

CLASSIFICAÇÃO DE PADRÕES DE SAVANA USANDO ASSINATURAS TEMPORAIS NDVI DO SENSOR MODIS NO PARQUE NACIONAL CHAPADA DOS VEADEIROS

Osmar Abílio de Carvalho Júnior¹, Cárita da Silva Sampaio¹, Nilton Correia da Silva²,
Antonio Felipe Couto Júnior¹, Roberto Arnaldo Trancoso Gomes¹,
Ana Paula Ferreira de Carvalho³ e Yosio Edemir Shimabukuro⁴

Recebido em 7 fevereiro, 2008 / Aceito em 24 novembro, 2008
Received on February 7, 2008 / Accepted on November 24, 2008

ABSTRACT. Savannas are the main vegetation type in Central Brazil, covering approximately 23% of the national territory. Locally known as Cerrado, Brazilian Savannas are formed by a mosaic of different physiognomies such as grassland, shrubland and woodland that have a typical phenological cycle. 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 Chapada dos Veadeiros National Park, Brazil. The adopted methodology may be subdivided into the following steps: (a) elaboration of the 3D cube of NDVI from temporal MODIS images, where the z profile corresponding to temporal signature, (b) noise elimination by combining Median Filter and Minimum Noise Fraction techniques, (c) endmember detection, and (d) spectral classification using Spectral Correlation Mapper method. The results demonstrate that the savanna physiognomies present typical temporal signatures. The endmembers correspond to the three major physiognomic domains: (a) Cerrado grassland, herbaceous dominated region; (b) Cerrado, mostly a mixture of grasses and shrubs; and (c) Cerrado woodland, densely covered by trees. Comparison with Landsat 7/ETM+ image demonstrates the classification efficiency of the temporal series. The study concluded that the NDVI series is useful in differentiating the amount of vegetation types. The methodology efficiency has been proved for regional delimitation of savanna physiognomies even considering the low spatial resolution of the 250m MODIS sensor and the high spectral mixture.

Keywords: Cerrado, changing detection, multitemporal analysis, digital image processing.

RESUMO. A savana é o principal tipo de vegetação no Brasil Central, cobrindo aproximadamente 23% do território nacional. Localmente é conhecido como Cerrado, sendo formado por um mosaico de fisionomias tais como Campo, Campo Cerrado e Cerrado que possuem um ciclo fenológico típico. Neste contexto, os dados do MODIS fornecem medidas diárias que permitem monitorar a fenologia sazonal da vegetação. O presente trabalho objetiva avaliar o emprego de assinaturas temporais para detectar tipos de savanas no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros. A metodologia adotada pode ser subdividida nos seguintes passos: (a) elaboração do cubo 3D das imagens temporais NDVI – MODIS, onde o perfil em z corresponde à assinatura temporal, (b) tratamento do ruído pela combinação das técnicas de Filtro de mediana e o Minimum Noise Fraction, (c) detecção dos membros finais utilizando o invólucro convexo, e (d) classificação espectral usando o método Spectral Correlation Mapper. Os resultados demonstram que as fisionomias do Cerrado apresentam assinaturas temporais típicas. Os membros finais correspondem aos três maiores domínios fisionômicos: (a) Campo, região com domínio do extrato herbáceo; (b) Cerrado, uma mistura de campo e arbustos; e (c) Cerrado Denso, densamente coberto por árvores. Comparações com imagem Landsat 7/ETM+ demonstram a eficiência da classificação das séries temporais. O estudo concluiu que as séries NDVI são úteis na diferenciação dos tipos de vegetação. A eficiência da metodologia tem sido provada para delimitação regional das fisionomias de savana, mesmo considerando a baixa resolução espacial de 250m do sensor MODIS e a alta mistura espectral.

Palavras-chave: Cerrado, detecção de mudança, análise multitemporal, processamento digital de imagem.

¹Universidade de Brasília, Departamento de Geografia, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900 Brasília, DF, Brasil. Tel.: (61) 3307-1859; Fax: (61) 3272-1909 – E-mails: osmarjr@unb.br; carita@unb.br; afelipe.couto@gmail.com; robertogomes@unb.br

²Centro Universitário de Anápolis (Unievangélica), Avenida Universitária km 3.5, Cidade Universitária, Anápolis, GO, Brasil. E-mail: nilton@unievangelica.edu.br

³Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), SBN Quadra 1 bloco "D" – Ed. Palácio do Desenvolvimento, sala 1620, 70057-900 Brasília, DF, Brasil. Tel.: (61) 3411-7629; Fax: (61) 3411-7497 – E-mail: ana.carvalho@incra.gov.br

⁴Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR), Avenida dos Astronautas, 1.758, Jd. Granja, 12227-010 São José dos Campos, SP, Brasil. Tel.: +55(12) 3945-6483; Fax: +55(12) 3945-6488 – E-mail: yosio@dsr.inpe.br

INTRODUÇÃO

O Cerrado é uma formação do tipo savana tropical, com extensão original de cerca de dois milhões de quilômetros quadrados no Brasil Central. Segundo bioma em extensão depois da Floresta Amazônica representa 23% do território nacional (Eiten, 1972; Dias, 1992). Ocorre em diferentes tipos de solos, formações geológicas e altitudes que variam de 300 metros (Baixada Cuibana – MT) a 1600 metros (Chapada dos Veadeiros – GO).

Nas últimas décadas, este bioma tem sido explorado intensamente pela agricultura e plantios florestais que fragmentam a paisagem (Ab'Sáber, 2003). Estima-se que cerca de 40% dos 208 milhões de hectares de Cerrado contínuo já tenham sido convertidos em pastagens cultivadas, áreas agrícolas e outros tipos de uso (Sano et al., 2001). Essa conversão do uso do solo tem implicações diretas sobre a distribuição dos recursos hídricos para os outros biomas adjacentes, pois as três maiores bacias hidrográficas da América Latina recebem águas do Cerrado. A bacia Amazônica (Araguaia-Tocantins) tem 78% de suas nascentes neste bioma, a bacia do Paraná-Paraguai possui 48%, enquanto a bacia do São Francisco tem quase 50%. Conhecido como “berço das águas”, o Cerrado possui uma malha de nascentes, córregos e rios de fundamental importância para os ecossistemas brasileiros (Arruda, 2003).

A importância da interligação ecossistêmica do Cerrado com seus adjacentes, bem como sua biodiversidade, tornam-no um dos três biomas brasileiros de elevada diversidade sob grande ameaça de extinção (Arruda, 2003), o que enfatiza a relevância do aprimoramento de técnicas para o seu monitoramento. Neste propósito, é fundamental o estabelecimento de tecnologias eficientes para o monitoramento dos ecossistemas do Cerrado. O sensoriamento remoto permite estender medições da vegetação em diferentes escalas temporais e espaciais. A natureza contínua dos dados espectrais no tempo permite desenvolver estudos sobre o comportamento sazonal e mudanças da composição biofísica e bioquímica de dosséis (Sader et al., 1990; Stone et al., 1994; Mora & Iverson, 1997).

Os espectros da vegetação do Cerrado apresentam intensa variação entre os períodos de seca e de chuva, tanto em relação aos constituintes biofísicos como bioquímicos (Asner, 1998; Carvalho, 2005). O comportamento temporal da vegetação fornece importantes indícios sobre as fitofisionomias presentes através dos diferentes atributos de fenologia das plantas, como a variação da arquitetura da vegetação, presença de pigmentos na planta, entre outros (DeFries & Townshend, 1994; Latorre et al., 2007).

Neste propósito, as imagens do sensor MODIS (*Moderate*

Resolution Imaging Spectroradiometer) mostram-se adequadas para a realização de estudos temporais. O sensor MODIS concebido pelos trabalhos liderados pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) foi lançado a bordo das plataformas TERRA e AQUA, no ano de 1999 e 2002, respectivamente, fornecendo um recobrimento global e contínuo diariamente, com resoluções espaciais variadas (Justice et al., 2002). Esse sensor foi idealizado para auxiliar o estudo integrado do funcionamento da terra, oceanos e atmosfera, considerando o planeta como um só ecossistema inter-relacionado, integrando os seus diversos biomas e ambientes na superfície terrestre. Uma característica importante do MODIS é a correção dos efeitos atmosféricos (nuvens, aerossóis, etc.) e a disponibilidade de dados georreferenciados.

O presente trabalho tem como objetivo identificar assinaturas temporais dos índices de vegetação do sensor MODIS no período de cinco anos com o propósito de classificar as fisionomias de Cerrado, presentes no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros. Devido às características fenológicas do Cerrado é proposta uma classificação que considere o atributo temporal de forma a detectar e descrever a variabilidade da vegetação fotossinteticamente ativa, tanto espacialmente como temporalmente.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros está localizado no segmento nordeste do Estado de Goiás entre as latitudes 13°51 e 14°10S e as longitudes 47°25 e 47°42W (Fig. 1). O acesso, a partir de Brasília, se dá através da BR-020 até o cruzamento com a GO-118, passando pelas cidades de São Gabriel, São João da Aliança até alcançar a cidade de Alto Paraíso. O limite do Parque está situado a oeste de Alto Paraíso de Goiás, sendo seu extremo leste distribuído ao longo da GO-118 (entre Alto Paraíso e Teresina de Goiás) e seu limite sul correndo ao longo da estrada estadual que liga Alto Paraíso a Colinas do Sul.

Criado pelo Decreto Federal nº 49.875 de 11 de janeiro de 1961, com uma área de 625 mil hectares e com o nome de Parque Nacional do Tocantins, a unidade de conservação englobava fazendas de gado e povoados como o de São Jorge, constituídos de garimpeiros em plena atividade. Em 1972 sua área foi reduzida para 171.924 ha e seu nome alterado para Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros – PNCV. A última redução aconteceu em 1981 passando aos atuais 60 mil ha (Galante & Paes, 1991).

A região do Cerrado encontra-se em médias latitudes e apresenta como principal tipo climático o Tropical Estacional (Aw). Aproximadamente 90% das chuvas estão concentradas de outo-

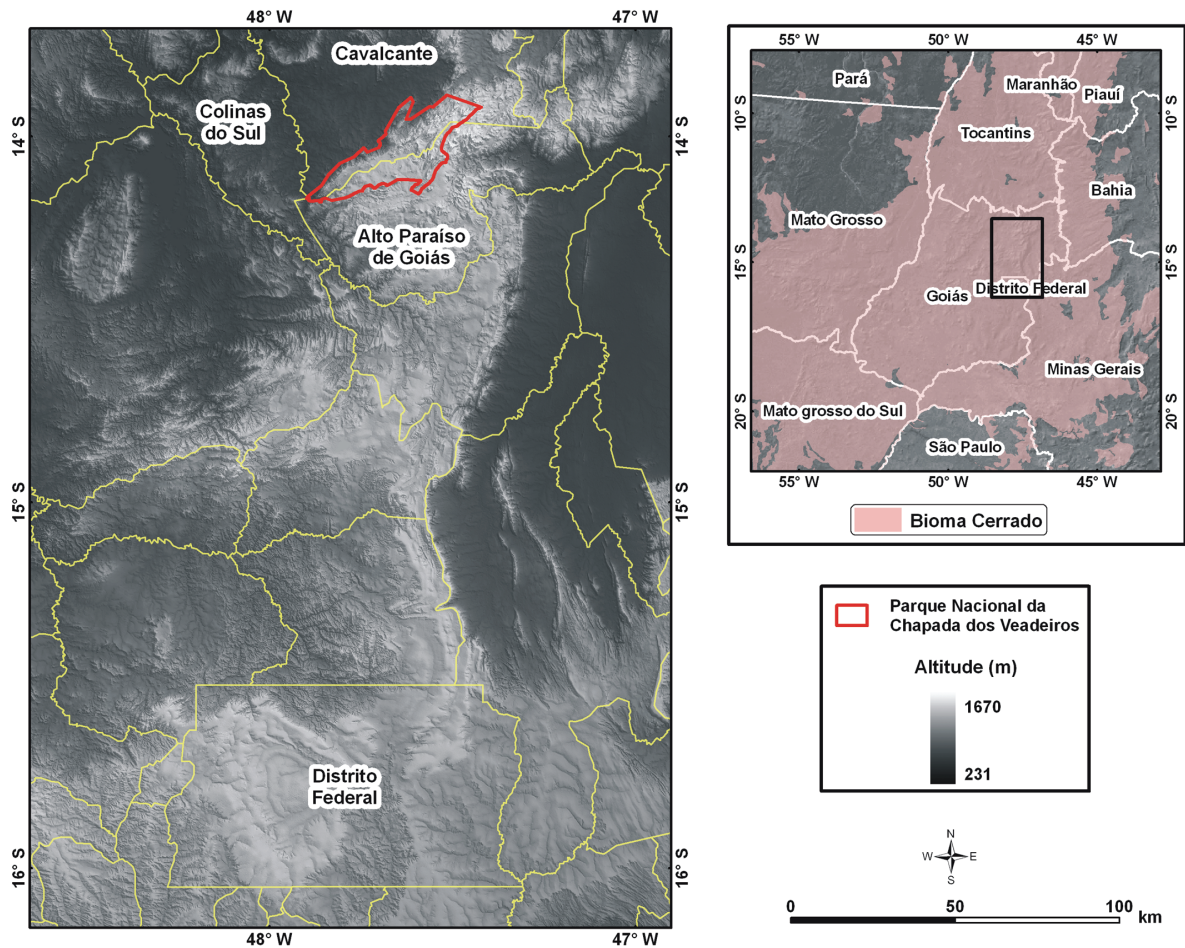


Figura 1 – Mapa de localização do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros.

bro a abril, enquanto na estação seca (maio a setembro), a umidade do ar é muito baixa (abaixo de 20% em agosto e setembro) e a quantidade de chuvas pode chegar à zero em alguns meses. Este comportamento sazonal ocasiona um estresse hídrico que favorece eventos de fogo (Felfili et al., 1999).

Dentro do PNVC, predominam solos rasos e pobres em nutrientes representados por Neossolos litólicos, Cambissolos ou Plintossolos, eventualmente com afloramentos rochosos de pouca extensão (Felfili et al., 2007). Estes solos impedem a colonização de plantas de maior porte, prevalecendo às formações campestres sobre o Cerrado *Sensu Strictu* (Eiten, 1972; Felfili et al., 2007). As manchas de latossolo existentes na área ocorrem de forma setorial e condicionam o aparecimento de Cerrado Denso e Campo Sujo. A Mata de Galeria encontram-se sob solos de areia quartzosa nos vales com relevo plano. Nas matas de cabeceiras de drenagem em áreas planálticas abertas ocorrem solos hidromórficos (Galante & Paes, 1991; Felfili et al., 2007).

Dados do Sensor MODIS

O sensor MODIS é um dos cinco instrumentos a bordo do satélite TERRA (formalmente conhecido como EOS-AM-1). 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). Além disso, são oferecidas imagens corrigidas dos efeitos atmosféricos (nuvens, aerossóis etc.) e georreferenciadas (Teles et al., 1995; Wolfe et al., 2002). As principais características do sensor MODIS são (Barker et al., 1992): (a) ampla cobertura espacial e espectral; (b) continuidade nas tomadas de medidas, em faixas espectrais mais estreitas, que as disponíveis em outros sistemas sensores até o momento, vindo a complementar estas informações, e (c) ser a primeira ferramenta dos satélites EOS na condução em pesquisas de mudanças globais.

O arquivo dos produtos referentes aos índices de vegetação compreende um conjunto de variáveis que inclui: valores dos

índices de vegetação NDVI e EVI para o período de 16 dias; a qualidade (QA) dos índices EVI e NDVI; valores de reflectância referentes à banda do vermelho (banda 1), infravermelho próximo (banda 2), infravermelho médio (banda 6) e azul (banda 3); além do ângulo de visada, o ângulo zenital solar e o ângulo azimutal solar relativo a cada pixel da composição.

Os índices de vegetação minimizam as interferências relativas às variações provenientes do ângulo solar e dos efeitos atmosféricos, observados para dados multitemporais. Enquanto o NDVI é sensível à clorofila, o EVI é mais sensível as variações na resposta estrutural do dossel, incluindo o índice de área foliar (LAI), a fisionomia da planta e a arquitetura do dossel (Huete et al., 2002). O NDVI apresenta a seguinte formulação (Rouse et al., 1973):

$$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_{VER}}{\rho_{IVP} + \rho_{VER}} \quad (1)$$

onde, ρ_{IVP} é o valor da reflectância no infravermelho próximo (800-1100 nm) e ρ_{VER} é a reflectância na faixa do vermelho (600-700 nm). Os valores obtidos com o NDVI são contidos em uma mesma escala de valores, entre -1 e 1. A principal crítica em relação ao NDVI é a fraca sensibilidade para valores de índice de área foliar entre 2 e 3 (Curran, 1983; Prince, 1992; Liu & Huete, 1995). No entanto, esse índice parece adequado para ambientes de Cerrado (Cerrado típico), cujo valor de IAF fica em torno de 1 (Miura et al., 2003).

Os índices de vegetação do MODIS apresentam melhor desempenho que os do sensor AVHRR. Huete et al. (2002) analisaram e compararam um ano de dados NDVI do MODIS com resolução de 1 km com dados equivalentes de NDVI do sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) com a mesma resolução. Nesse estudo, os índices NDVI do MODIS e AVHRR descreveram satisfatoriamente o padrão sazonal e a fenologia de uma ampla extensão de biomas. Na estação seca, os valores de NDVI de ambos os sensores mostraram valores idênticos em regiões áridas e semi-áridas. Por outro lado, na estação chuvosa, os valores do NDVI do MODIS foram significativamente maiores em relação aos do AVHRR, resultando em uma maior variação sazonal para cada ponto. As maiores diferenças nos valores de NDVI estão nos locais mais úmidos e as maiores discrepâncias foram observadas na estação chuvosa. Essas diferenças foram atribuídas à influência do conteúdo de vapor d'água na atmosfera, a qual afeta fortemente as bandas do IVP (Infravermelho próximo) do AVHRR e causa redução nos valores de NDVI, especialmente na estação chuvosa. Pelo fato das bandas estreitas do MODIS evitarem as regiões de absorção

da água no espectro, praticamente não foram afetadas pelas variações sazonais do conteúdo de vapor d'água da atmosfera. Especificamente em relação à discriminação das fisionomias de Cerrado, os índices simulados MODIS NDVI e EVI apresentaram, respectivamente, 75% e 71% de porcentagem de acerto e de 82% quando considerados simultaneamente (Ferreira et al., 2004). Essa característica comprova a adequação do índice de vegetação do sensor MODIS para avaliação regional de biomas fragmentados como o Cerrado.

Neste trabalho foram utilizadas seqüências de imagens NDVI (produto MOD13Q1) do PNCV ao longo de cinco anos de 2000 até 2005 com resolução de 250 m, totalizando 14 (quatorze) imagens. A metodologia adotada para o processamento das imagens pode ser subdividida nas seguintes etapas: (a) confecção de um cubo 3D relativo à série de imagens temporais do índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada), (b) tratamento do ruído e (c) classificação utilizando os espectros temporais NDVI.

Confecção do Cubo 3D das Imagens Temporais NDVI

Para obter os espectros de NDVI, as imagens relativas às diferentes datas devem ser unidas, formando um cubo de imagens 3D. Desta forma, o cubo apresenta nos eixos "x" e "y" as coordenadas geográficas e no eixo "z" o espectro temporal NDVI (Fig. 2). Os espectros temporais são ordenados no cubo 3D utilizando a seqüência dos dias do ano em ordem crescente.

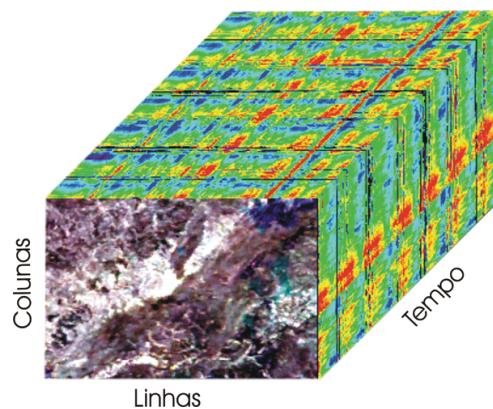


Figura 2 – Imagem do cubo 3D relativo à série temporal NDVI do sensor MODIS.

Tratamento do ruído

O espectro temporal dos índices de vegetação apresenta uma forte interferência de ruídos, o que ocasiona variações indesejáveis que prejudicam a análise espectral e sua classificação. Para obter um espectro temporal mais suavizado foram utilizados os seguintes procedimentos: (a) emprego do filtro de mediana ao

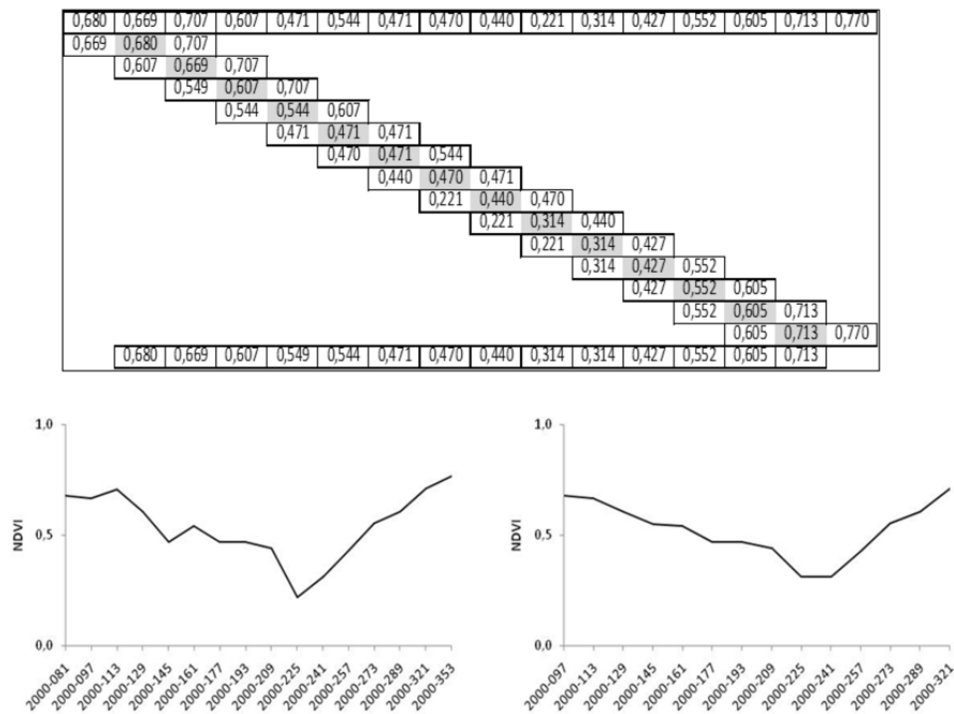


Figura 3 – Filtro espectral de mediana.

longo do espectro, e (b) emprego da transformação *Minimum Noise Fraction* (MNF).

Para o tratamento do ruído presente no espectro temporal, um filtro convolucional de mediana que trabalha ao longo do espectro foi desenvolvido em linguagem C++. O tamanho da janela foi estabelecido pelo usuário que passa pelo espectro com um passo igual a 1, minimizando as variações presentes. A Figura 3 demonstra o filtro de mediana para uma janela com uma dimensão de três bandas.

Complementarmente, foi aplicada a transformação MNF desenvolvida para o tratamento de imagens hiperespectrais, que se mostra também adequada para outros conjuntos de dados como imagens gamaespectrométricas (Dickson & Taylor, 1988, 2000). No processamento de imagens de séries temporais este método foi aplicado com sucesso na análise temporal de imagens MODIS sobre região de Mata Seca no ambiente de Cerrado (Carvalho Júnior et al., 2006).

O MNF é um procedimento estatístico no âmbito da Análise de Principais Componentes (APC) que concilia tanto os procedimentos de segregação da componente ruído como também de redução da dimensionalidade dos dados (Green et al., 1988). Uma das grandes limitações da APC para a remoção do ruído é que nem sempre se observa para as componentes principais

um aumento da razão sinal/ruído de forma crescente em relação aos autovalores (Green et al., 1988; Lee et al., 1990; Carvalho Júnior et al., 2002). Desta forma a vulnerabilidade da APC para a eliminação do ruído é resultante da priorização da variância no ordenamento dos dados, ao invés da razão sinal/ruído como é adotado pela transformação MNF. As componentes da transformação MNF 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. O limite entre esses dois conjuntos de dados pode ser determinado visualmente pela qualidade das imagens ou pela análise da curva de autovalores.

O procedimento para eliminar os ruídos pelo método MNF possui as seguintes etapas: (a) efetuar a transformação MNF na imagem, (b) identificar pela qualidade da imagem e pelo gráfico de autovalores as bandas relativas ao sinal e ao ruído e (c) efetuar a transformação inversa do MNF utilizando somente as bandas relativas ao sinal. Esse método é bastante simples e de rápido processamento.

Identificação dos membros finais

Os membros finais consistem nos elementos puros na imagem que, por mistura, formam todos os demais espectros presentes

(Carvalho Júnior et al., 2005). Os métodos desenvolvidos para detectar os membros finais implicitamente ou explicitamente assumem a geometria do conjunto convexo (Bateson & Curtiss, 1996; Tompkins et al., 1997; Winter, 1999; Bateson et al., 2000; Berman et al., 2004). Um dos métodos mais utilizados é o proposto por Boardman & Kruse (1994) composto por três etapas: (a) redução da dimensão espectral (*Minimum Noise Fraction* – MNF), (b) redução da dimensão espacial (*Purity Pixel Index* – PPI), e (c) identificação manual (utilizando um visualizador n -dimensional). Essa metodologia é amplamente utilizada no processamento de imagens hiperespectrais (Richardson et al., 1994; Richardson, 1996; Kruse & Boardman, 1999) como também de imagens multiespectrais (Carvalho et al., 2002). Comparação do emprego desse procedimento para sensores de resoluções espectrais diferentes mostra que em ambientes naturais os membros finais encontrados são similares (Carvalho Júnior et al., 2006). Neste trabalho esta metodologia foi adaptada para imagens multitemporais (Fig. 4).

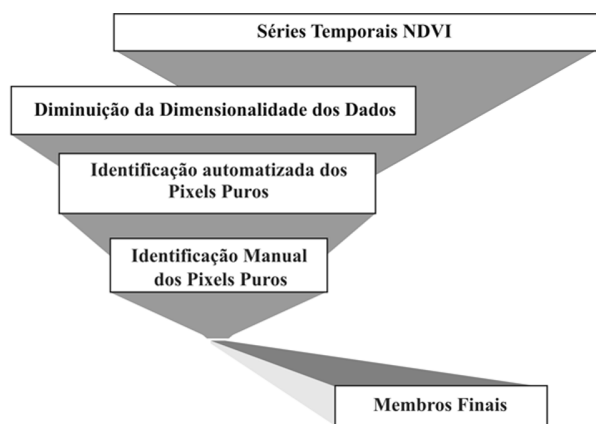


Figura 4 – Sequência metodológica para identificação dos membros finais considerando séries temporais de índices de vegetação.

Classificação espectral

Os classificadores espectrais para identificação baseiam-se na comparação do espectro da imagem com um espectro de referência, proveniente de bibliotecas espectrais ou de membros finais das imagens. A comparação é realizada por intermédio de um critério de similaridade, no qual a identificação do material procurado é feita segundo o ajuste obtido entre as duas curvas espectrais. No presente trabalho foi utilizado o método de classificação espectral *Spectral Correlation Mapper* (SCM) oriundo do coeficiente de correlação de Pearson (Carvalho Júnior & Meneses,

2000). A formulação do SCM é expressa pela seguinte expressão:

$$SCM = \frac{\sum_{i=1}^{i=nb} (EI_i - Elm)(ER_i - ERm)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=nb} (EI_i - Elm)^2 \sum_{i=1}^{i=nb} (ER_i - ERm)^2}}$$

onde EI é o espectro da imagem, o ER é o espectro de referência e Elm e ERm são suas respectivas médias. Devido ao espectro da série temporal ser composta por várias bandas uma automatização do processo de classificação foi realizada considerando apenas as bandas referentes ao sinal da transformação MNF.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tratamento de ruído

Neste trabalho foi utilizada a combinação do filtro de mediana e a transformação MNF para minimizar os ruídos. Primeiramente, o filtro de mediana apresenta como resultado uma diminuição significativa da presença de ruídos de impulso, como pontos com cobertura de nuvens ou sombra, melhorando a qualidade da imagem (Fig. 5).

Complementarmente, o emprego da transformação MNF sobre a série temporal previamente filtrada pela mediana concentra o sinal nas três primeiras componentes, como salienta o gráfico de autovalores (Fig. 6). Considerando apenas essas bandas na transformação inversa do MNF são obtidos como resultados espectros temporais NDVI suavizados dos ruídos brancos (Fig. 7). O emprego combinado da transformação MNF com a filtragem pela mediana obteve melhores resultados que os dados obtidos por Carvalho Júnior et al. (2005) com o emprego somente do MNF.

Identificação dos membros finais e classificação

Nas identificações dos membros finais das séries temporais NDVI foi utilizado o procedimento sequencial MNF-PPI – Visualização n -dimensional. As componentes MNFs para a área de estudo permitem um expressivo realce da vegetação do PNCV. A composição colorida das três primeiras componentes MNF, evidencia a presença de padrões e comportamentos distintos, onde as distribuições tonais refletem distinções de vegetação tanto espacial como temporal (Fig. 8).

O espaço de atributos descrito pelas componentes da transformação MNF evidencia um conjunto convexo, onde os membros finais estão localizados nos seus vértices (Smith et al., 1985; Boardman, 1993; Bateson & Curtiss, 1996). O gráfico de dis-

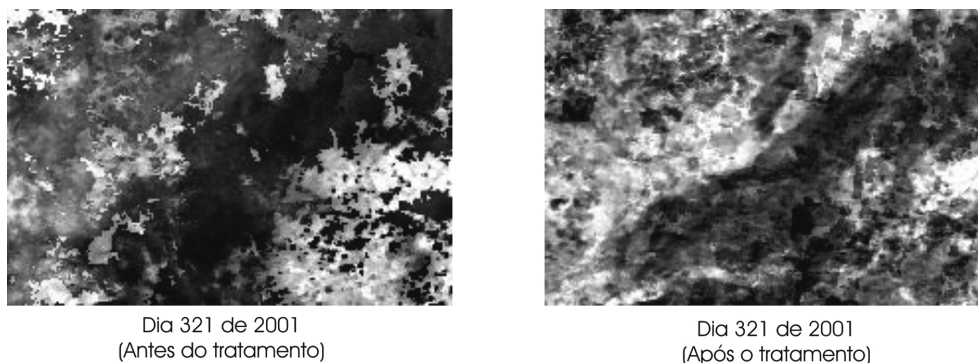


Figura 5 – Emprego do filtro de mediana sobre o espectro temporal NDVI.

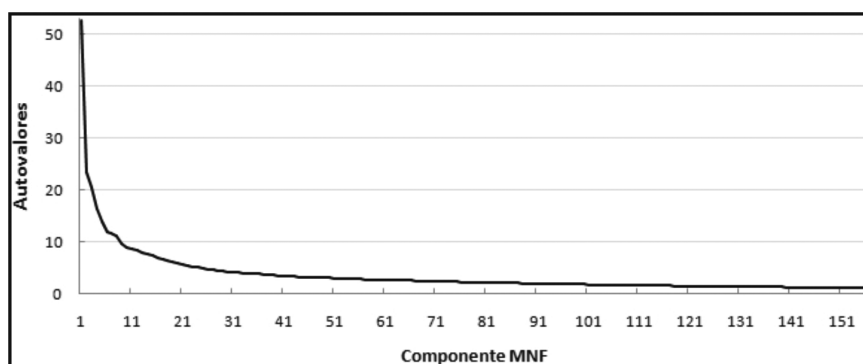


Figura 6 – Gráfico de autovalores da transformação MNF para imagens temporais NDVI. Observa-se a concentração de informação nas três primeiras bandas.

persão entre a primeira e a segunda componente MNF ressalta a distribuição dos dados dentro de uma configuração triangular onde é possível distinguir três principais ambientes: (a) predomínio de Cerrado Denso; (b) composição de Cerrado Ralo e Cerrado Rupestre; e (c) predomínio de campo (Fig. 9a). A Figura 9b demonstra os espectros temporais presentes nos vértices do gráfico de dispersão, onde estão demarcados na Figura 9a por um círculo.

No ambiente com predomínio de Cerrado Denso observam-se espectros com altos índices de NDVI com valores médios de 0,8 no período chuvoso e 0,62 no período seco. Essa vegetação se desenvolve sobre uma borda estrutural com presença de escarpas adaptadas às falhas proterozóicas. No ambiente com predomínio de campo apresenta uma alta oscilação dos valores de NDVI sendo de 0,60 nas épocas de chuva e 0,35 nas épocas de seca, que representam os índices mais baixos durante o ano e de maior amplitude dos dados. O espectro temporal NDVI do ambiente composto por Cerrado Ralo e Rupestre caracteriza-se por apresentar um comportamento com valores de NDVI inter-

mediários durante todo o ano oscilando entre 0,60 na época da chuva e 0,4 na época seca. Uma simples subdivisão dos pontos dentro do gráfico de dispersão permite salientar o arranjo espacial desses três principais ambientes dentro do PNCV, que se organizam em faixas de leste para oeste (Fig. 9c). Observa-se que essas mesmas unidades também são evidenciadas pelo comportamento espectral presentes nas imagens Landsat 7/ETM+ de maior resolução espacial (Fig. 9d).

Desta forma, a análise geométrica dos dados evidencia a presença de um conjunto convexo bem caracterizado com a presença de membros finais bem definidos. Devido à resolução espacial observa-se a pronunciada existência de misturas dos espectros temporais nas imagens. De um membro final para o outro existe uma série contínua que varia proporcionalmente à distância entre eles.

O emprego das técnicas PPI e de visualização n -dimensional permitiram a individualização mais acurada de sete membros finais, que consistem em uma subdivisão das principais classes anteriormente descritas pelo gráfico de dispersão. Pelo

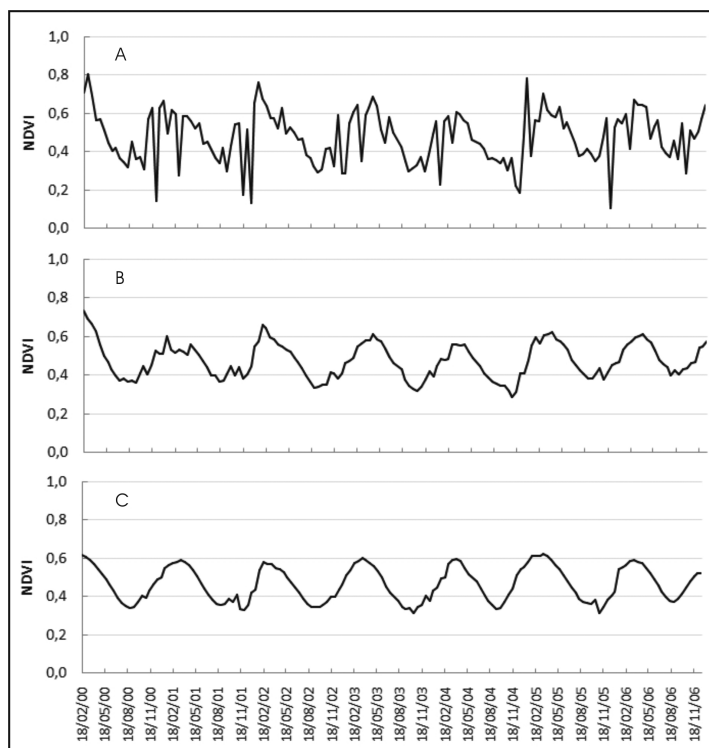


Figura 7 – Espectros temporais NDVI (a) original com alta variação e presença de ruído; (b) espectros suavizados pela mediana; e (c) espectros suavizados pela transformação MNF.

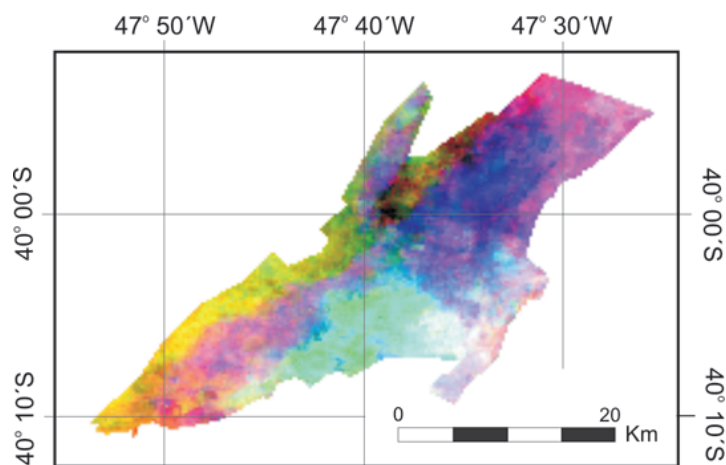


Figura 8 – Composição colorida das imagens provenientes da transformação MNF para a série temporal NDVI (R:3ª MNF/ G:2ª MNF/ B:1ª MNF). O limite do PNCV está demarcado em vermelho.

emprego do classificador espectral SCM foi possível descrever a distribuição espacial desses espectros temporais (Fig. 10a).

Na região com predomínio de Cerrado Denso junto à borda leste do PNCV podem-se identificar dois tipos de assinaturas temporais: (a) espectros contendo valores de NDVI mais altos relativos ao ambiente composto por Cerrado mais denso posi-

cionado na porção norte da faixa (classe I); e (b) espectros com maior amplitude atingindo valores mais baixos de NDVI relativos ao ambiente de Cerrado Denso com presença eventual de locais mais abertos e afloramentos de rocha localizado na porção sul da faixa (classe II) (Fig. 10b).

A área com predomínio do Cerrado Ralo e Rupestre pode ser

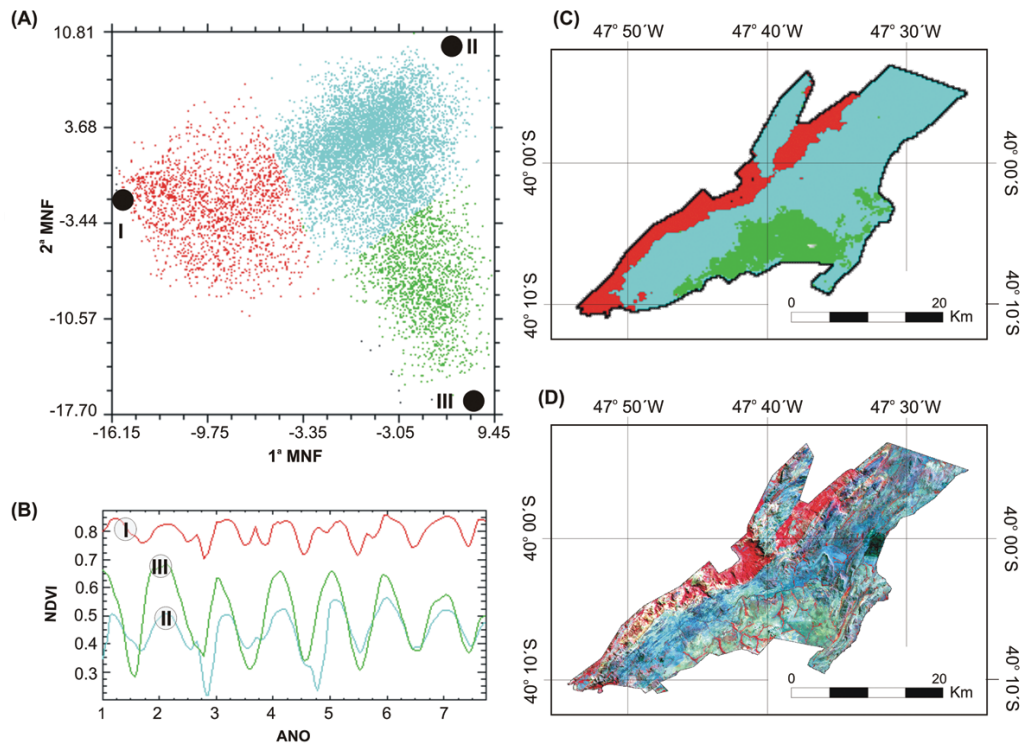


Figura 9 – Análise do gráfico de dispersão: (a) gráfico de dispersão demonstrando a distribuição dos pontos dentro de uma estrutura triangular; (b) espectros temporais relativos aos vértices da figura triangular (demarcadas no gráfico como círculos); (c) imagem classificada diretamente pelo gráfico de dispersão evidenciando as áreas com Cerrado Denso (vermelho), composição de Cerrado Ralo e Rupestre (azul) e campo (verde); e (d) composição colorida de imagem Landsat 7/ ETM+ (R-4, G-3 e B-5) demonstrando sua similaridade com as classes descritas pela imagem classificada da série temporal do sensor MODIS.

subdivida em três tipos de assinaturas temporais que distribuem na porção norte, central e sul. Os espectros temporais NDVI na porção norte apresentam os valores mais altos (classe V), que contrastam com os espectros do sul que apresentam valores mais baixos (classe III) (Fig. 10c). Os espectros da parte central mostram valores intermediários tendendo ser mais próximos aos da porção norte (classe IV). Além disso, os setores na parte intermediária e norte ocorrem sobre Cadeias Cristalinas com as maiores altitudes do PNCV (>1.400 m), tendo seu máximo na área do Pouso Alto (1.650 m); constituídas por um conjunto de cristas de quartzito do Grupo Ará alinhadas na direção NE-SW, separadas por drenagens encaixadas e profundas. Na porção norte progressivamente ocorre à presença de um mar de morros convexo-côncavos gerados sobre granitóides do Proterozóico Superior, mas mantendo o alinhamento existente sobre o Grupo Ará. Esses aspectos físicos estão associados às mudanças presentes na vegetação e conseqüentemente na assinatura temporal.

A região do campo posicionada na região sudeste do PNCV apresenta dois tipos de espectros temporais que espacialmente se separam em uma porção oeste (classe VI) e outra ao leste (classe

VII) (Fig. 10d). Essas unidades ocorrem em depressões interplanáticas constituída por um extenso pediplano, relevo plano para suave ondulado com pequenos morros residuais. Os espectros temporais apresentam alta similaridade ocorrendo apenas uma variação de amplitude mais significativa na parte leste com valores um pouco menores. A principal diferença entre esses ambientes é a maior presença na porção oeste de mata galeria o que torna o espectro de NDVI um pouco mais alto.

Este trabalho constata que a obtenção de espectros temporais com baixa razão entre o sinal e o ruído permite a adoção de técnicas desenvolvidas no processamento digital de imagens hiperespectrais com alto grau de refinamento, robustez e complexidade. A abordagem da análise espectral com dados temporais, considerando a geometria do convexo, permite extrair informações não correlacionadas que melhor descrevem o conjunto de dados. Esta metodologia é mais simples e adequada que os métodos que utilizam estimativas de métricas do espectro NDVI, como tempo de pico de NDVI, valor máximo NDVI, entre outros apresentados por Reed et al. (1994); DeFries et al. (1995), que podem apresentar correlação entre si.

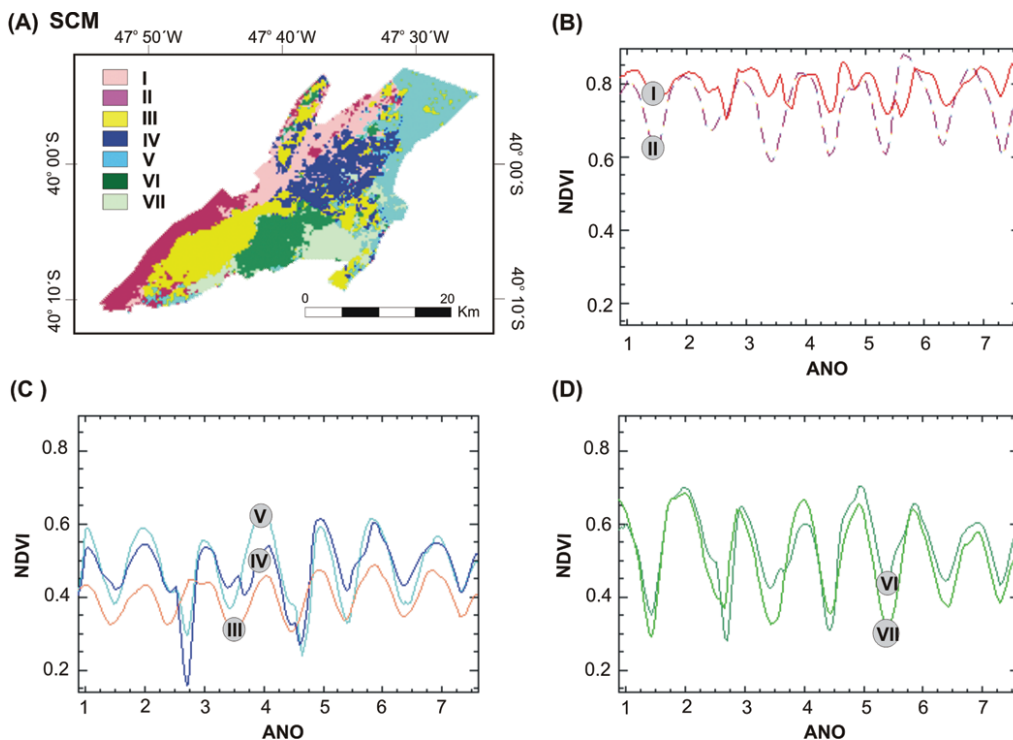


Figura 10 – Classificação das séries temporais NDVI do sensor MODIS: (a) imagem classificada pelo método SCM composto por sete classes; (b) região do Cerrado Denso caracterizado por dois tipos de assinaturas temporais; (c) região do Cerrado Ralo e Rupestre composto por três tipos de assinaturas temporais; e (d) região do campo composto por dois tipos de espectros temporais.

Normalmente, para a classificação de imagens MODIS são identificados padrões de vegetação a partir de estudos prévios detalhados com imagens de sensores de alta resolução espacial e intensas medições de campo (Hansen et al., 2002; Latorre et al., 2007). Neste sentido, a análise espectral também permite identificar os membros finais com menores interferências de misturas permitindo diminuir a intensidade de estudos prévios e orientar na definição das melhores áreas a serem amostradas.

CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou que o uso de índices de vegetação NDVI MODIS é adequado para o monitoramento temporal das fitofisiologias de Cerrado, desde que haja um processo metodológico de otimização da razão sinal/ruído da imagem. Apesar da suavização das características espectrais originais das classes obtidas, torna-se possível realizar processos de classificação com resultados satisfatórios, considerando a dimensão espacial do pixel da imagem MODIS. O procedimento metodológico aqui demonstrado viabiliza pesquisas em escala regional que se proponham monitorar temporalmente as transformações na superfície terrestre.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às seguintes instituições pelo apoio recebido durante a realização deste trabalho: Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (FINATEC) pelo apoio logístico e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento de bolsas de pesquisa aos professores.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER AN. 2003. Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 151 p.
- ARRUDA MB. 2003. Representatividade ecológica com base na biogeografia de biomas e ecorregiões continentais do Brasil: O caso do bioma cerrado. Tese (Doutorado). Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília. 176 p.
- ASNER GP. 1998. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 64: 234–253.
- BARKER JL, HARDEN MK, ANUTA EA, SMID JE & HOUGHT D. 1992. MODIS Spectral Sensivity Study: Requirements and Characterization. Washington: NASA, 84 p.

- BATESON CA & CURTISS B. 1996. A method for manual endmember selection and spectral unmixing. *Remote Sensing of Environment*, 55: 229–243.
- BATESON CA, ASNER GP & WESSMAN CA. 2000. Endmember bundles: a new approach to incorporating endmember variability into spectral mixture analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2): 1083–1094.
- BERMAN M, KIIVERI H, RYAN L, ERNST A, DUNNE R & HUNTINGTON JF. 2004. ICE: A statistical approach to identifying endmembers in hyperspectral images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(10): 1–11.
- BOARDMAN JW. 1993. Automated spectral unmixing of AVIRIS data using convex geometry concepts: In: Annual JPL Airborne Geosciences Workshop, 4, Pasadena, CA. Summaries, JPL Publication 93–26, p. 11–14.
- BOARDMAN JW & KRUSE FA. 1994. Automated spectral analysis: A geologic example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada. In: ERIM – Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, 10, Ann Arbor, MI. Proceedings, Ann Arbor: Environmental Research Institute of Michigan, 1: 407–418.
- CARVALHO APF. 2005. 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, 126 p.
- CARVALHO APF, CARVALHO JÚNIOR OA, GUIMARÃES RF, MARTINS ES & BUSTAMANTE MMC. 2002. Utilização do classificador *Spectral Correlation Mapper* em imagens TM-Landsat. *Espaço & Geografia*, 5(1): 219–232.
- CARVALHO JÚNIOR OA & MENESES PR. 2000. Spectral Correlation Mapper (SCM): an improvement on the Spectral Angle Mapper (SAM). In: Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, 9., Pasadena, CA. Proceedings, JPL Publication 00–18, 65–74.
- CARVALHO JÚNIOR OA, CARVALHO APF, MENESES PR & GUIMARÃES RF. 2002. Classificação e eliminação dos ruídos em imagens hiperespectrais pela análise sequencial da transformação por fração de ruído mínima. *Revista Brasileira de Geofísica*, 20(1): 31–41.
- CARVALHO JÚNIOR OA, GUIMARÃES RF, MARTINS ES, CARVALHO APF & GOMES RAT. 2005. Análise comparativa do processo de identificação automatizada de membros finais a partir de imagens com diferentes resoluções espectrais para a região de Niquelândia (AVIRIS, ETM+ e ASTER). *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(1): 39–50.
- CARVALHO JÚNIOR OA, HERMUCHE PM & GUIMARÃES RF. 2006. Identificação regional da floresta estacional decidual na bacia do rio Paranã a partir da análise multitemporal de imagens MODIS. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(3): 319–332.
- CURRAN PJ. 1983. Multispectral remote sensing for the estimation of green leaf area index. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A* 309: 257–270.
- DEFRIES RS & TOWNSHEND JRG. 1994. NDVI-derived land cover classifications at a global scale. *International Journal of Remote Sensing*, 5(17): 3567–3586.
- DEFRIES R, HANSEN M & TOWNSHEND J. 1995. Global discrimination of land cover types from metrics derived from AVHRR pathfinder data. *Remote Sensing of Environment*, 54(3): 209–222.
- DIAS BFS. 1992. Cerrados: uma caracterização. In: DIAS BFS (Org.). Alternativas de desenvolvimento dos Cerrados: manejo e conservação dos recursos naturais renováveis. Brasília: Fundação Pró-Natureza, p. 11–25.
- DICKSON B & TAYLOR G. 1988. Noise reduction of aerial gamma-ray survey. *Exploration Geophysics* 29: 324–329.
- DICKSON B & TAYLOR G. 2000. Maximum noise fraction method reveals detail in gamma-ray surveys. *Exploration Geophysics* 31: 73–77.
- EITEN G. 1972. The cerrado vegetation of Brazil. *Botanical Review*, 38(2): 201–341.
- FELFILI JM, SILVA JÚNIOR MC, DIAS BJ & REZENDE AV. 1999. Estudo fenológico de *Stryphnodendron adstringens* (Mart.) Coville no cerrado *sensu stricto* da Fazenda Água Limpa no Distrito Federal, Brasil. *Revista Brasileira de Botânica*, 22(1): 83–90.
- FELFILI JM, REZENDE AV & SILVA JÚNIOR MC. 2007. Biogeografia do Bioma Cerrado: vegetação e solos da Chapada dos Veadeiros. Brasília: Editora da Universidade de Brasília/Finatec, 254 p.
- FERREIRA LG, YOSHIOKA H, HUETE A & SANO EE. 2004. Optical characterization of the Brazilian Savanna physiognomies for improved land cover monitoring of the Cerrado biome: preliminary assessments from an airborne campaign over an LBA core site. *Journal of Arid Environments*, 56(3): 425–447.
- GALANTE ML & PAES ML. 1991. Orientações básicas ao manejo do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros-GO, preliminares ao plano de manejo. Brasília: IBAMA, 28 p.
- GREEN AA, BERMAN M, SWITZER P & CRAIG MD. 1988. A transformation for ordering multispectral data in terms of images quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26(1): 65–74.
- HANSEN MC, DEFRIES RS, TOWNSHEND JRG, MARUFUD L & SOHLBERGA R. 2002. Development of a MODIS tree cover validation data set for Western Province, Zambia. *Remote Sensing of Environment*, 83: 320–335.
- HUETE A, DIDAN K, MIURA T, RODRIGUEZ P, GAO X & FERREIRA LG. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83: 195–213.

- JUSTICE CO, TOWNSHEND JRG, VERMOTE EF, MASUOKA E, WOLFE RE, SALEOUS N, ROY DP & MORISETTE JT. 2002. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 83: 3–15.
- KRUSE FA & BOARDMAN JW. 1999. Fifteen years of hyperspectral data: Northern Grapevine Mountains, Nevada. In: *Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*, 5, Pasadena CA, Summaries, JPL Publication 99-17, p. 247–258.
- LATORRE ML, CARVALHO JÚNIOR OA, SANTOS JR & SHIMABUKURO YE. 2007. 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*, 25(1): 63–74.
- LEE JB, WOODYATT S & BERMAN M. 1990. Enhancement of high spectral resolution remote sensing data by a noise – Adjusted Principal Components Transform. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(3): 295–304.
- LIU Q & HUETE A. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33: 457–465.
- MIURA T, HUETE AR, FERREIRA LG & SANO EE. 2003. Discrimination and biophysical characterization of cerrado physiognomies with EO-1 hyperspectral Hyperion. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 9., Belo Horizonte. *Anais do IX SBSR*, São José dos Campos: INPE. p. 1077–1082.
- MORA F & IVERSON LR. 1997. Dynamic stratification of the landscape of Mexico: analysis of vegetation patterns observed with multitemporal remotely sensed images. *Geocarto International*, 12: 73–87.
- PRINCE JC. 1992. Estimating vegetation amount from visible and near infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 41: 29–34.
- REED BD, BROWN JF, VANDERZEE D, LOVELAND TR, MERCHANT JW & OHLEN DO. 1994. Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*, 5: 703–714.
- RICHARDSON LL. 1996. Remote sensing of algal bloom dynamics. *Bio-Science*, 46(7): 492–501.
- RICHARDSON LL, BUISSON D, LUI CJ & AMBROSIA V. 1994. The detection of algal photosynthetic accessory pigments using Airborne Visible-Infrared imaging Spectrometer (AVIRIS) Spectral Data: Marine. *Technology Society Journal*, 28: 10–21.
- ROUSE JW, HAAS RH, SCHELL JA & DEERING DW. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Greenbelt: NASA SP-351, 301–317.
- SADER SA, STONE TA & JOYCE AT. 1990. Remote sensing of tropical forests: an overview of research and applications using non-photographic sensors. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56: 1343–1351.
- SANO EE, BARCELLOS AO & BEZERRA HS. 2001. Assessing the spatial distribution of cultivated pastures in the Brazilian savanna. *Pasturas Tropicales*, 22(3): 2–15.
- SMITH MO, JOHNSON PE & ADAMS JB. 1985. Quantitative determination of mineral types and abundances from reflectance spectra using principal components analysis. *Journal Geophysical Research, Supplement*, 90: C797–C804.
- STONE TA, SCHLESINGER P, HOUGHTON RA & WOODWELL GM. 1994. A map of the vegetation of South America based on satellite imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60: 541–551.
- TELES J, SAMII MV & DOLL CE. 1995. Overview of TDRSS. *Advances in Space Research*, 16: 67–76.
- TOMPKINS S, MUSTARD JF, PIETERS CM & FORSYTH DW. 1997. Optimization of endmembers mixture analysis for spectral. *Remote Sensing of Environment*, 59: 472–489.
- WINTER M. 1999. Fast autonomous spectral endmember determination in hyperspectral data. In: *International Conference Applied Geologic Remote Sensing*, 13., Vancouver, British Columbia, Canada. *Proceedings. Ann Arbor, MI: ERIM Geologic Conferences*, 2: 337–344.
- WOLFE RE, NISHIHAMA M, FLEIG AJ, KUYPER JA, ROY DP, STOREY JC & PATT FS. 2002. Achieving Sub-Pixel geolocation accuracy in Support of MODIS Land Science. *Remote Sensing of Environment*, 83: 31–49.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Osmar Abílio de Carvalho Júnior. Recebeu o título de geólogo pela Universidade de Brasília em 1990, e de mestre e doutor em prospecção mineral pela Universidade de Brasília em 1995 e 2000, respectivamente. Trabalhou como Pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) entre 2002 e 2004. Atualmente é professor da Universidade de Brasília e bolsista de produtividade e pesquisa do CNPq onde realiza pesquisas sobre o processamento digital de imagens multiespectrais e hiperespectrais.

Cárta da Silva Sampaio. Recebeu o título de geógrafa pela Universidade de Brasília em 1999 e concluiu o curso de mestrado em Geografia pela Universidade de Brasília em 2006. Atua como pesquisadora no Departamento de Geografia no Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais (UnB) na área de gestão ambiental e geoprocessamento. Atualmente é geógrafa da SPU – Secretaria de Patrimônio da União/Ministério do Planejamento – onde realiza trabalho de Certificação Cadastral das terras da União nas unidades federadas.

Nilton Correia da Silva. Possui graduação em Tecnologia em Processamento de Dados pela Universidade Estadual de Goiás (1994), Mestrado em Ciência da Computação pela Universidade de Brasília (1999) e Doutorado em Processamento de Dados e Análise Ambiental pelo Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (2003). Atualmente é professor/pesquisador do programa de mestrado em Sociedade, Tecnologia e Meio ambiente do Centro Universitário de Anápolis. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Processamento Digital de Imagens utilizando redes neurais artificiais, computação evolutiva e autômatos celulares.

Antonio Felipe Couto Júnior. Recebeu o título de Engenheiro Florestal pela Universidade de Brasília em 2003 e de mestre em Ciências Florestais pela Universidade de Brasília em 2007. Atua como pesquisador no Departamento de Geografia no Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais (UnB).

Roberto Arnaldo Trancoso Gomes. Recebeu o título de geógrafo pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1999, o grau de mestre e doutor em Geografia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2002 e 2005. Atualmente é professor da Universidade de Brasília e pesquisa sobre modelagem matemática e sistema de informação geográfica.

Ana Paula Ferreira de Carvalho. Possui graduação em Engenharia Agrônoma pela Universidade de Brasília (1992), e de Mestrado e Doutorado em Ecologia pela Universidade de Brasília (1998 e 2005). Realiza na Universidade de Brasília pesquisa em bioquímica de plantas e sensoriamento remoto. Trabalha na divisão de geoprocessamento do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA).

Yosio Edemir Shimabukuro. Recebeu o título de Engenheiro Florestal pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro em 1972, de mestre em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em 1977, de PhD em Sensoriamento Remoto/Ciências Florestais pela Colorado State University (Estados Unidos) em 1987, e Pós-doc em Sensoriamento Remoto pela NASA/GSFC no período de 1992 a 1994. Atualmente é Pesquisador Titular da Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR) do INPE e bolsista de produtividade e pesquisa do CNPq.