

AVALIAÇÃO DOS CLASSIFICADORES ESPECTRAIS DE MÍNIMA DISTÂNCIA EUCLIDIANA E SPECTRAL CORRELATION MAPPER EM SÉRIES TEMPORAIS NDVI-MODIS NO CAMPO DE INSTRUÇÃO MILITAR DE FORMOSA (GO)

Evaluation of Spectral Classifiers of Minimum Euclidean Distance and Spectral Correlation Mapper in NDVI-MODIS Time-Series at the Formosa Military Field (GO)

Osmar Abílio de Carvalho Junior¹
Antonio Felipe Couto Junior¹
Nilton Correia da Silva²
Éder de Souza Martins³
Ana Paula Ferreira Carvalho⁴
Roberto Arnaldo Trancoso Gomes¹

¹**Universidade de Brasília – UNB**
Departamento de Geografia
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF
osmarjr@unb.br, robertogomes@unb.br, antoniofelipejr@gmail.com

²**Centro Universitário de Anápolis**
Sistemas de Informação
Avenida Universitária km 3,5, Cidade Universitária, Anápolis, GO
Nilton@unievangelica.edu.br

³**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA**
Embrapa Cerrados
Rodovia Brasília-Fortaleza, km 18, Planaltina, DF
Eder@cpac.embrapa.br

⁴**Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária – INCRA**
Diretoria de Obtenção de Terra e Implantação de Assentamentos
SBN Quadra 1, Bloco D, Edifício Palácio do Desenvolvimento, sala 1620, 70057-900, Brasília, DF
anapaula@incra.gov.br

RESUMO

A savana é o principal tipo de vegetação no Brasil Central, cobrindo aproximadamente 23% do território nacional. Esta é formada por um mosaico de fisionomias com ciclos fenológicos típicos. Neste contexto, os dados do sensor MODIS fornecem medidas quase diárias que permitem monitorar a fenologia sazonal da vegetação. O presente trabalho objetivou avaliar o emprego de assinaturas temporais para detectar tipos de fisionomias de Savanas no Campo de Instrução Militar de Formosa. A metodologia adotada pode ser subdividida nos seguintes passos: (a) elaboração do cubo temporal das imagens NDVI- MODIS, (b) tratamento do ruído pela combinação de dois métodos: o filtro móvel de mediana e a Transformação pela Fração Mínima de Ruído (MNF), (c) classificação utilizando *Spectral Correlation Mapper* (SCM) e Mínima Distância Euclidiana. Os resultados demonstram que as fisionomias do Cerrado apresentam assinaturas temporais características: 1) Campestre, com predomínio do estrato herbáceo; 2) Cerrado Sentido Restrito, uma mistura de arbustos e árvores; e 3) Florestal, cobertura arbórea. O Cerrado Sentido Restrito foi subdividido em Cerrado Ralo e Típico, conforme a densidade de árvores. A Mata de Galeria apresentou os maiores valores de NDVI e as menores variações entre as estações, devido, principalmente, à maior proximidade com os cursos d'água. As formações campestres apresentaram os menores valores de NDVI e as maiores variações interestacionais. Além disso,

pode ser observada uma maior frequência e intensidade de fogo sobre esta camada. Os procedimentos metodológicos foram eficientes na remoção do ruído nas séries temporais de NDVI-MODIS, tornando-as úteis na diferenciação dos tipos de vegetação. Ambos os métodos de classificação espectral separaram as áreas de lago, área desmatada e Mata de Galeria. No entanto, divergências nas classificações estão presentes para as áreas de Cerrado e Campo. Devido às características dos espectros temporais, o método de Mínima Distância Euclidiana permitiu uma melhor diferenciação das unidades vegetais, enquanto o SCM ressaltou feições relativas aos eventos de queimadas. A eficiência da metodologia tem sido aprovada para delimitação regional das fisionomias de savana, mesmo considerando a baixa resolução espacial do sensor MODIS, e conseqüentemente com alta mistura espectral

Palavras chaves: Cerrado, MODIS, NDVI, detecção de mudança, análise multitemporal.

ABSTRACT

The Savanna is the main vegetation in Central Brazil, covering approximately 23% of the national territory. It is formed by a mosaic of different physiognomies that have a typical phenology. In this context, the MODIS data provide daily measurements well suited to monitor the seasonal phenology of vegetation. The present work aims to evaluate the advantages of the temporal signatures to detect Brazilian Savanna vegetation types in the Formosa Military Field. The methodology may be divided into the following steps: (a) elaboration of the temporal cube of NDVI from temporal MODIS images; (b) noise elimination from the combination of two methods moving median filter and Minimum Noise Fraction (MNF) transformation, and (c) classification using the Spectral Correlation Mapper (SCM) and Minimum Euclidean Distance. The results demonstrate that savanna physiognomies present typical temporal signatures: (a) Grassland, with predominance of herbaceous; (b) Savanna *Sensu Stricto*, shrubs formation; and (c) Forest, covered by trees. Savanna *Sensu Stricto* was subdivided in the sparse and typical Savanna, based on the trees cover density. The forest formation showed highest NDVI values and the lowest variation between seasons, due to its association with the water. On the other hand, the grassland showed lowest NDVI values and the highest variation, and higher frequency and intensity of fire should be observed in this layer. The methodology was efficient in the noise removal in the NDVI time-series, becoming useful in differentiating the amount of vegetation types. Both spectral classifications separated the areas of the lake, cleared area, and gallery forests. However, differences in scores are present in areas of savannas and grassland. Due to temporal spectra characteristics, the Minimum Euclidean Distance method allowed better differentiation of the physiognomies, while the SCM highlighted the features on the fire events. The methodology efficiency has been proved for regional delimitation of savanna physiognomies even considering the low spatial resolution MODIS sensor, and consequently high spectral mixture.

Keywords: Cerrado, MODIS, NDVI, changing detection, multitemporal analysis.

1. INTRODUÇÃO

No estudo de ecossistemas torna-se fundamental o mapeamento e o monitoramento da superfície terrestre avaliando os diferentes aspectos humanos e naturais. Neste propósito, devem-se realizar estudos considerando as diferentes escalas da paisagem (espaciais e temporais), que permitam compreender os processos e as relações dos agentes transformadores. Com esse objetivo o sensoriamento remoto torna-se uma das tecnologias mais rápida e eficiente para realizar medições contínuas dos ecossistemas em diferentes escalas, proporcionando a compreensão dos diferentes processos ecológicos, hidrológicos e antrópicos. Dentre as técnicas de processamento digital de imagens os procedimentos de detecção de mudança são os mais utilizados para a realização do monitoramento (Coppin et al., 2004).

Com o advento de sensores com alta resolução temporal aumentam os estudos com dados temporais contínuos da superfície terrestre. Estes concebem uma nova abordagem com relação às técnicas de sensoriamento remoto para o uso ecológico distinguindo-se, em certos aspectos, das técnicas

praticadas anteriormente. Com o aprimoramento da obtenção de espectros temporais é possível melhor descrever a evolução e a variação sazonal dos fenômenos (Kang et al., 2003; Sakamoto et al., 2005; Zhang et al., 2003;).

A grande maioria dos trabalhos que estudam a vegetação constrói as assinaturas temporais a partir do índice NDVI (DeFries & Townshend, 1994; DeFries et al., 1995; Prince 1991 a, b; Running, 1995; Tucker et al., 1991; Wessels et al., 2004). Recentemente, vários estudos utilizam séries temporais contínuas com o sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (Hansen et al., 2000, 2002, 2003; Huete et al., 2002; Latorre et al. 2007). Assim, o desenvolvimento do processamento digital de imagens considerando as assinaturas temporais estabelece uma mudança epistemológica requerendo desenvolvimento de novas técnicas de processamento.

O presente trabalho possui como objetivo identificar as fisionomias de Cerrado a partir da classificação de séries temporais NDVI-MODIS, entre os anos 2000 e 2007, na região do Campo de Instrução Militar de Formosa. Esta localidade possui pouco uso antrópico e extensas áreas de Cerrado preservadas.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área estudo é o Campo de Instrução Militar de Formosa com dimensão aproximada de 115.014 hectares. Situado no município de Formosa (GO) possui como confrontantes o Estado de Minas Gerais, ao sul, e o Distrito Federal, à oeste. A área apresenta-se limitada

por dois rios, na parte oeste pelo rio Preto e na parte leste pelo rio Bezerra. (Figura 1).

O clima da região é tropical (Aw Köppen), com precipitação média variando entre 1100 e 1600 mm, com duas estações bem definidas: um verão chuvoso entre Outubro e Abril, e um inverno seco entre os meses de Maio e Setembro (Eiten, 1972).

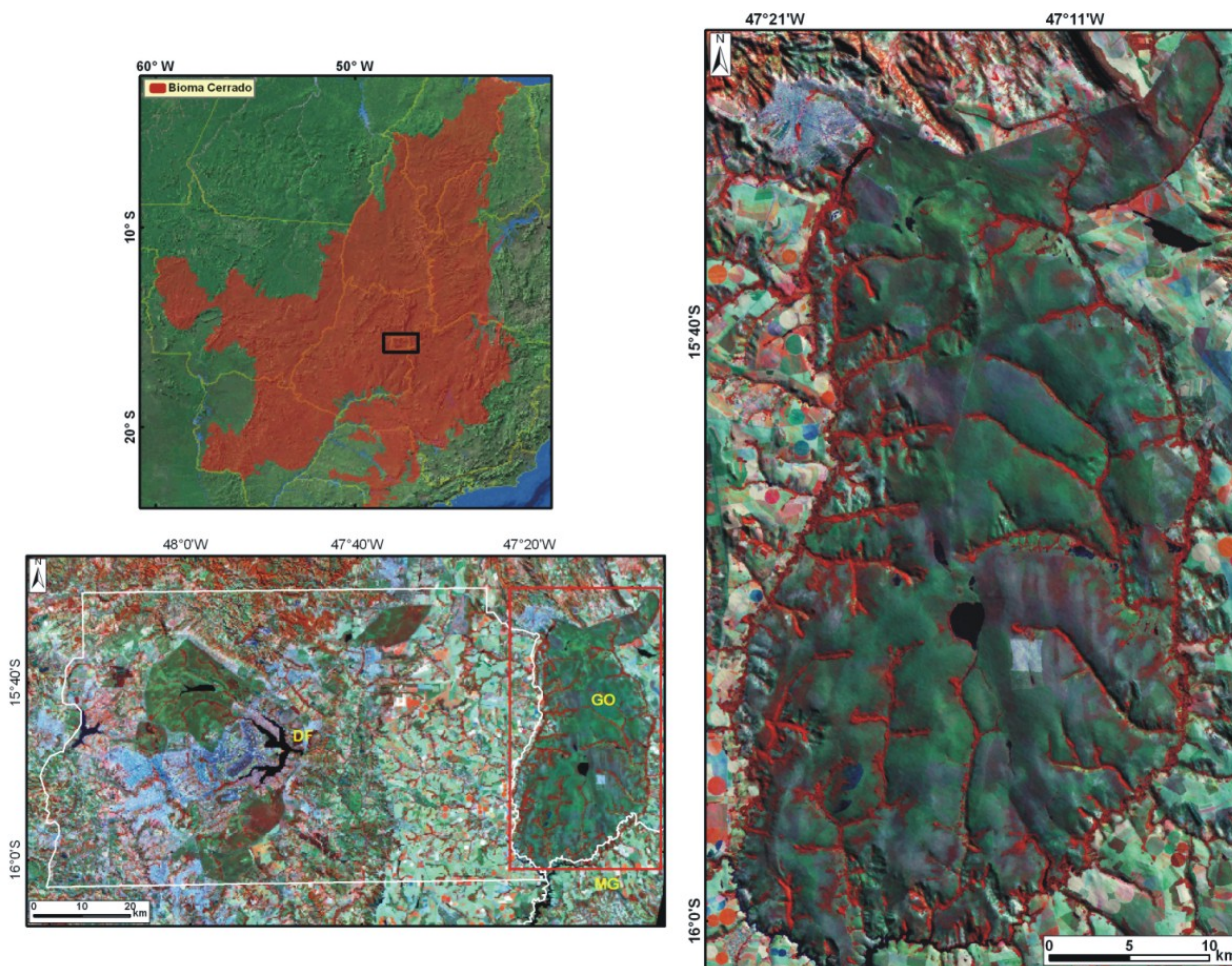


Fig. 1 – Localização da área de estudo.

No contexto geológico a área pertence ao Grupo Bambuí (Dardenne, 1978), sendo representada por metassiltitos, metassiltitos argilosos, metargilitos e raras intercalações de arcósios no topo. Esse grupo ocorre na porção oriental do Distrito Federal, aflorando em drenagens e em raros cortes de estradas.

O Campo de Formosa apresenta uma extensa área de Cerrados preservados contendo formações savânicas, campestres e florestais. Na área estão presentes a Mata de Galeria (formação florestal), o Cerrado Sentido Restrito (formação savânica) e o Campo Limpo e Campo Sujo (formações campestres). Estudo prévio utilizando sensoriamento remoto no Campo de Formosa foi realizado por Carvalho Júnior et al. (2005) a partir de imagens ASTER para individualizar os tipos de vegetação.

Durante o período seco é comum a ocorrência

de fogo, sendo considerado um dos fatores ambientais de mudança do Cerrado (Mistry, 1998). As queimadas são recorrentes nestas áreas há pelo menos 32.000 anos (Salgado-Labouriau 1997). Estes eventos de queima desempenham uma grande influencia na estrutura do ecossistema e ciclagem de nutrientes (Kauffman, 1994).

Desta forma, diversas espécies do Cerrado demonstram estratégias adaptativas ao fogo como: (a) suberização do tronco e dos galhos que estabelece um isolamento térmico (Coutinho, 1990; Guedes, 1993); (b) proteção de gemas apicais de algumas espécies por meio de catáfilos (Coutinho, 1990); (c) frutos que proporcionam uma proteção física as sementes (Landim & Hay, 1995; Cirne, 2002); (d) padrões fenológicos que minimizam efeitos do fogo como a dispersão de sementes após a queimada (Coutinho, 1977; Oliveira 1998) ou a produção de sementes que podem ser

enterradas ficando protegidas do fogo pelo isolamento térmico do solo (Dias et al., 1996; Hoffmann, 1998); e (e) elevada capacidade de rebrota das espécies lenhosas (Coutinho, 1990; Medeiros, 2002).

A sucessão de eventos de fogo altera a densidade de indivíduos. A queima freqüente do Cerrado ocasiona uma redução na densidade arbórea e da diversidade de espécies (Sambuichi, 1991). Em contraposição, as áreas protegidas do fogo tendem a um aumento de indivíduos lenhosos e de espécies sensíveis ao fogo (Moreira, 1992). O fogo consome principalmente o estrato herbáceo (Miranda et al., 1993). A recuperação da planta após o evento de fogo depende basicamente de três fatores: (a) magnitude do dano causado à planta; (b) método de regeneração; e (c) disponibilidade ambiental para o crescimento após a queimada (Frost & Robertson, 1987).

3. MATERIAL E MÉTODOS

No presente trabalho o processamento das imagens NDVI do sensor MODIS pode ser subdividido em três etapas: (a) confecção de um cubo temporal relativo à série temporal do NDVI; (b) tratamento do ruído com a aplicação de um filtro móvel de mediana e transformação pela Fração Mínima de Ruído (MNF) e (c) classificação da série temporal utilizando o classificador espectral Spectral Correlation Mapper (SCM) (Carvalho Junior & Meneses, 2000).

3.1 Dados do sensor MODIS

O sistema "Earth Observing System" (EOS), financiado pelo programa da NASA "Earth Science Enterprises" (ESE) possui como objetivo avaliar as mudanças na superfície terrestre e suas conseqüências para a vida neste planeta, desenvolvendo um entendimento de seu funcionamento como um sistema único e interligado (Justice et al., 2002). O principal instrumento do projeto EOS é o sensor MODerate resolution Imaging Spectrometer (MODIS) com as características de ampla cobertura espacial e espectral, adequadas em pesquisas de mudanças globais (Barker et al., 1992).

As imagens do sensor MODIS são disponibilizadas gratuitamente pela NASA e possuem alta resolução temporal, que varia de 1 a 16 dias (Justice et al., 2002). As trinta e seis bandas espectrais deste sensor estão localizadas em função de um comprimento de onda definido para a observação de feições das propriedades das nuvens e sua dinâmica, as propriedades da vegetação na cobertura terrestre e a temperatura da superfície dos oceanos (Salomonson & Toll, 1990). Além disso, são oferecidas imagens georreferenciadas e corrigidas dos efeitos atmosféricos, como nuvens, aerossóis, entre outros (Telles et al., 1995, Wolf et al., 2002).

No presente trabalho são utilizadas seqüências de imagens NDVI (MOD13Q1) entre 2000 e 2007, com resolução de 250 m. Os produtos referentes aos índices

de vegetação (MOD13) são gerados a partir da reflectância diária de superfície (série MOD09 - nível 2), corrigidos para o espalhamento molecular, absorção de ozônio e aerossóis (Vermote et al., 2002). O algoritmo de geração dos índices usa os dados de reflectância da superfície no nível 2G (reprojetados) e faz uma composição temporal de 16 dias desses dados (nível 3).

3.2. Confecção do Cubo Temporal com imagens NDVI

O conceito de cubo de imagem foi inicialmente introduzido para retratar o conjunto de imagens hiperespectrais, onde cada pixel é representado por um espectro (Green et al., 1998a). De forma análoga, o conjunto de imagens temporais NDVI pode também ser representado por um cubo, no qual cada pixel apresenta um espectro que evidencia as mudanças no índice NDVI ao longo do tempo. Desta forma, o cubo apresenta nos eixos "x" e "y" as coordenadas geográficas e no eixo "z" o espectro temporal NDVI. Os espectros temporais são ordenados no cubo utilizando a seqüência dos dias do ano em ordem crescente (Figura 2).

3.3. Tratamento do Ruído

Mesmo com a riqueza de informações provenientes dos sensores com alta resolução temporal é difícil manter uma consistência das imagens devido às interferências atmosféricas, cobertura de nuvens, variação radiométrica (oscilação do sensor, iluminação solar, entre outros) ou presença de outros ruídos que são feições comuns no sensoriamento remoto (Du et al., 2001; Furby et al., 2001; Hall et al., 1991; Hill & Sturm, 1991). Desta forma, um importante entrave nos estudos espectrais de imagens temporais é a alta concentração de ruídos, tornando prioritário um tratamento prévio dos dados. A partir da eliminação dos ruídos no cubo de imagens é possível obter bons resultados de classificações considerando o conjunto total da série temporal.

Com o propósito de eliminar o ruído e gerar um espectro mais suavizado foi desenvolvida uma metodologia constituída de duas etapas: (a) filtragem do espectro temporal usando um filtro móvel de mediana, e (b) realização da transformação MNF.

Para a primeira etapa foi desenvolvido um programa de filtragem por mediana em linguagem C++. O dado de entrada consiste no cubo de imagem temporal. Neste o usuário estabelece o tamanho da janela, que passa sobre o espectro temporal.

Após o emprego da filtragem pela mediana foi empregada complementarmente a transformação Minimum Noise Fraction (MNF). Inicialmente, esse método foi desenvolvido para o tratamento de imagens hiperespectrais, mas também tem sido utilizada com sucesso no tratamento de ruído de imagens gamaespectrométrica (Dickson & Taylor, 1988, 2000) e no tratamento de séries temporais MODIS (Carvalho

Júnior et al., 2006).

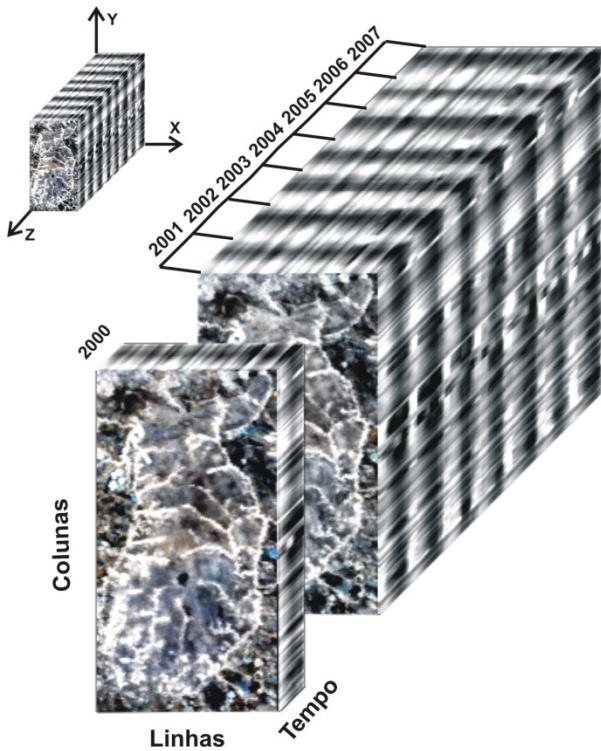


Fig. 2 - Cubo temporal NDVI entre 2000 e 2007; os eixos X e Y correspondem às coordenadas geográficas, e o Z referente ao tempo.

O MNF é um procedimento que concilia tanto os procedimentos de segregação da componente ruído como também de redução da dimensionalidade dos dados (Carvalho Júnior et al., 2002; Green et al., 1988b; Lee et al., 1990). A transformação MNF separa a fração ruído da fração sinal, sendo identificadas pela qualidade da imagem e pelo gráfico de autovalores, seguido da transformação MNF inversa, onde são utilizadas somente as bandas relativas ao sinal (Figura 3).

3.4. Classificação das Séries Temporais

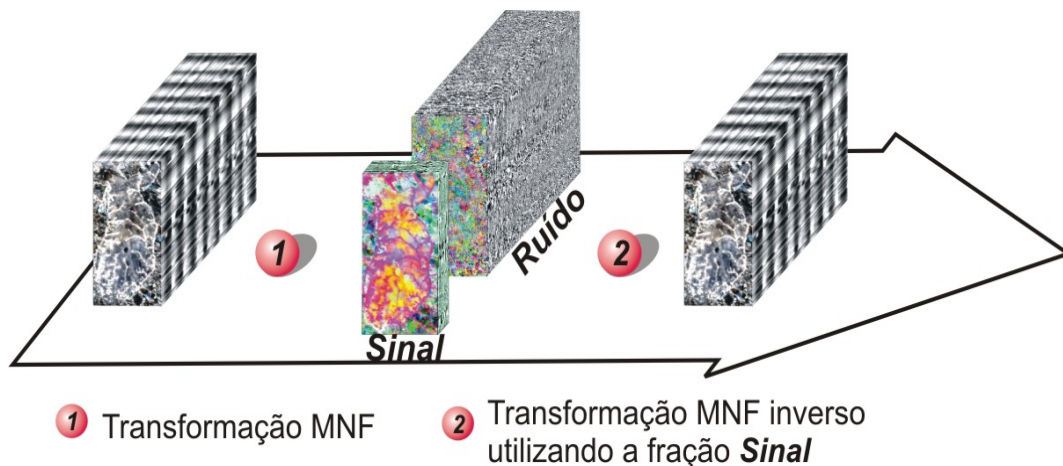


Fig. 3 - Procedimento metodológico da transformação MNF.

Onde “EI” é o espectro da imagem, o “ER” é o espectro de referência e “EIm” e “ERm” são suas

A identificação das assinaturas temporais foi realizada utilizando classificadores espectrais. Estes classificadores baseiam-se na comparação do espectro da imagem com um espectro de referência a partir de um critério de distância, similaridade ou dissimilaridade entre as duas curvas espectrais (Carvalho Júnior et al. 2003). No presente trabalho foram utilizados dois métodos de características distintas para a configuração dos dados temporais: Distância Euclidiana e o Spectral Correlation Mapper (SCM) oriundo do coeficiente de correlação de Pearson (Carvalho Júnior & Meneses, 2000).

O método da Distância Euclidiana é uma das medidas mais utilizadas em classificações. A sua formulação é expressa pela relação da assinatura temporal de referência (R) e o da imagem (I) considerando um espaço n-dimensional descrito pelo número de bandas:

$$D(R, I) = \left[\sum_{i=1}^{i=nb} (R_i - I_i)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Neste método quanto maior for a distância euclidiana menor e a possibilidade do espectro da imagem estar no mesmo grupo que o de referência. Para efetuar a classificação o pixel adquire o rótulo da curva com menor distância euclidiana entre as curvas analisadas.

O método SCM é um índice de similaridade que tem sido usado para a identificação de tipos de vegetação a partir de imagens multiespectrais (Bruce et al., 2007). A formulação do SCM é expressa pela seguinte fórmula:

$$SCM(R, I) = \frac{\sum_{i=1}^{i=nb} (EI_i - EIm)(ER_i - ERm)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=nb} (EI_i - EIm)^2 \sum_{i=1}^{i=nb} (ER_i - ERm)^2}} \quad (2)$$

respectivas médias. O método SCM produz imagens com valores que variam de -1 até 1, sendo maior a correlação quando mais próximo de 1. Considerando os diferentes espectros temporais de referência as classes são definidas pela curva com maior valor obtido para o índice.

Os dois métodos descritos apresentam comportamentos bem distintos no propósito de classificar os alvos. O SCM busca identificar formas similares, proporcionando uma normalização dos dados em relação a mudanças de ganho e offset. Neste propósito, formas similares com variações de amplitudes e de valores médios mantêm índices altos de similaridade. Por exemplo, a Figura 4 apresenta um espectro temporal NDVI e outro proveniente de sua multiplicação por 0,5 e soma por 0,3. Apesar dos espectros apresentarem distinção pelo método da Distância Euclidiana (com valor de 4,59), pelo método SCM apresentam o valor de correlação máxima. Estas características de distinção dos dois métodos são relevantes para avaliar os resultados obtidos para assinaturas temporais que normalmente apresentam um comportamento similar devido à sazonalidade.

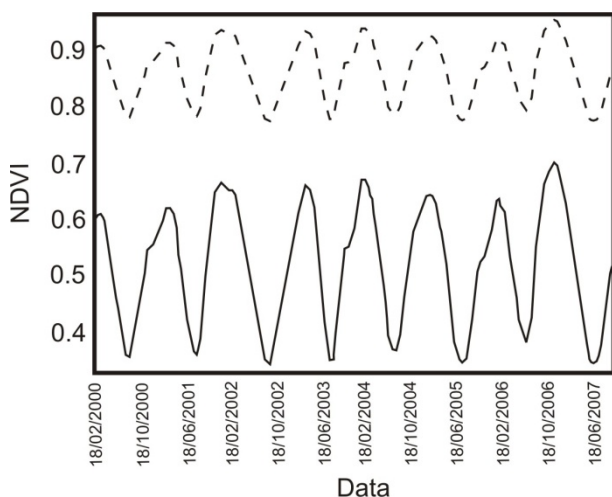


Fig. 4 – (a) Assinatura temporal (linha contínua) e (b) Assinatura temporal modificada pela multiplicação por 0,5 e soma de 0,3 (linha tracejada). O valor do SCM entre as duas curvas é igual a 1, enquanto a distância euclidiana é 4,59.

4. RESULTADOS

4.1. Resultados da Eliminação de Ruído

O tratamento de ruído utilizando a combinação dos procedimentos de filtragem por mediana e transformação MNF permitiu uma diminuição significativa da presença de ruídos do tipo impulso, além de eliminar pontos com cobertura de nuvens ou sombra, melhorando a qualidade da imagem. O emprego dessa combinação de métodos é bastante simples e de rápido processamento.

A Figura 5 demonstra os efeitos provenientes

dos tratamentos nos espectros temporais. No presente trabalho foram realizadas duas filtrações consecutivas pela mediana com uma janela de dimensão cinco e com passo igual a um. A filtração pela mediana por ser um método não linear permite eliminar os ruídos do tipo impulso, no entanto pode gerar eventualmente alguns patamares devido à repetição de valores.

No segundo procedimento de transformação MNF as componentes são ordenadas de acordo com a razão sinal/ruído, onde as primeiras componentes representam as bandas relativas ao sinal e as últimas as componentes de ruído. No presente estudo foram consideradas como sinal apenas as 10 primeiras bandas, avaliadas a partir da contribuição dos autovalores, como também, pela qualidade visual das imagens. Com a realização da inversão do MNF pode-se obter um espectro suavizado sem a presença de ruídos brancos (ruídos sem correlação e de baixa variância) e dos eventuais pequenos patamares (sucessão de valores repetidos) gerados após a filtração de mediana.

4.2. Assinaturas Temporais das Formações Vegetais do Cerrado

O comportamento espectral da vegetação do Cerrado apresenta intensa variação entre os períodos de seca e de chuva, tanto em relação aos constituintes biofísicos como bioquímicos (Asner, 1998; Carvalho, 2005), que se refletem nos valores de NDVI. No presente estudo é possível distinguir os espectros temporais das principais formações vegetais do Cerrado, que estão intimamente relacionadas com suas características fenológicas (Figura 6).

A formação florestal é representada pela Mata de Galeria que se caracteriza por ser perenifólia, formando uma cobertura contínua de vegetação fotossinteticamente ativa praticamente durante o ano inteiro. Essa característica é evidenciada pelas assinaturas temporais que apresentam os mais altos valores de NDVI, sendo aproximadamente 0,8 durante o período chuvoso e atingindo 0,6 durante o período seco. A variação sazonal dos valores de NDVI é de 0,2 o mais baixo em comparação às demais formações vegetais. A transição da Mata de Galeria para as demais formações savânicas e campestres é brusca permitindo associar sua distribuição espacial aos cursos d'água.

Na área de estudo a formação savânica é caracterizada pelo Cerrado Sentido Restrito composto pelos estratos arbóreo e herbáceo-arbustivo. As árvores são baixas, tortuosas e ramificadas irregularmente, com uma densidade e distribuição controlada por fatores principalmente edáficos e hídricos (Araújo & Haridasan, 1988; Haridasan, 1982; Marimon Júnior & Haridasan, 2005; Souza et al., 2007). O Cerrado Sentido Restrito pode apresentar uma porcentagem de cobertura arbórea bastante variável entre 5% até 70% (Ribeiro & Walter, 1998).

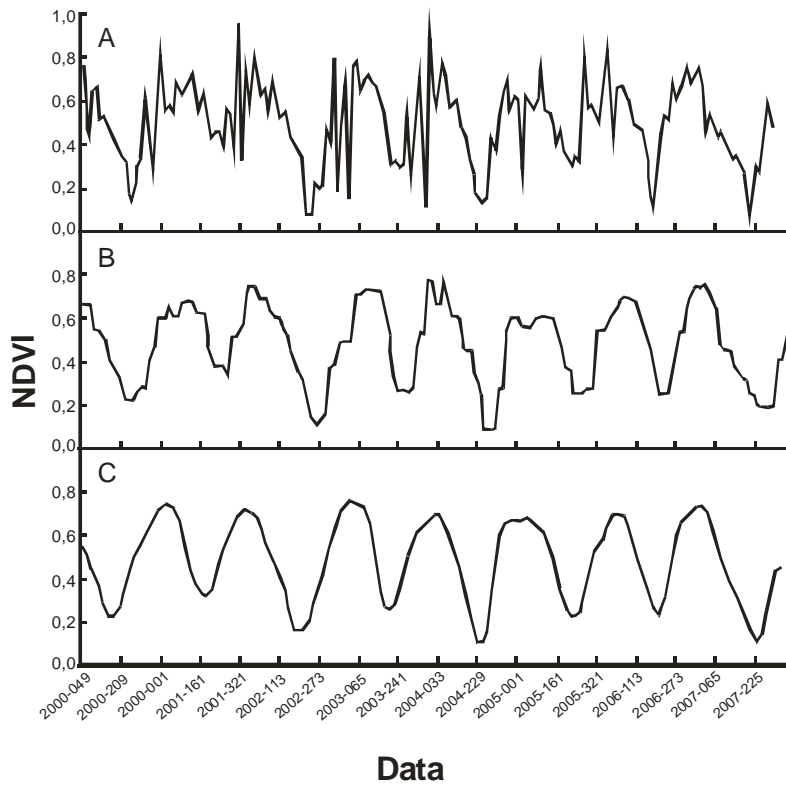


Fig. 5 - Espectros temporais NDVI (a) original com alta variação e presença de ruído, e (b) espectros suavizados pela mediana e (c) espectros suavizados pela transformação MNF.

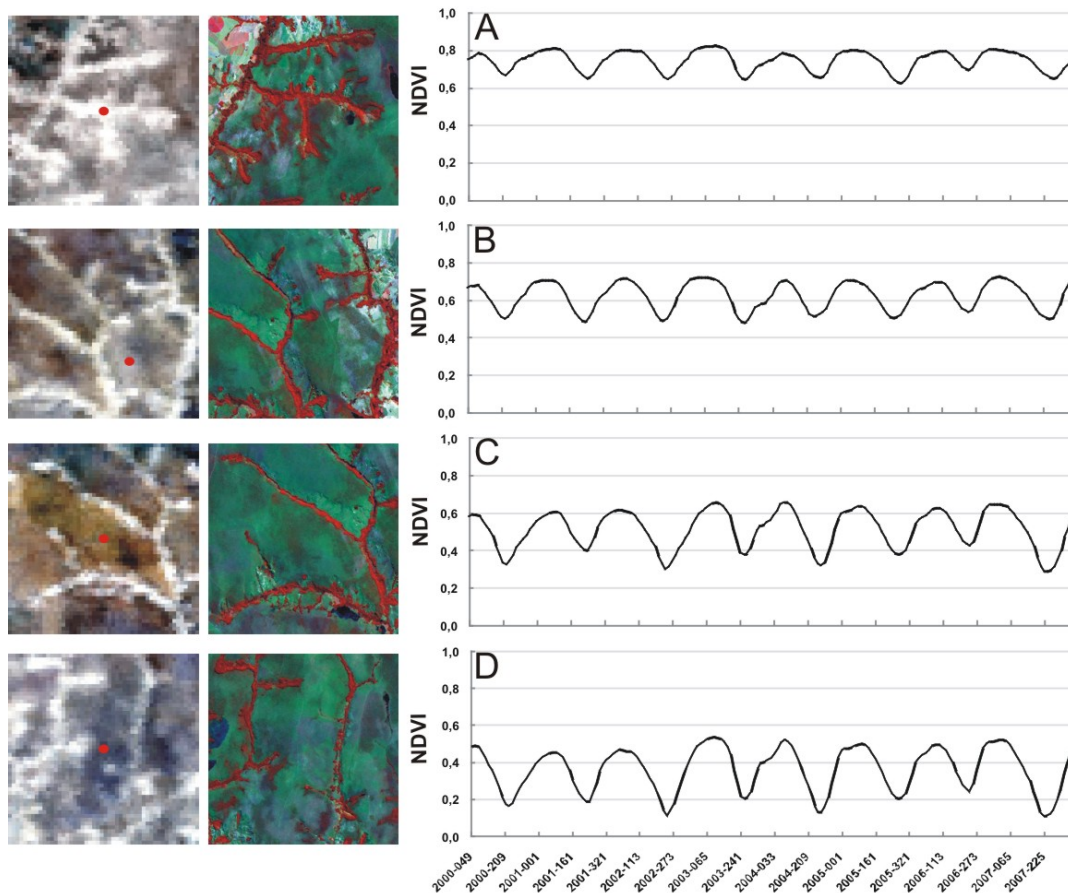


Fig. 6 - Demonstração dos tipos fisionômicos do Cerrado a partir da composição colorida das imagens temporais, imagens Landsat 7 ETM+ e das assinaturas espectrais referentes: (a) Mata de Galeria; (b) Cerrado típico; (c) Cerrado Ralo; e (d) Campo. Os locais onde os perfis temporais foram extraídos estão marcados de vermelho.

Os perfis temporais estão intimamente relacionados à fenologia do estrato herbáceo em relação ao estrato arbóreo. No período de estiagem a vegetação herbácea apresenta a sua parte aérea seca, com um comportamento de vegetação não fotossinteticamente ativa. Por outro lado, as espécies arbóreas conseguem manter sua atividade fotossintética, por causa do sistema radicular, que extrai água em maiores profundidades. Observa-se assim que as formações savânicas apresentam um comportamento de mistura entre as formações entre sua camada graminosa e arbórea. Ainda foi possível diferenciar duas densidades na cobertura arbórea nestas fisionomias, podendo ser diferenciados um Cerrado Ralo, com NDVI variando entre 0,6 e 0,3 e um Cerrado Típico, com valores entre 0,7 e 0,5.

As assinaturas temporais NDVI-MODIS das formações campestres denotam que essas são bastante atingidas durante o período de estiagem. Sua biomassa seca apresenta os menores valores NDVI entre as formações vegetais. Além disso, as formações campestres apresentaram a maior amplitude entre as estações, o que pode ser explicado pela perda de sua parte superior e uma maior mistura com seu substrato durante o período seco, que contrasta com as folhas verdes durante o período chuvoso. Essa formação também é muito suscetível a eventos de fogo por apresentar maior biomassa seca durante o período de inverno.

Pelas assinaturas temporais é possível também distinguir eventos de queimadas que ocorrem periodicamente na área de estudo. Esses eventos ficam bem demarcados devido à queda mais abrupta dos valores de NDVI-MODIS que ficam próximos a 0,2. A Figura 7 mostra assinatura temporal da vegetação durante o período de 2000 a 2007 que evidencia dois períodos de queimada referentes aos anos de 2001 e 2004. Complementarmente, nesta figura apresenta imagens dos sensores TM-Landsat e IRMSS do CBERS-2 com resolução espacial de 30 metros e de 80 metros, respectivamente, muito superior que a MODIS com 250 metros, para destacar especialmente estas feições de queimadas. Apenas uma única imagem do sensor IRMSS do CBERS-2 foi utilizada na Figura 7, referente ao dia 08/09/2004, devido à inexistência de imagem que demonstrasse o evento de queimada para o ano de 2004. Observa-se assim uma perfeita correlação da queda dos valores NDVI com os períodos de queima. Portanto, mesmo com a pior resolução espacial a assinatura NDVI-MODIS mostra-se sensível na detecção desses eventos.

4.3. Classificação das Séries Temporais

A aplicação dos procedimentos de redução de ruídos possibilitou uma melhor distinção entre as assinaturas temporais. A classificação espectral pelos métodos de Mínima Distância Euclidiana e SCM a partir das assinaturas temporais NDVI-MODIS permitiu classificar as diferentes fisionomias e características presentes dentro do Campo de Instrução Militar de

Formosa (Figura 8). Além dos espectros temporais pertinentes a vegetação, os espectros provenientes do lago e de uma área desmatada com forte contribuição de solo foram também utilizados no processo de classificação.

A classificação pela Distância Euclidiana permitiu evidenciar uma zonação das fisionomias que se modificam ao longo da vertente do curso de água até o divisor. As formações florestais estão relacionadas aos cursos d'água, mantendo-se fotossinteticamente ativa durante todo o ano devido à disponibilidade hídrica. Adjacente às Matas de Galeria ocorre o Cerrado Típico. Na região central encontram-se as formações campestres e o Cerrado Ralo. Como foi descrito anteriormente, as fisionomias apresentam assinaturas temporais caracterizadas por um comportamento ondulatório proveniente da variação sazonal e a principal distinção entre os espectros são referentes à sua média e amplitude, facilmente detectável por uma medida de distância como a euclidiana. Desta forma, o presente procedimento mostra-se adequado para a individualização das fisionomias vegetais. Além disso, foi possível identificar perfeitamente outros alvos como a lagoa e a área desmatada. Comparando com imagens de melhor resolução espacial, como Landsat5/TM ou CBERS, é possível confirmar o êxito da classificação.

A classificação pelo método SCM permite evidenciar outras características em relação ao método de Mínima Distância Euclidiana. Este método focaliza na forma da curva temporal, realizando uma normalização de ganho e offset entre os espectros de referência e o da imagem. Os alvos que apresentam curvas com formas específicas e distintas das demais, como o lago e a área desmatada, são bem individualizados pelo método. As maiores diferenças do SCM com relação ao método de Mínima Distância Euclidiana está nas áreas de vegetação, que apresentam alta similaridade das curvas devido ao comportamento sazonal. A Mata de Galeria, entre as fitofisionomias, foi a que se manteve menos alterada entre os dois métodos. Isto se deve a uma assinatura temporal sem variações significativas entre os anos, sem presença de queimadas, mostrando-se previsível, constante e modular. Eventuais divergências na Mata de Galeria ocorrem na sua borda que sofre influência de mistura espectral com vegetações adjacentes. As áreas de Cerrado e de Campo são as que apresentam as maiores divergências entre os métodos. Devido à supressão dos fatores preponderante na distinção das fitofisionomias (amplitude e média), tornam-se evidentes as feições espectrais relativas às mudanças, como as provenientes de eventos de queimadas ou de outras alterações bruscas. Na classificação da área de estudo pelo método SCM observa-se que as classes referentes ao Cerrado e Campo apresentam uma continuidade espacial e estão delimitadas por drenagens, caracterizando feições típicas da ação do fogo que não transpõe os limites com água. Observa-se na imagem classificada pelo método SCM três principais padrões de queimadas (Figura 8). No entanto, ressalta-se que podem ter ocorrido outros

eventos na área, que não foram considerados no processo de classificação espectral.

Deve-se salientar que os comportamentos descritos pelos classificadores podem ser modificados com a realização de um pré-processamento das imagens. No trabalho de Carvalho Júnior et al. (2008) a classificação SCM foi feita sobre as imagens transformadas pelo MNF referentes ao sinal. Desta forma, as imagens no espaço MNF geram espectros com

formas sensíveis a variação de média e amplitude, permitindo um comportamento similar ao obtido pela Distância Euclidiana. Outra modificação que pode ser realizada é a normalização prévia dos espectros temporais subtraindo pela média e dividindo pelo desvio padrão. Neste caso, o emprego da Distância Euclidiana terá um comportamento similar ao do método SCM.

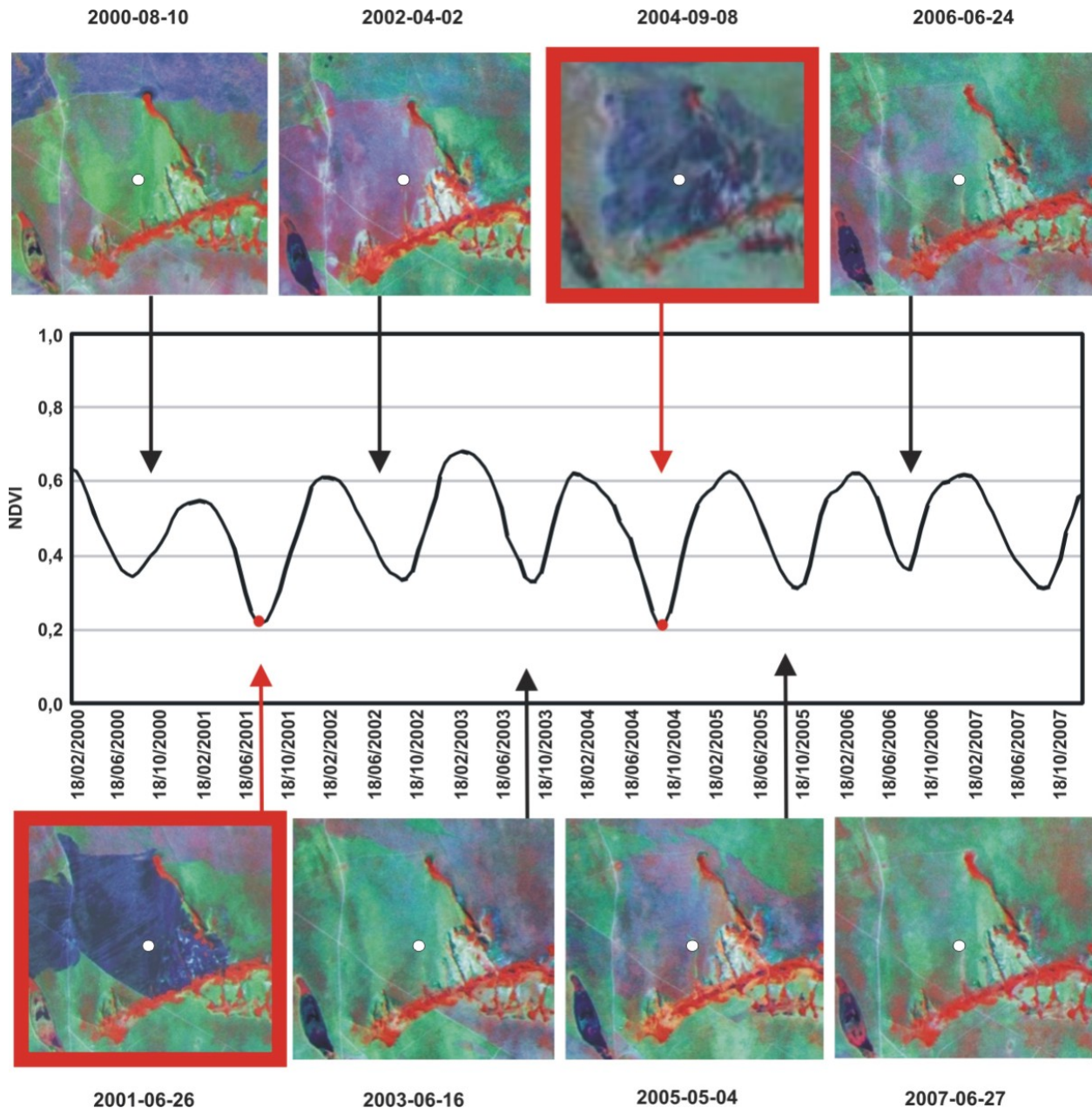


Fig. 7 – Assinatura Temporal NDVI – MODIS referente ao ponto em branco nas imagens. As imagens presentes para cada data são dos sensores Landsat5/TM e CBERS (somente do dia 2004-09-08). As imagens com moldura vermelha destacam períodos de queimada.

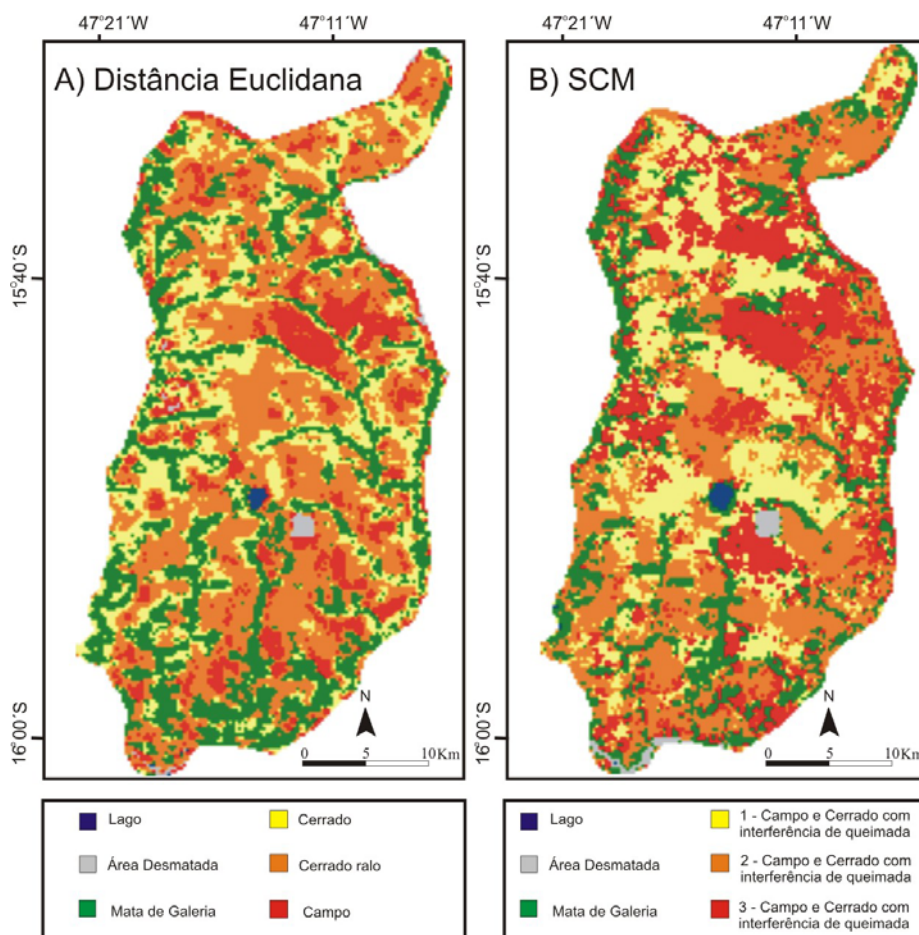


Fig. 8 - Classificação da série temporal utilizando os métodos: (a) Distância Euclidiana - salienta as fisionomias vegetais; e (b) SCM - evidencia as feições relativas aos eventos de queimada.

5. CONCLUSÃO

O emprego da análise multitemporal utilizando imagens de satélite consiste em uma importante ferramenta para o monitoramento da dinâmica da cobertura vegetal do Cerrado.

Vários métodos têm sido propostos, no entanto, a classificação com base na série temporal foi pouco explorada. Uma das principais limitações para o seu emprego é a baixa relação sinal/ruído. A aplicação da transformação MNF permitiu a remoção do ruído e evidenciou o comportamento sazonal na vegetação.

No procedimento de classificação espectral foram utilizados os métodos de Mínima Distância Euclidiana e SCM. Pode-se concluir que ambos os métodos separaram as áreas de lago, área desmatada e Mata de Galeria. Devido às principais variações espectrais entre as fitofisionomias de Cerrado e Campo serem referentes à sua amplitude e média, o método de Mínima Distância Euclidiana torna-se mais adequado para a classificação dessas unidades. O método SCM permite detalhar algumas feições típicas presentes no espectro temporal NDVI como o de eventos de queimadas. Portanto, esses dois métodos, que utilizam uma métrica de distância e outra de similaridade, são complementares para a análise temporal de dados

contínuos.

A utilização de operações de pré-processamento nessas imagens pode alterar o comportamento desses classificadores. No caso de utilizar dados transformados pelo MNF a classificação SCM torna-se similar ao de Mínima Distância Euclidiana (Carvalho Júnior, 2008). Em contraposição, a normalização prévia do espectro pode tornar a métrica de distância similar ao da correlação.

Dentre as classes de vegetação identificadas pela classificação foi possível distinguir as formações florestais, savânicas e campestres. Observa-se uma mistura entre o Cerrado Ralo e a formação campestre, uma vez que tais classes mostram-se ligadas a maior frequência de fogo devido à produção e acúmulo de biomassa nas camadas rasteiras (Batmanian & Haridasan, 1985; Coutinho, 1981, 1990).

AGRADECIMENTOS

O presente artigo foi desenvolvido no âmbito das atividades previstas dos seguintes projetos: (a) “Desenvolvimento de metodologias de processamento digital de imagens de satélite multisensores para o monitoramento do uso da terra e análise ambiental dos fragmentos florestais da bacia do Rio São Francisco”

referente ao edital 35/2006 do CT-Hidro financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); e (b) “Evolução e análise ambiental na região do Cerrado da Bacia do Rio São Francisco” financiado pela FAP-DF relativo ao processo 193.000.49/2008. Além disso, os autores agradecem ao CNPq pelas bolsas de produtividade fornecidas aos pesquisadores: Osmar Abílio de Carvalho Júnior, Éder de Souza Martins e Roberto Arnaldo Trancoso Gomes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, G.M.; HARIDASAN, M. A comparison of the nutritional status of two forests on dystrophic and mesotrophic soils in the Cerrado region of central Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, vol.19, n.7-12, p.1075-1089, 1988.

ASNER, G.P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, vol.64, p.234–253, 1998.

BARKER, J.L.; HARDEN, M.K.; ANUTA, E.A.; SMID, J.E. & HOUGHT, D. **MODIS Spectral Sensivity Study: Requirements and Characterization**. Washington: NASA, 84p, 1992.

BATMANIAN, G.B.; HARIDASAN, M. Primary production and accumulation of nutrient by the ground layer community of Cerrado vegetation of central Brazil. **Plant and Soil**, vol.88, n.3 p.437–440, 1985.

BRUCE, W.P.; JOHNSTON, C.A.; LOVELAND, T.R. Mapping an invasive plant, *Phragmites australis*, in coastal wetlands using the EO-1 Hyperion hyperspectral sensor. **Remote Sensing of Environment**, vol.108, p.74–81, 2007.

CARVALHO, A.P.F. **Estudo de características foliares de espécies de lenhosas de Cerrado e sua relação com os espectros de reflectância**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2005, 126p.

CARVALHO JÚNIOR, O.A.; MENESES, P.R. Spectral Correlation Mapper (SCM): an Improving Spectral Angle Mapper. In: Airborne Earth Science Workshop, 9, Pasadena, CA. **Proceedings**, JPL Publication 00-18, p. 65-74, 2000.

CARVALHO JÚNIOR, O.A.; CARVALHO, A.P.F.; MENESES, P.R.; GUIMARÃES, R.F. Classificação e eliminação dos ruídos em imagens hiperespectrais pela análise seqüencial da transformação por fração de ruído mínima. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol.20, n.1, p. 31-41, 2002.

CARVALHO JÚNIOR, O.A.; CARVALHO A.P.F.; GUIMARÃES, R.F.; MENESES, P.R. Mistura espectral: (II) classificadores espectrais para

identificação. **Espaço & Geografia**, vol.6, n.1, p. 177–197, 2003.

CARVALHO JUNIOR, O.A.; GUIMARÃES, R.F.; MARTINS, E.S.; CARVALHO, A.P.F.; GOMES, R.A.T. 2005. Aplicação do método de identificação espectral para imagens do sensor ASTER em ambiente de Cerrado. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol.23, p.159-172, 2005.

CARVALHO JUNIOR, O.A.; HERMUCHE, P.M.; GUIMARÃES, R.F. Identificação regional da floresta decidual na bacia do rio PARANÁ (GO/TO) a partir da análise multitemporal de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol.24, p.319-332, 2006.

CIRNE, P. **Efeitos do fogo na regeneração de *Kielmeyera coriacea* (Spr.) Mart. (Guttiferae) em áreas de Cerrado sensu stricto: mecanismos de sobrevivência e época de queima**. Tese de Doutorado, Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2002, 83p.

COPPIN, P.; JONCKHEERE, I.; NACKAERTS, K.; MUYS, B.; LAMBIN, E. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 9, p. 1565–1596, 2004.

COUTINHO, L.M. Fire in the ecology of the Brazilian Cerrado. In: J. G. GOLDAMMER, J. C. (Ed.). **Fire in the tropical biota: ecosystem processes and global challenges**. Berlin: Springer-Verlag, 1990, p. 82–105.

COUTINHO, L.M. Aspectos ecológicos do fogo no Cerrado. II – As queimadas e a dispersão de sementes em algumas espécies anemocóricas do estrato herbáceoarbustivo. **Boletim de Botânica da Universidade de São Paulo**, vol. 5, p. 57-64, 1977.

COUTINHO, L.M. Aspectos ecológicos do fogo no Cerrado. – IV Nota sobre a ocorrência e a datação de carvões vegetais encontrados no interior do solo, em Emas, Pirassununga. **Revista Brasileira de Botânica**, vol.4, p.115–117, 1981.

DARDENNE, M.A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: CONGR. BRAS. GEOC., 30. Recife, **Anais**, SBG. vol.2. p.597-610, 1978.

DE FRIES R.; HANSEN M.; TOWNSHEND J.R.G. Global discrimination of land cover types from metrics derived from AVHRR pathfinder data. **Remote Sensing of Environment**, vol.54, p. 209–222, 1995.

DE FRIES, R.; TOWNSHEND, J.R.G. NDVI derived land cover classification at global scales. **International Journal of Remote Sensing**, vol.15, n.17, p. 3567–3586, 1994.

- DIAS, I.F.O.; MIRANDA, A.C.; MIRANDA, H.S. **Efeitos de Queimadas no Microclima de Solos de Campos de Cerrado - DF/Brasil**. In: H. S. Miranda; C. H. Saito; B. F. S. Dias (eds.) *Impactos de Queimadas em Áreas de Cerrado e Restinga*. Brasília, Universidade de Brasília, 1996, p. 11-19.
- DICKSON, B. & TAYLOR G. Maximum noise fraction method reveals detail in gamma-ray surveys. **Exploration Geophysics**, vol.31, p.73-77, 2000.
- DICKSON, B.; TAYLOR G. Noise reduction of aerial gamma-ray survey. **Exploration Geophysics**, vol.29, p.324-329, 1988.
- DU, Y.; CIHLAR, J.; BEAUBIEN, J.; LATIFOVIC, R. Radiometric normalization, composition, and quality control for satellite high resolution image mosaics over large areas. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** 39: 623-634, 2001.
- EITEN, G. The Cerrado vegetation of Brazil. **Botanical Review**, vol.38, n.2, p.201-341, 1972.
- FROST, P.G.H.; ROBERTSON, F. **The ecological effects of fire in savannas**. In: The International Union of Biological Science (IUBS) Monograph Series, n.3, p.93-140, 1987.
- FURBY, S.L. & CAMPBELL, N.A. Calibrating images from different dates to like-value digital counts. **Remote Sensing of Environment**, vol. 77, p. 186-196, 2001.
- GREEN, R.O.; EASTWOOD, M.L.; SARTURE, C.M.; CHRIEN, T.G.; ARONSSON, M.; CHIPPENDALE, B.J.; FAUST, J.A.; PAVRI, B.E.; CHOVI, C.J.; SOLIS, M.; OLAH, M.R.; WILLIAMS, O. Imaging Spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). **Remote Sensing of Environment**, vol.65, p.227-248, 1998a.
- GREEN, A.A.; BERMAN, M.; SWITZER, P.; CRAIG, M.D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol.26, n.1, p.65-74, 1988b.
- GUEDES, D.M. **Resistência das árvores do Cerrado ao fogo: papel da casca como isolante térmico**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília, 1993, 113p.
- HALL, F.G.; STREBEL, D.E. & NICKESON, J.E.; GOETZ, S.J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multitemporal, multisensor images. **Remote Sensing of Environment**, vol.35, p.11-27, 1991.
- HANSEN, M.C.; DE FRIES, R.S.; TOWNSHEND, J. R. G.; SOHLBERG, R. Global land cover classification at 1km spatial resolution using a classification tree approach. **International Journal of Remote Sensing**, vol.21, n.6-7, p.1331-1364, 2000.
- HANSEN, M. C.; DEFRIES, R. S.; TOWNSHEND, J. R. G.; CARROLL, M.; DIMICELI, C.; SOHLBERG, A. Global percent tree cover at a spatial resolution of 500 meters: first results of the MODIS vegetation continuous fields algorithm. **Earth Interactions**, vol.7, n.10, p.1-15, 2003.
- HANSEN, M. C.; DEFRIES, R. S.; TOWNSHEND, J. R. G.; SOHLBERG, R.; DIMICELI, C.; CARROLL, M. Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: examples using AVHRR and MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, vol.83, p.303-319, 2002.
- HARIDASAN, M. Aluminium accumulation by some Cerrado native species of central Brazil. **Plant and Soil**, vol.65, n.2, p.265-273, 1982.
- HILL, J. & STURM, B. Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural landcover classification and vegetation monitoring. **International Journal of Remote Sensing**, vol.12, p.1471-1491, 1991.
- HOFFMANN, W.A. Post-burn reproduction of woody plants in a neotropical savanna: the relative importance of sexual and vegetative reproduction. **Journal of Applied Ecology** vol.35, p.422-433, 1998.
- HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, vol.83, p.195-213, 2002.
- JUSTICE, C.O.; TOWNSHEND, J.R.G.; VERMOTE, E.F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R.E.; SALEOUS, N.; ROY, D.P.; MORISETTE, J.T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, vol.83, p.3-15, 2002.
- KANG, S.; RUNNING, S.W.; LIM, J., ZHAO, M.; PARK, C.; LOEHMAN, R.A regional phenology model for detecting onset of greenness in temperate mixed forests, Korea: An application of MODIS leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, vol. 86, p. 232- 242, 2003.
- KAUFFMAN, J.B.; CUMMINGS, D.L.; WARD, D.E. Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the Brazilian Cerrado. **The Journal of Ecology**, vol.82, n.3, p.519-531, 1994.

- LANDIM, M.F.; HAY, J.D. Impacto do fogo sobre alguns aspectos da biologia reprodutiva de *Kielmeyera coriácea* Mart. **Revista Brasileira de Biologia**, vol. 56, n. 1, p.127-134, 1995.
- LATORRE, M.L.; CARVALHO JÚNIOR, A.O.; SANTOS, J.R.; SHIMABUKURO, Y.E. Integração de dados de sensoriamento remoto multi-resoluções para a representação da cobertura da terra utilizando campos contínuos de vegetação e classificação por árvores de decisão. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol.25, n.1, p. 63-74, 2007.
- LEE, J.B.; WOODYATT, S.; BERMAN, M. Enhancement of high spectral resolution remote sensing data by a noise – Adjusted Principal Components Transform. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol.28, n.3, p.295-304, 1990.
- MARIMON JUNIOR, B.H.; HARIDASAN, M. Comparação da vegetação arbórea e características edáficas de um Cerradão e um Cerrado Sensus Stricto em áreas adjacentes sobre solo distrófico no leste de Mato Grosso. **Acta Botânica Brasílica**, vol.19, n.4, p.913-926, 2005.
- MEDEIROS, M.B. **Efeitos do fogo nos padrões de rebrotamento em plantas lenhosas, em Campo Sujo**. Tese de Doutorado, Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2002, 121p.
- MIRANDA, A.C.; MIRANDA, H.S.; DIAS, I.F.O.; DIAS, B.F.S. Soil and air temperature during prescribed cerrado fires in Central Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, vol.9, n.3, p.313-320, 1993.
- MISTRY, J. Fire in the Cerrado (savannas) of Brazil: an ecological review. **Progress in Physical Geography**, vol.22, n.4, p.425-448, 1998.
- MOREIRA, A.G. **Fire protection and vegetation dynamics in the Brazilian Cerrado**. Ph.D. Thesis, Harvard University, Harvard, 1992, 200p.
- OLIVEIRA, P.E. Fenologia e biologia reprodutiva das espécies de Cerrado. In: S. M. Sano; S. P. de Almeida (Eds.). **Cerrado: ambiente e flora**. EMBRAPA, Brasília, 1998, p.169-192.
- PRINCE, S.D. A model of regional primary production for use with coarse-resolution satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, vol.12, p.1313–1330, 1991a.
- PRINCE, S.D. Satellite remote sensing of primary production: Comparison of results for Sahelian grasslands 1981–1988. **International Journal of Remote Sensing**, vol.12, p.1301–13, 1991b.
- RIBEIRO, J.F.; WALTER, R.M.T. Fitofisionomia do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de (Eds.). **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina: EMBRAPA- CPAC, 1998. p.89-166.
- RUNNING, S.W.; LOVELAND, T.R.; PIERCE, L.L.; NEMANI, R.R.; HUNT, E.R.J. A remote sensing based vegetation classification logic for global land cover analysis. **Remote Sensing of Environment**, vol.51, n.1, p.39-48, 1995.
- SAKAMOTO, T.; YOKOZAWA, M.; TORITANI, H.; SHIBAYAMA, M.; ISHITSUKA, N.; OHNO, H. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, vol. 96, p. 366 – 374, 2005.
- SALGADO-LABOURIAU, M.L. Late Quaternary palaeoclimate in the savannas of South America. **Journal of Quaternary Science**, vol.12, p.371-379, 1997.
- SALOMONSON V.V.; TOLL D.L. Execution phase (C/D) spectral band characteristics of the EOS Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS-N) facility instrument. **Advances in Space Research**, vol.2, n.3, p.231–236, 1990.
- SAMBUICHI, R.H.R. **Efeitos de longo prazo do fogo periódico sobre a fitossociologia da camada lenhosa de um Cerrado em Brasília, DF**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília, 1991, 144p.
- SOUZA, J.P.; ARAÚJO, G.M.; HARIDASAN, M. Influence of soil fertility on the distribution of tree species in a deciduous forest in the Triângulo Mineiro region of Brazil. **Plant Ecology**, vol.191, p. 253-263, 2007.
- TELLES, J.; SAMII, M.V.; DOLL, C.E. Overview of TDRSS. **Advances in Space Research**, vol.16, p.1267-1276, 1995.
- TUCKER, C.J.; NEWCOMB, W.W.; LOS S.O.; PRICE, S.D. Mean an inter-year variation of growing season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989. **International Journal of Remote Sensing**, vol.12, p.1133–1135, 1991.
- VERMOTE, E.; EL SALEOUS, N.; JUSTICE, C. Atmospheric correction of the MODIS data in the visible to middle infrared: First results. **Remote Sensing of Environment**, vol.83, n.1-2, p.97-111, 2002.
- WESSELS, K.J.; PRINCE, S.D.; FROST, P.E.; VAN ZYL, D. Assessing the effects of human-induced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1 km AVHRR NDVI time-series. **Remote Sensing of Environment**, vol.91, p.47–67, 2004.

WOLF, R.E.; NISHIHAMA, M.; FLEIG, A.J.; KUYPER, J.A.; ROY, D. P.; STOREY, J.C.; PATT, F. S. Achieving Sub-Pixel geolocation accuracy in Support of MODIS Land Science. **Remote Sensing of Environment**, vol. 83, n.1-2, p. 31-49, 2002.

ZHANG, X.; FRIEDL, M.A.; STRAHLER, A.H.; HODGES, J.C.F.; GAO, F.; REED, B.C.; HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, vol. 84, p. 471– 475, 2003.