

SÉRIE TEMPORAL DE IMAGENS EVI/MODIS PARA DISCRIMINAÇÃO DE FORMAÇÕES VEGETAIS DO PANTANAL

*Daniel de Castro VICTORIA¹
Ricardo Guimarães ANDRADE²
Adriano Rolim da PAZ³*

Resumo

Séries temporais de imagens EVI do sensor MODIS foram utilizadas para discriminar diferentes tipos de vegetação dentro do bioma Pantanal. A classificação se baseia na variação temporal do índice de vegetação, que acompanha os estágios fenológicos da vegetação, discriminando formações com ciclos distintos. Foi utilizada análise harmônica de Fourier para obter as amplitudes das séries temporais de EVI nas diferentes dimensões de frequência. Em seguida, aplicou-se uma classificação não supervisionada nas imagens de amplitude. A metodologia distinguiu áreas permanentemente inundadas de locais onde a variação anual do EVI é maior, separando áreas de cerrado com vegetação mais densa (cerrado florestado e florestas) de áreas com vegetação menos densa. Áreas com cultura anual, que apresentam grande variação do índice de vegetação ao longo do ano, foram facilmente detectadas.

Palavras-chave: Índice de vegetação. Série temporal. MODIS. Fourier. Pantanal.

Abstract

MODIS EVI time series for discriminating vegetation cover in the Pantanal region

A time series of EVI images from MODIS sensor was used to identify different vegetation types in the Pantanal biome. The classification is based on the temporal variation of the vegetation index that represents the phenological stages of the vegetation, discriminating the vegetation formations with distinct cycles. A Fourier harmonic analysis was used to obtain the EVI amplitudes at different frequency scales. Following an unsupervised classification algorithm was applied in the amplitude images. The methodology distinguished permanent flooded areas from regions where EVI variation is higher, separating savanna areas with dense vegetation (forested savanna and forests) from areas with less dense vegetation. Areas with annual crop, that present high EVI variation along the year, were easily detected.

Key words: Vegetation Index. Time series. MODIS. Fourier. Pantanal.

¹ Pesquisador Embrapa Monitoramento por Satélite – CNPM. Av. Soldado Passarinho, 303, Fazenda Chapadão CEP 13070-115 – Campinas, SP. E-mail: daniel@cnpm.embrapa.br

² Pesquisador Embrapa Monitoramento por Satélite – CNPM. Av. Soldado Passarinho, 303, Fazenda Chapadão CEP 13070-115 – Campinas, SP. E-mail: ricardo@cnpm.embrapa.br

³ Pesquisador Embrapa Monitoramento por Satélite – CNPM. Av. Soldado Passarinho, 303, Fazenda Chapadão CEP 13070-115 – Campinas, SP. E-mail: adriano@cnpm.embrapa.br

INTRODUÇÃO

A alta resolução temporal dos dados do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), aliada à elevada qualidade radiométrica e geométrica das imagens e à disponibilidade dos dados na forma de produtos já processados, com correção atmosférica e muitas vezes com remoção de nuvens por meio das composições temporais, faz deste uma fonte de dados apropriada para estudos de séries temporais de imagens. Nesse campo, destacam-se os trabalhos que utilizam as séries temporais de índices de vegetação para identificação de culturas (JAKUBAUSKAS et al., 2002), tipos de formação florestal (YU et al., 2004), detecção de mudanças na cobertura (LACRUZ et al., 2005) e como forma de mensurar a intensificação da produção agrícola (BROWN et al., 2007).

A utilização das séries temporais dos índices de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*) se baseia no fato que diferentes coberturas apresentam, além de diferentes respostas espectrais, padrões temporais distintos. Dessa forma, a variação dos índices de vegetação ao longo do tempo pode ser utilizada na identificação dos tipos de usos e coberturas do solo.

Diversas metodologias são empregadas para o estudo das séries temporais dos índices de vegetação, incluindo filtragem da série e ajuste de equações polinomiais (JÖNSSON; EKLUNDH, 2002) e aplicações de transformadas wavelet (BRUCE; MATHUR, 2006) e Fourier (JAKUBAUSKAS et al., 2002).

A transformação de Fourier converte um sinal observado no tempo para um sinal no espaço de frequências, a partir de um somatório de ondas. É possível, assim, avaliar as variações de um sinal temporal nas diferentes frequências. No caso de séries temporais com um ano de duração, as variações anuais podem ser separadas das semestrais e assim por diante.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a utilização das séries temporais do índice de vegetação EVI para discriminação das diferentes formações vegetais do bioma Pantanal, com ênfase na região do lobo aluvial do rio Taquari, utilizando análise harmônica de Fourier.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram adquiridas imagens compostas de 16 dias para o ano de 2001 do índice de vegetação EVI do sensor orbital MODIS, com 250 m de resolução espacial, produto MOD13Q1. A área de interesse (lat: 15°S a 20°S; lon: 54°W a 60°W) foi recortada de cada uma das imagens EVI do "tile" que recobre o bioma Pantanal (h12v11), as quais foram em seguida empilhadas. O resultado final foi um conjunto com 23 bandas, onde cada banda representa o índice de vegetação de 16 dias do ano de 2001 (b1: 1/jan a 16/jan; b2: 17/jan a 1/fev ... b23: 19/dez a 31/dez), na qual a análise harmônica de Fourier foi aplicada.

A análise harmônica de Fourier permite que uma sequência temporal seja reproduzida pelo somatório de um termo aditivo e de ondas, definidos por pares de valores de amplitude e fase. Yu et al. (2004) aplicaram a análise harmônica e apresentaram imagens do termo aditivo, amplitude e ângulo de fase para cada termo, em uma abordagem semelhante a utilizada neste trabalho. A transformada discreta de Fourier é dada por (1):

$$F(u) = \frac{1}{T} \sum_{k=0}^{T-1} f(x) e^{-j \frac{2\pi}{T} k} \quad (1)$$

onde $f(x)$ é uma série de valores amostrais; T é o número de observações na série temporal; k é um índice que representa a observação atual e j é um número imaginário. Os termos real e imaginário são transformados nos valores de amplitude e fase a partir das equações (2) e (3):

$$F_{\text{amplitude}} = \left(F_{\text{real}}^2 + F_{\text{imaginário}}^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$F_{\text{fase}} = \text{atan} \left(F_{\text{imaginário}} / F_{\text{real}} \right) \quad (3)$$

O primeiro componente harmônico da análise de Fourier representa a variação do sinal para o período correspondente ao intervalo de tempo de toda a série temporal (T). A segunda e terceira componentes representam a variação da série no período $T/2$ e $T/3$, respectivamente. Componentes de ordem mais elevada, representando frequências menores, também podem ser obtidas. No entanto, utilizando apenas as primeiras componentes, já é possível descrever o padrão temporal de um sinal anual com razoável aproximação (LACRUZ; SANTOS, 2007). Além disso, a utilização apenas das primeiras componentes harmônicas atua como um filtro na série temporal, reduzindo possíveis ruídos causados por cobertura de nuvens e outros problemas.

A análise harmônica das imagens foi efetuada utilizando uma rotina computacional desenvolvida na linguagem Python (www.python.org), uma linguagem aberta, de fácil aprendizado e com extensa biblioteca para análises científicas, o que permite o rápido desenvolvimento de programas computacionais. Esta rotina foi utilizada para extrair as imagens de amplitude dos primeiros três componentes harmônicos da série temporal mais o termo aditivo. O termo aditivo representa o EVI médio anual, enquanto que os componentes 1 e 2 representam as oscilações anuais e semestrais do índice de vegetação. O terceiro componente representa a amplitude trimestral, não sendo muito útil para fins de classificação de uso e cobertura neste caso, uma vez que ciclos vegetativos completos com duração de 3 meses não são comuns em coberturas vegetais. A utilização de séries temporais mais longas (2 anos ou mais) fará com que o terceiro componente da análise harmônica represente outras frequências, podendo então ser utilizado para estudos de classificação de uso e cobertura.

Foi efetuada uma classificação não supervisionada nas imagens, utilizando o método ISOCLUSTER (RICHARDS E JIA, 1999), conforme implementado pelo Sistema de Informações Geográficas ArcGIS 9.2. Este método foi aplicada às imagens de amplitude e do termo aditivo, gerando um mapa com 10 classes. Estas foram agrupadas em cinco classes: 1) áreas permanentemente inundadas, com baixo EVI durante o ano e sem variação anual; 2) áreas com cerrado menos denso, com valor máximo de EVI de 0,4 e variação anual moderada; 3) áreas com cerrado mais denso, com valores máximos de EVI de 0,4 a 0,5 e variação anual moderada; 4) áreas com vegetação mais vigorosa, com EVI máximo próximo de 0,6 a 0,7; 5) áreas de agricultura, com forte variação do EVI durante o ano.

A imagem classificada foi comparada visualmente com imagens do mosaico GeoCover de 2000 (MDA Federal, 2004), compostas por cenas do sensor ETM+ dos satélites Landsat e com o mapa de uso e cobertura do solo do bioma pantanal do projeto PROBIO (EMBRAPA, 2004), a fim de identificar as classes separadas pelo processo de classificação não supervisionada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As séries temporais de EVI apresentam comportamento distinto para diferentes coberturas da áreas de estudo (Figura 1). Em áreas com floresta ou cerrado florestado, a vegetação se mantém verde durante o ano, com pequena variação anual. Esta característica é identificada na análise harmônica pela imagem do termo aditivo, que representa o EVI médio do período (Figura 2a). Nesta imagem também são facilmente identificadas as áreas

com baixo valor de EVI durante todo o ano, como corpos d'água e locais com vegetação inundada. A pequena variação anual do EVI nestas duas áreas (florestas e corpos d'água) também faz com que as imagens de amplitude do primeiro e segundo componentes da análise harmônica sejam baixos (Figura 2b e c, respectivamente).

Coberturas com elevada variação anual do EVI são identificadas pela amplitude do primeiro componente da análise harmônica. Áreas com culturas anuais, onde o EVI varia de 0,7 nos meses de Janeiro e Fevereiro para menos de 0,2 em Junho e Julho (Figura 1) se destacam na imagem de amplitude do primeiro componente (Figura 2b). Também são identificadas outras áreas com variação do EVI as quais podem estar relacionadas às florestas ou cerrados, que apresentam variações nos índices de vegetação devido à sazonalidade da precipitação.

A amplitude do segundo componente representa a variação semestral do EVI (Figura 2c). Nesta imagem também se destacam as áreas com culturas anuais. Isto porque o ciclo anual de EVI destas áreas é concentrado em apenas um semestre, de Janeiro a Julho (Figura 1). Este ciclo concentrado é traduzido pela análise harmônica de dois sinais distintos, um com frequência anual e outro semestral. Desta forma, áreas de agricultura aparecem nos dois primeiros componentes. Victoria et al. (2009) mostraram que ciclos mais bem distribuídos ao longo do ano, como as culturas de cana de açúcar no estado de São Paulo, apresentam forte sinal anual (primeira componente) e sinal fraco semestral (segunda componente). Este também é o caso para as áreas com cerrado, que devido a oscilação anual do EVI (Figura 1), apresentam sinal mais elevado na primeira componente do que na segunda (Figura 2b e c, respectivamente). No entanto, devido à escala de cores aplicada na Figura 2, não é possível identificar visualmente que a amplitude anual no cerrado é inferior à semestral. A componente semestral também pode ser utilizada na identificação de áreas agrícolas com duas culturas anuais, como áreas irrigadas (VICTORIA et al., 2009) ou de intensificação agrícola (BROWN et al., 2007).

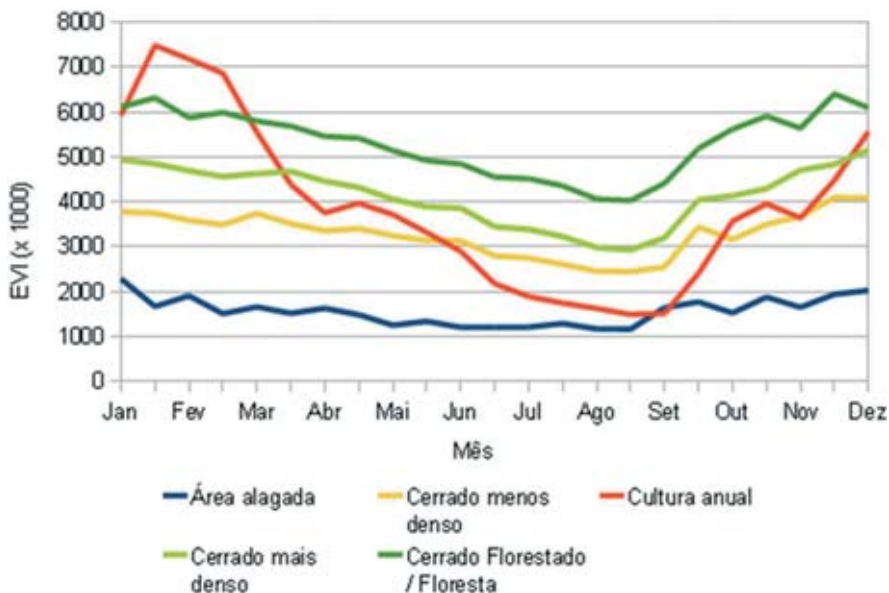


Figura 1 - Série temporal de EVI, no ano de 2001, em diferentes coberturas na área de estudo

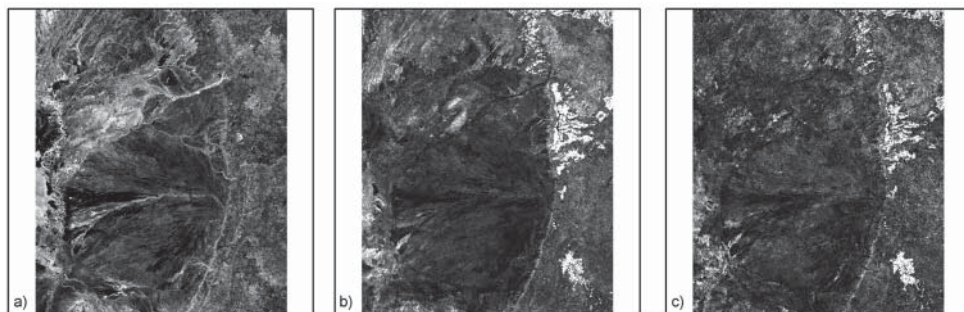


Figura 2 - a) EVI médio anual (termo aditivo) e amplitude b) anual e c) semestral do índice de vegetação para a região do lobo aluvial do bioma Pantanal, ano de 2001

A figura 3 apresenta a composta colorida das imagens obtidas da análise harmônica (R: amplitude da 1ª componente; G: termo aditivo; B: amplitude da 2ª componente). Mais uma vez, as áreas de agricultura são facilmente identificadas (cores em tom magenta). Também podem ser identificadas as áreas com florestas e matas de galeria onde a vegetação se mantém sempre verde (elevado EVI) ao longo do ano. Alguma distinção pode ser feita entre os tipos de cerrado com vegetação mais ou menos densa dentro do bioma Pantanal. As formações com maior presença de árvores aparecem no lobo aluvial com cores verde-escuro azulados. Já as áreas com vegetação menos densa apresentam cores escuras. Também é possível identificar as áreas com forte influência da inundação ou de corpos d'água, que na imagem composta aparecem em coloração preta.

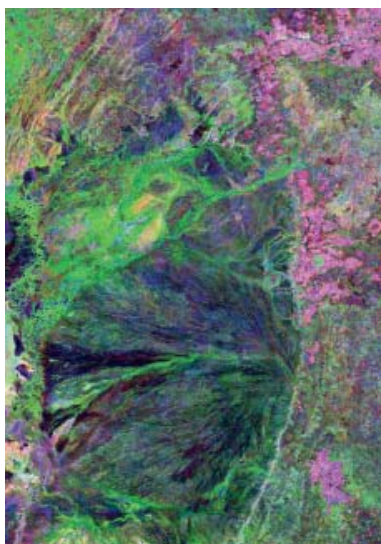


Figura 3 - Composta colorida utilizando as imagens de amplitude e termo aditivo da série temporal de EVI para o ano de 2001 (R: amplitude anual, G: termo aditivo, B: amplitude semestral; áreas permanentemente vegetadas aparecem com coloração verde; locais com agricultura se destacam na coloração magenta; áreas permanentemente inundadas apresentam tons escuros)

As imagens do termo aditivo mais as amplitudes das três primeiras componentes foram utilizadas para realizar uma classificação não supervisionada com 10 classes. Estas foram reagrupadas em 5 classes (Figura 4), representando as seguintes áreas:

- Corpos d'água ou vegetação com influência fluvial, permanentemente inundada (azul)
- Cerrado menos denso e pastagens, com EVI máximo de 0,4 (amarelo)
- Cerrado mais fechado com presença de árvores, EVI máximo de 0,5 (verde claro)
- Agricultura (vermelho)
- Floresta ou cerrado florestado, com EVI máximo de 0,7 (verde escuro)

A comparação visual entre a imagem classificada e o mosaico GeoCover, composto por imagens Landsat, mostrou boa concordância, quando observado na escala 1:250.000, compatível com as imagens MODIS (Figura 4 – detalhes).

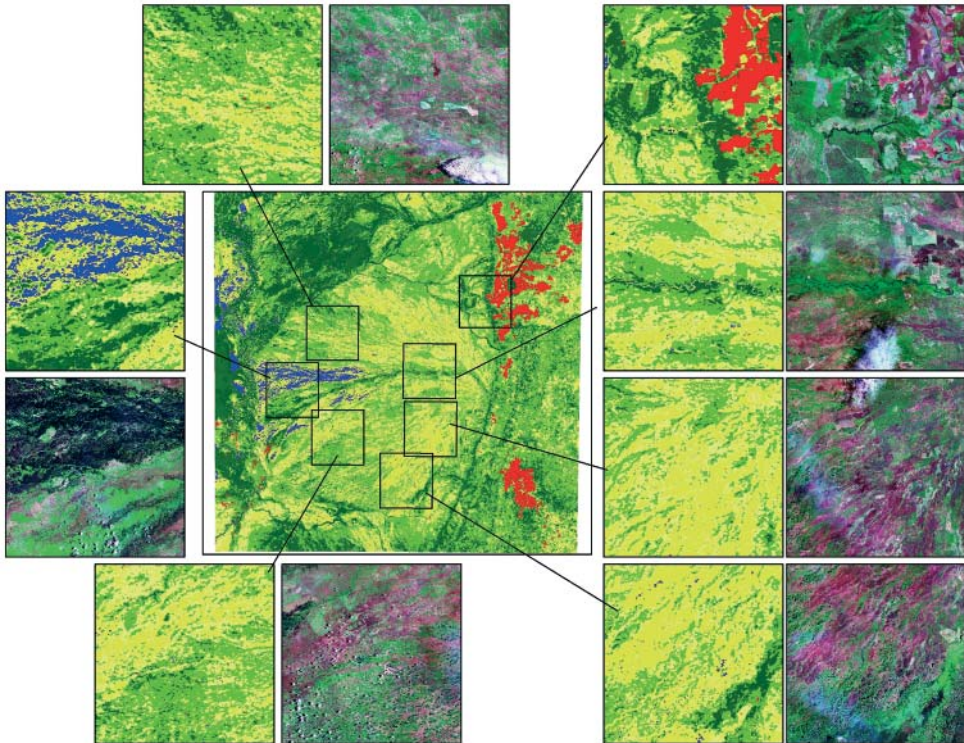


Figura 4 - Classificação não supervisionada em 5 classes para o lobo aluvial do Pantanal (imagem central) e detalhes comparando a classificação com imagens do satélite Landsat (na imagem classificada: azul representa áreas permanentemente inundadas, amarelo é área de cerrado com provável predomínio de pastagens, verde claro é área de cerrado com vegetação arbórea, vermelho é área de agricultura, verde escuro representa os cerrados florestados e florestas)

Foi também efetuada uma comparação entre a classificação obtida pela série temporal e o mapa de uso e cobertura do bioma Pantanal do projeto PROBIO. Devido ao elevado número de classes na legenda do PROBIO, estas foram agrupadas em: 1) Corpos d'água ou vegetação com influência fluvial; 2) cerrado gramíneo-lenhoso ou pastagem; 3) cerrado arborizado e 4) cerrado florestado ou floresta. As classes compostas por associações de dois tipos de cerrado foram classificadas pela primeira classe na associação, ou seja, a classe cerrado florestado + gramíneo-lenhoso foi classificada como cerrado florestado e a classe cerrado gramíneo-lenhoso + florestado foi identificada como cerrado gramíneo-lenhoso. As classes de ecótonos não foram consideradas, por representarem misturas de duas coberturas vegetais. Também não foi considerada a classe de agricultura, uma vez que esta não ocorre no interior do lobo aluvial do Pantanal.

Duzentos e dez pontos aleatórios foram amostrados nas duas classificações, gerando a matriz de confusão e coeficiente kappa (Tabela 1). O baixo valor de kappa (0,22) e os elevados erros de omissão e comissão indicam que a classificação não foi adequada para separar a cobertura do solo em quatro classes distintas. A grande dificuldade está no fato do cerrado apresentar diferentes classes que formam um contínuo de vegetação, com áreas menos densas (campo, campo limpo), passando por áreas arborizadas até áreas florestadas (cerradão). Essas transições entre as diferentes formações de cerrado são difíceis de identificar apenas com as séries temporais de EVI. Além disso, a escala de classificação do mapa de referência, PROBIO, é muito mais detalhada do que é possível de se obter com as imagens MODIS, com resolução espacial de 250 m, que invariavelmente pode resultar na mistura de classes dentro de um mesmo pixel.

Tabela 1 - Matriz de confusão entre as classes da classificação não supervisionada e a referência do PROBIO. Os diferentes tipos de cerrado apresentam um gradiente de densidades (cerrado gramíneo, arbóreo e florestado) o que dificulta a separação das classes. Isso explica os elevados erros de omissão e comissão e o baixo valor de kappa. Juntando as classes de cerrado arbóreo (2) e gramíneo (3), índice kappa aumenta para 0,51

Referências	Classes				total	erro de omissão
	1	2	3	4		
1	6	5	4	3	18	0,67
2	0	35	36	6	77	0,55
3	0	35	33	5	73	0,55
4	0	3	15	24	42	0,43
total	6	78	88	38	210	
erro de comissão	0	0,55	0,63	0,37		
					<i>exatidão total</i>	<i>0,47</i>
					kappa	0,22

Agrupando-se as duas classes intermediárias, 2) cerrado gramíneo-lenhoso e 3) cerrado arborizado, a classificação se mostra mais adequada (Tabela 2), com coeficiente kappa = 0,51. Como esperado, a união das classes com maiores erros aumentou o coeficiente kappa, mostrando que a separação das diferentes fisionomias do cerrado não é facilmente obtida apenas com a série temporal de EVI. Além disso, a incompatibilidade de escalas entre

a classificação obtida com as imagens MODIS e o mapa de referência do PROBIO dificulta essa comparação. Portanto, as classes do mapeamento efetuado pelo PROBIO tiveram que ser agrupadas em escala compatível com as imagens MODIS, para então se realizar a verificação da classificação, conforme efetuado na tabela 2.

Tabela 2 - Matriz de confusão entre as classes da classificação não supervisionada e a referência do PROBIO. As classes com maior dificuldade de separação, cerrado gramíneo e cerrado arbóreo, foram agrupadas, uma vez que a escala da classificação de referência com 4 classes distintas não é compatível com a escala das imagens MODIS

Referências	Classes			total	erro de omissão
	1	2 + 3	4		
1	6	9	3	18	0,67
2 + 3	0	139	11	150	0,07
4	0	18	24	42	0,43
total	6	166	38	210	
erro de comissão	0	0,16	0,37		
				<i>exatidão total</i>	<i>0,80</i>
				kappa	0,51

Apesar de não discriminar as diferentes classes de cerrado de forma satisfatória, a série temporal de EVI se mostrou útil na detecção de áreas com culturas anuais, devido às elevadas amplitudes anual e semestral do índice de vegetação desta cobertura. Desta forma, as análises de Fourier permitem identificar as áreas com culturas anuais de forma simples, sem detalhar quais as culturas implantadas.

CONCLUSÕES

Os produtos do sensor MODIS, em especial os índices de vegetação, são de grande valia para estudos que utilizam séries temporais de imagens de sensores remotos. A análise de Fourier se mostrou adequada para extração de parâmetros de sazonalidade das imagens. No entanto, esses parâmetros não foram suficientes para discriminar de forma satisfatória as diferentes formações de cerrado, principalmente o cerrado gramíneo-lenhoso e o cerrado arborizado.

A incompatibilidade de escalas entre as imagens MODIS e a classificação realizada pelo PROBIO dificulta a comparação entre os mapas de cobertura vegetal. É necessário agrupar as classes de cobertura do PROBIO para fazer comparações entre os dois produtos.

A técnica utilizada se mostrou adequada para a delimitação de áreas com culturas anuais, as quais foram facilmente identificadas. Por sua relativa praticidade de implementação e baixo custo computacional, a análise de Fourier poderia ser utilizada como primeira avaliação no processo de classificação de imagens, diferenciando as grandes classes, em particular na identificação das áreas agrícolas. Outros métodos poderiam ser aplicados posteriormente para estabelecer sub-divisões das grandes classes, como a utilização de métricas de fenologia, obtidas a partir da série temporal, classificações baseadas em árvores de decisões ou redes neurais artificiais.

REFERÊNCIAS

BROWN, J. et al. Multitemporal, Moderate-Spatial-Resolution Remote Sensing of Modern Agricultural Production and Land Modification in the Brazilian Amazon. **GIScience & Remote Sensing**, Birmingham, EUA, v. 44, n. 2, p. 117-148, June 1, 2007.

BRUCE, L. M.; MATHUR, A. Denoising and wavelet-based feature extraction of MODIS multi-temporal vegetation signatures. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ANALYSIS OF MULTI-TEMPORAL REMOTE SENSING IMAGES, Biloxi, USA, 16 a 18 de maio de 2005. **International ...**. Piscataway, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.. 2005. p. 95-98.

EMBRAPA. **Levantamento e mapeamento dos remanescentes da cobertura vegetal do bioma Pantanal, período de 2002 na escala de 1:250.000**. Embrapa Informática Agropecuária:Campinas,SP, agosto de 2004, 43p.

JAKUBAUSKAS, M. E.; LEGATES, D. R.; KASTENS, J. H. Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data. **Computers and Electronics in Agriculture**. Maryland Heights, USA, v. 37, p. 127-139, 2002

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. Ann Arbor, USA, v. 40, n. 8, p. 1824-1832, 2002.

LACRUZ, M. P.; SANTOS, J. R.; CONFORTE, J. C. Utilização de séries temporais de imagens MODIS/TERRA e análise harmônica para o monitoramento de corredores ecológicos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 12, 16-21 abr. 2005. Goiania. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 3223-3228. CD-ROM, Online. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2005/02.12.16.31/doc/capa.htm>> <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2005/02.12.16.31/doc/capa.htm>>. Acesso em: 6 nov 2008.

LACRUZ, M. P.; SANTOS, J. R. Monitoramento da paisagem de unidades de conservação. In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Org.). **O sensor MODIS e suas aplicações no Brasil**. São José dos Campos: Editora Parêntese, 2007. cap. 13, p.173-183.

MDA Federal, **Landsat GeoCover ETM+ 2000 Edition** Mosaics, ver. 1.0, USGS, Sioux Falls, South Dakota, 2004.

PYTHON. Disponível em: <<http://www.python.org>>. Acesso em: 10 fev. 2009

RICHARDS, J. A.; JIA, X. **Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction**. Nova Iorque: Springer-Verlag New York, Inc., 1999. 363 p.

VICTORIA, D. C.; OLIVEIRA, A. F.; GREGO, C. R. Análise harmônica de séries temporais de imagens NDVI/MODIS para discriminação de coberturas vegetais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 1589-1596. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.13.16.38>>. Acesso em: 28 jul. 2009.

YU, X.; ZHUANG, D.; CHEN, H.; HOU, X. Forest classification based on MODIS time series and vegetation phenology. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, Anchorage, USA, 20 a 24 de setembro 2004. IGARSS '04. **Proceedings....** . Ann Arbor, USA: IEEE. Set 2004. vol.4, pp. 2369-2372.

