos sensores. Em uma menor frequência, as diferenças estatísticas foram encontradas somente durante a estação chuvosa.

Por outro lado, embora as mudanças do ângulo solar zenital e do ângulo de visada tenham acarretado diferenças significativas dos índices de vegetação em uma menor frequência, a mesma tendência não foi observada para as quatro bandas espectrais. Para as fitofisionomias em análise, nas diferentes datas e entre sensores, as diferenças foram estatisticamente significantes em uma maior frequência. Em outras palavras, baseado nas análises estatísticas realizadas, as variações da geometria de aquisição, representada pelos ângulos zenitais solar e de visada, não foram o principais fatores envolvidos nas variações temporais do NDVI e do EVI. Estes resultados corroboram com os estudos desenvolvidos por FERREIRA e HUETE (2004). Entretanto, quando se pretende caracterizar espectralmente formações vegetais, as diferenças na geometria de aquisição devem ser consideradas.

Da estação chuvosa para a seca, um incremento na reflectância do vermelho e um decréscimo na resposta do infravermelho médio foram observados para a maioria das fitofisionomias, especialmente para a FED em função da maior severidade da deciduidade apresentada por esta fisionomia. Segundo RATANA et al. (2005), o máximo verdor tende a ser menor para formações herbáceas do que para fitofisionomias de estrato arbóreo devido ao fluxo mais acelerado de crescimento que ocorre com as espécies arbóreas. De fato, após verificada a normalidade dos dados e a igualdade entre as variâncias, a aplicação do teste *t* de *Student* (nível de significância  $p < 0,05$ ) para a banda do vermelho entre os dias Julianos 289 e 305 (aonde um pico pronunciado na reflectância foi observado) somente foi significativa para FP ( $t = 2,628$ ,  $p = 0,017$ ) e FED ( $t = 8,197$ ,  $p = 0,000$ ). Para o dia Juliano 321, o teste foi significativo para a fitofisionomia FESD ( $t = 2,750$ ,  $p = 0,013$ ). Entretanto, as fitofisionomias SP e SA somente apresentaram significância nos dias Julianos 337 ( $t = 6,792$ ,  $p = 0,000$ ) e 001 ( $t = -2,468$ ,  $p = 0,024$ ), respectivamente.

A discriminação espectral das fitofisionomias, expressa através da distância Euclideana para cada período de 16 dias usando dados do NDVI e EVI, melhorou da estação chuvosa para a estação seca, aonde uma máxima discriminação entre as fitofisionomias foi observada. Esses resultados corroboram com os prévios trabalhos desenvolvidos por FERREIRA e HUETE (2004), RATANA et al. (2005) e SANO et al. (2005), que concluíram que no final da estação seca, a discriminação entre as fitofisionomias do bioma Cerrado é maximizada. Embora o EVI tenha sido desenvolvido para otimizar a resposta da vegetação em relação ao NDVI, os resultados indicam que o NDVI mostrou melhor discriminação do que o EVI.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, as seguintes considerações podem ser feitas:

- (1) As cinco fitofisionomias em análise mostraram perfis de índices de vegetação representativos das dinâmicas sazonais da vegetação, com maiores valores ocorrendo na estação chuvosa (Novembro a Abril) e menores na estação seca (Maio a Outubro), conforme preconizado na literatura;
- (2) Os perfis dos índices de vegetação mostraram um padrão dependente da precipitação, aonde o máximo verdor foi menor para formações herbáceas do que para fitofisionomias de estrato arbóreo;
- (3) Imagens adquiridas durante a estação chuvosa apresentaram maiores desvios padrões nos índices de vegetação devido a aquisições em ângulos extremos de visada durante o período de 16 dias;
- (4) Os índices de vegetação obtidos pelo sensor MODIS/TERRA foram ligeiramente maiores do que os obtidos pelo sensor MODIS/AQUA, mas as diferenças não foram estatisticamente significantes;
- (5) O uso da distância Euclidiana mostrou que a discriminação entre fitofisionomias melhorou da estação chuvosa para a seca. Os resultados de discriminação obtidos com o NDVI foram superiores aos obtidos com o EVI.

## AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento do trabalho. Agradecimentos também são endereçados ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) pela autorização dos estudos em campo, à Agência Nacional de Águas (ANA) pela disponibilização dos dados pluviométricos, e a NASA *Distributed Active Archive Center* (DAAC) pelo fornecimento dos dados MODIS.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FERREIRA, L.G.; HUETE, A.R. Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spectral vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, v. 25, n. 10, p. 1837-1860, 2004.
- GOEL, N.S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews*, v. 4, p. 1-21, 1998.
- HUETE, A.R. et al. Development of vegetation and soil indices for MODIS EOS. *Remote Sensing of Environment*, v. 49, n. 3, p. 224-234, 1994.
- HUETE, A.R. et al. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images. *Remote Sensing of Environment*, v. 59, n. 3, p. 440-451, 1997.
- HUETE, A.R. et al. MODIS vegetation Index (MOD13) Algorithm Theoretical Basis Document. MODIS web. v. 3, p. 1-142, 1999. Disponível em: <[modis-land.gsfc.nasa.gov/pdfs/atbd\\_mod13.pdf](http://modis-land.gsfc.nasa.gov/pdfs/atbd_mod13.pdf)>. Acesso em: 7 junho, 2006.
- HUETE, A.R. et al. 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.
- IBGE. *Manual técnico da vegetação do Brasil*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 1992.
- IBGE. *Mapa de vegetação do Brasil*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2004.
- JUSTICE, C.O. et al. The Moderate Resolution Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 36, n. 4, p. 1228-1249, 1998.
- KUMAR, R. *Radiation from plants-reflection and emission: a review*. Lafayette: Purdue Research Foundation, (Research Project, n.5543), p. 1-88, 1972.
- PONZONI, F.J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P.R.; MADEIRA NETTO, J.S., *Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais*. Brasília: EMBRAPA, 2001, p. 157-202.
- RATANA, P. et al. Analysis of Cerrado physiognomies and conversion in the MODIS seasonal-temporal domain. *Earth Interactions*, v. 9, n. 3, p. 1-22, 2005.
- RIBEIRO, J.F.; WALTER, B.M.T. *Fitofisionomias do bioma Cerrado*. In: SANO, S.M.; ALMEIDA, S.P., *Cerrado: ambiente e flora*. Brasília: EMBRAPA, 1998. p. 89-152.
- SANO, E.E. et al. Synthetic Aperture Radar (L-band) and optical vegetation indices for discriminating the Brazilian savanna physiognomies: a comparative analysis. *Earth Interactions*, v. 9, n. 15, p. 1-15, 2005.