

IDENTIFICAÇÃO REGIONAL DA FLORESTA ESTACIONAL DECIDUAL NA BACIA DO RIO PARANÁ A PARTIR DA ANÁLISE MULTITEMPORAL DE IMAGENS MODIS

Osmar Abílio de Carvalho Júnior¹, Potira Meirelles Hermuche² e Renato Fontes Guimarães³

Recebido em 30 maio, 2006 / Aceito em 18 agosto, 2006
Received on May 30, 2006 / Accepted on August 18, 2006

ABSTRACT. Paran river basin has one of the major fragments of Deciduous Seasonal Forest in Brazil. This vegetation is widely fragmented due to the selective wood exploitation and the growth of pasture areas, what justifies the development of studies in order to understand its dynamics and preserve its diversity. Thus, the present study aimed at defining a method for regional identification of the Deciduous Forest in the Paran river basin. The deciduous forest has a typical phenological cycle in comparison with other savanna physiognomies. Due these characteristics, a temporal series of normalized difference vegetation index (NDVI) images of the MODIS sensor was used for its detection. The adopted methodology may be subdivided into the following steps: (a) elaboration of the 3D cube of NDVI images, where the z profile corresponding to temporal signature or NDVI spectrum, (b) noise elimination using the Minimum Noise Fraction (MNF) transformation, and (c) NDVI temporal variability examination of deciduous forest vegetation, with the establishment of the best NDVI band applied in the vegetation index differencing method. The Deciduous Forest presents a typical NDVI spectral behaviour, with higher values in the raining season and lower values in the dry season, what makes this kind of vegetation different from others. The employment of a changing detection algorithm between two images: one for the dry season and the other for the raining season enhances the localization of the Deciduous Seasonal Forest. So, the methodology has proved to be effective for regional delimitation of Deciduous Forests considering the MODIS sensor. Considering the changing detection method, Deciduous Forest region is characterized by presenting NDVI alteration values.

Keywords: Deciduous Seasonal Forest, MODIS, NDVI, changing detection, multitemporal analysis.

RESUMO. A bacia hidrográfica do rio Paran possui um dos maiores fragmentos da Floresta Estacional Decidual no Brasil, têm chamada de Mata Seca. Esse tipo de vegetao apresenta-se bastante fragmentada principalmente pela explorao seletiva de madeira e ampliao de áreas destinadas  pastagem, o que torna necessário estudos para compreensão de sua dinâmica e manuteno de sua diversidade, cuja flora  muitas vezes endêmica. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo definir um método de identificao regional da Mata Seca na bacia hidrográfica do rio Paran. Devido ao comportamento sazonal desse tipo de vegetao foi utilizada na sua deteco uma seqncia temporal de imagens do ndice NDVI do sensor MODIS. A metodologia pode ser subdividida nas seguintes etapas: (a) confeco de um cubo 3D relativo  série de imagens temporais do ndice NDVI, (b) tratamento do ruído presente no espectro do NDVI multitemporal utilizando o método Minimum Noise Fraction (MNF) e (c) análise do espectro do NDVI multitemporal com a formulao de um ndice com o propósito de realçar a presença da Mata Seca. A Mata Seca apresenta um comportamento espectral do NDVI multitemporal tpico com os valores mais altos na época de chuva e mais baixos na época de estiagem, diferenciando-se dos demais tipos de vegetao. O método de deteco de mudança pela subtrao permitiu realçar a localizao da ocorrência de Mata Seca. Desta forma, a metodologia adotada mostrou-se eficaz para a delimitao regional da Mata Seca.

Palavras-chave: Mata Seca, MODIS, NDVI, deteco de mudança, análise multitemporal.

INTRODUÇÃO

O bioma Cerrado destaca-se entre as demais savanas por sua alta diversidade (Sano & Almeida, 1998; Conti & Furlan, 1998). No Brasil é o segundo bioma em extensão, depois da Floresta Amazônica, ocorrendo em diferentes tipos de solos e formações geológicas (Eiten, 1972). O Cerrado é caracterizado pela presença de invernos secos e verões chuvosos, um clima Aw segundo a classificação de Köppen. A média anual da precipitação é da ordem de 1500 mm, variando de 700 a 2000 mm, praticamente concentrada na estação chuvosa (outubro a março) (Adámoli et al., 1987). Em função da contínua degradação deste bioma, estima-se que já tenha sido desmatado aproximadamente 40%, de um total de 208 milhões de hectares (Sano et al., 2001).

Entre as formações florestais do Cerrado encontra-se a Floresta Estacional Decidua do Brasil, também denominada de Mata Seca (Vieira, 2002; Guarino, 2004; Andahur, 2001; Sampaio, 2001; Silva & Scariot, 2003). Quando ocupa áreas rochosas de origem calcária pode ser denominada de "Mata Seca em solo calcário" ou ainda de "Mata Calcária". A Mata Seca não está associada aos cursos d'água, ocorrendo nos interflúvios em solos geralmente mais ricos em nutrientes (Ribeiro & Walter, 1998). Esta formação possui deciduidade pronunciada no período de seca no qual até 50% das árvores perdem suas folhas (IBGE, 1991; Ivanauskas & Rodrigues, 2000; Veloso et al., 1991). Neste contexto o emprego de técnicas de sensoriamento remoto mostra-se adequado para a detecção de monitoramento dessa unidade florestal.

O sensoriamento remoto é uma das tecnologias que permite estender medições da vegetação em diferentes escalas temporais e espaciais. Dados provenientes de diferentes sensores orbitais e aerotransportados encontram-se disponíveis para pesquisas, onde se incluem a obtenção e análise de imagens multitemporais. A natureza contínua dos dados espectrais no tempo permite desenvolver estudos envolvendo o comportamento sazonal da composição biofísica e bioquímica de dosséis (Sader et al., 1990). Muitos avanços nessa área ocorreram com o advento de metodologias desenvolvidas para a detecção de mudança, que realiza medições das características radiativas de dosséis a partir de imagens de um mesmo local em diferentes períodos. Dessa forma, os espectros contínuos de vegetação no tempo consistem em importantes ferramentas para o entendimento das mudanças nas características biofísicas e bioquímicas dos ecossistemas (Mora & Iverson, 1997; Stone et al., 1994).

Os espectros da vegetação do Cerrado apresentam intensa variação entre os períodos de seca e de chuva, tanto em nível

de constituintes biofísicos como bioquímicos (Asner, 1998; Carvalho, 2005). A descrição do comportamento temporal da reflectância da vegetação permite uma análise mais completa da variabilidade espectral e, conseqüentemente, fornece melhor distinção entre as fitofisionomias presentes. A variância espectral no tempo resulta do comportamento fenológico das plantas, que inclui a variação da arquitetura da vegetação, da presença de pigmentos na planta, entre outros. Um dos fatores chave no relacionamento do sensoriamento remoto com os modelos ecológicos é a identificação dos fatores responsáveis pela variância espectral ao longo do tempo.

O presente trabalho tem como objetivo identificar a formação florestal da Mata Seca da bacia do rio Paran em escala regional. Devido a sua característica de pronunciada deciduidade é proposta uma metodologia baseada no processamento digital de imagens multitemporais do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) de forma a detectar e descrever a variabilidade da vegetação fotossinteticamente ativa, tanto espacialmente como temporalmente. Para balizar essas informações foram utilizados dados de pluviometria.

Área de estudo

A bacia do rio Paran é uma sub-bacia do rio Tocantins e está situada na parte nordeste de Goiás e sul de Tocantins (entre as latitudes 11°36' e 15°59' e longitudes 45°88' e 48°25') com uma área de 59.359 km² (Figura 1). Grande parte dessa bacia está situada em uma depressão denominada de Vale do Paran posicionada entre os relevos do Planalto do Divisor São Francisco-Tocantins e o Planalto Central Goiano. A bacia tem seu limite definido, à leste, pela Serra Geral de Goiás e à oeste, pela Serra Geral do Paran.

Nesta bacia ocorre um dos mais expressivos enclaves de Mata Seca no Brasil. As florestas localizadas nessa região possuem espécies importantes por serem raras, endêmicas, ameaçadas de extinção ou devido ao seu alto valor econômico, tais como: *Cariniana estrellensis*, *Erythrina verna*, *Hymenaea courbaril*, *Myracrodruon urundeuva*, *Tabebuia impetiginosa*, *Amburana cearencis*, *Cedrela fissilis*, *Bursera leptophloeus* (amburana-de-cambão), *Cavanillesia arborea* (barriguda), entre outras (Ribeiro & Walter, 1998). As matas secas decíduas apresentam composição florística peculiar (Pedralli, 1997) e sua flora endêmica começa a apresentar extinção local (Pereira et al., 1996).

Estima-se que dois terços da cobertura florestal original da bacia do rio Paran tenha sido desmatada, numa taxa anual supe-

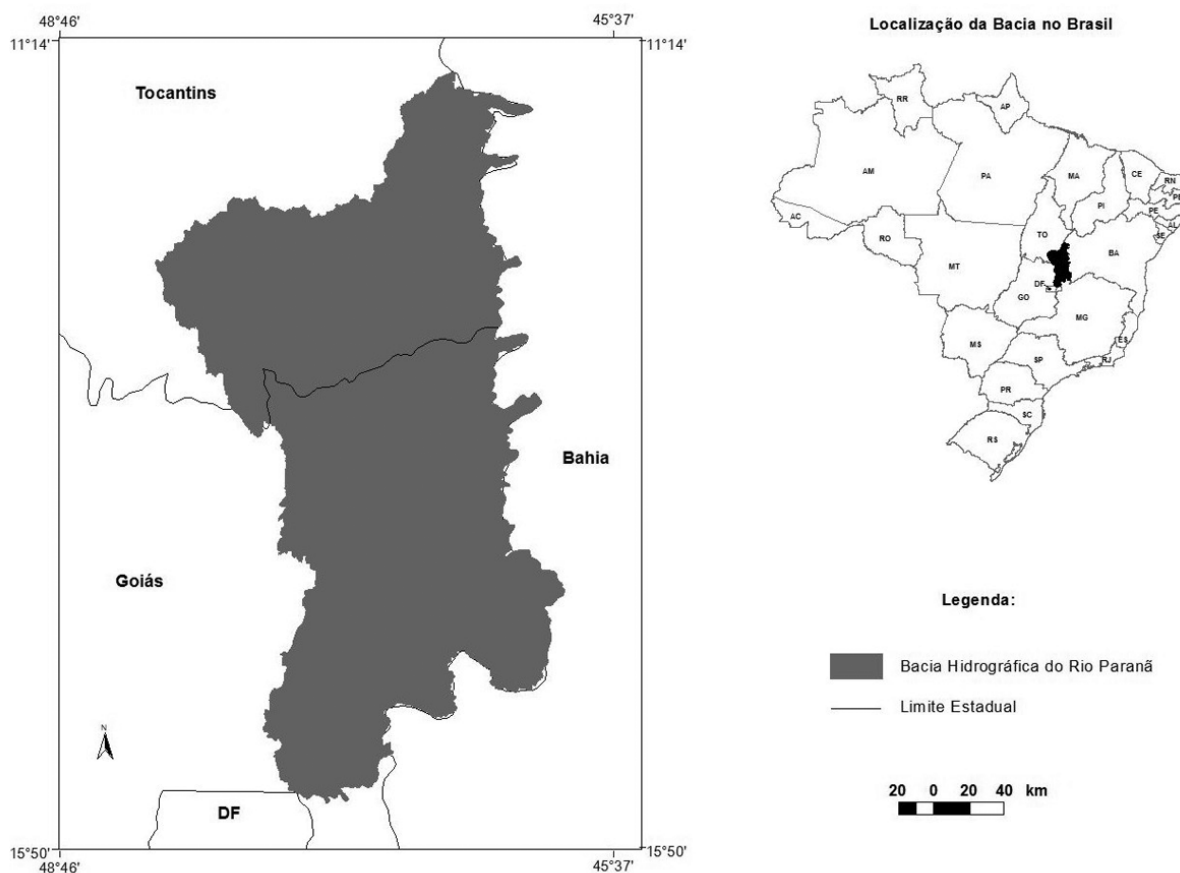


Figura 1 – Mapa de localização da bacia do rio Paranã.

rior a 2000 ha/ano (Andahur, 2001). Essa significativa diminuição espacial tem limitado sua ocorrência aos fragmentos geralmente dispersos na paisagem e com distintos níveis de perturbações antrópicas como exploração seletiva de madeira, ampliação de áreas de pastagem e exploração de calcário pelas fábricas de cimento (Sampaio, 2001; Silva & Scariot, 2003; Ramos, 1989; Rizini, 1979). Portanto, torna-se importante desenvolver pesquisas para criar estratégias da manutenção e preservação da Mata Seca em diferentes situações (Guarino, 2004; Andahur, 2001; Sampaio, 2001; Silva & Scariot, 2003).

A Mata Seca ocorre sobre rochas carbonáticas do Grupo Bambuí que consiste em uma seqüência sedimentar Neoproterozóica do tipo epicontinental, com pelo menos dois ciclos transgressivo-regressivos (Dardenne, 1978; 1981). Recentemente alguns autores consideram a possibilidade de uma deposição em uma bacia do tipo *foreland*, posicionada ao longo da margem oeste do Cráton do São Francisco afetada pela orogênese Brasileira (Castro, 1997; Tomaz-Filho et al., 1998,

Martins-Neto et al., 2001; Castro & Dardenne, 2000). O Grupo Bambuí na porção oeste, apresenta um aumento considerável de altitude, das feições tectônicas e dos sedimentos com gradação de unidades carbonáticas para pelíticas, além de uma complexidade maior de variações de fácies, determinada pelo ambiente paleogeográfico (Misi, 2001).

Por estarem associadas ao subsolo calcário, essa formação florestal é estreitamente ligada aos ambientes cársticos, possuindo uma interdependência de tal ordem que possibilita a identificação de áreas de potencialidade espeleológica por meio de sua ocorrência (IBAMA, 1991).

MATERIAL E MÉTODOS

A análise de séries multitemporais associada aos índices de vegetação e pluviometria tem sido amplamente utilizada nos estudos da cobertura e uso do solo com o objetivo de delimitar tipos de vegetação, áreas de degradação, culturas agrícolas entre ou-

tras atividades (Assad et al., 1996; Costa et al., 2003; Florenzano, 2002; Li et al., 2004; Motta et al., 2003). Neste tópico são descritas as características das imagens utilizadas e as etapas de processamento digital dos dados multitemporais e pluviométricos adotados.

Imagens 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.

Dentre os produtos MODIS relacionados ao estudo da vegetação estão: (a) MOD13 – Índices de Vegetação, (b) MOD15 – Índice de Área Foliar/ FPAR e (c) MOD17 – Produtividade Primária Líquida/ Fotossíntese Líquida. O MOD 13 possui dois índices de vegetação: EVI (*Enhanced Vegetation Index* – Índice de Vegetação Realçado) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada). 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).

No presente trabalho, foi definido para o estudo o produto MODIS relativo ao índice NDVI devido à pronunciada variação de clorofila da Mata Seca ao longo do ano. O NDVI é expresso pela seguinte formulação (Rouse et al., 1973):

$$NDVI = (\rho_{IVP} - \rho_V) / (\rho_{IVP} + \rho_V) \quad (1)$$

onde, ρ_{IVP} é o valor da reflectância no infravermelho próximo (800–1100 nm) e ρ_V é a reflectância na faixa do vermelho (600–700 nm). Esse índice minimiza as interferências relativas às variações provenientes do ângulo solar e dos efeitos atmosféricos, observados para dados multitemporais. Os valores obtidos com o *NDVI* são contidos em uma mesma escala de valores, entre -1 e 1.

O NDVI é muito utilizado para estimativas de índices de área foliar (IAF) (Tucker, 1979), radiação fotossinteticamente ativa absorvida (absorbed photosynthetically active radiation – APAR) (Kumar & Monteith, 1981), biomassa da vegetação (Sellers, 1987; Anderson et al., 1993; Dong et al., 2003), produção primária líquida (net primary production NPP) (Goward et al., 1985) e teor de umidade da vegetação (Paltridge & Barber, 1988). Desta forma, o NDVI é utilizado para a detecção de mudanças em

larga escala dos processos relativos aos ecossistemas (Braswell et al., 1997; Myneni et al., 1997; 2001).

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 IAF fica em torno de 1 (Miura et al., 2003). Desta forma, no propósito de distinguir a Mata Seca das demais formações do cerrado, o emprego da assinatura temporal NDVI aprimora o desempenho para sua delimitação, devido às grandes diferenças sazonais.

No presente trabalho é utilizada uma seqüência de imagens NDVI ao longo do ano de 2002. Os dados, originalmente na projeção *integerized* sinusoidal, foram convertidos para a projeção geográfica por meio do programa MODIS *reprojection tool*, disponibilizado gratuitamente pela NASA.

Metodologia de análise multitemporal

A metodologia adotada para identificar a formação florestal de Mata Seca baseia-se no comportamento sazonal da vegetação fotossinteticamente ativa. Desta forma, é proposta uma metodologia que pode ser subdividida nas seguintes etapas: (a) confecção de um cubo 3D relativo à série de imagens temporais do índice NDVI, (b) tratamento do ruído presente no espectro do NDVI multitemporal utilizando o método Minimum Noise Fraction (MNF) e (c) análise do espectro do NDVI multitemporal com a formulação de um índice com o propósito de realçar a presença da Mata Seca.

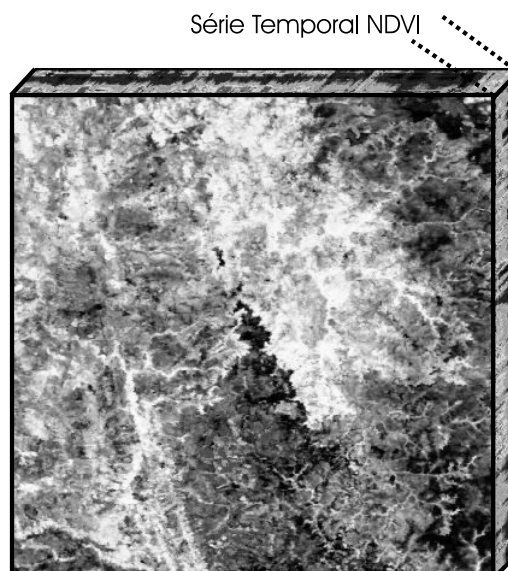


Figura 2 – Imagem do cubo 3D relativo à série temporal NDVI do sensor MODIS.

Para obter os espectros de NDVI as imagens relativas às diferentes datas devem ser unidas em um cubo de imagens 3D.

Desta forma, o cubo apresenta nos eixos "x" e "y" as coordenadas geográficas e no eixo "z" o espectro do NDVI multitemporal (Figura 2). Os espectros de NDVI são ordenados no cubo 3D utilizando a seqüência dos dias do ano em ordem crescente.

Os estudos de séries temporais contínuas de índices de vegetação, inicialmente, foram realizados com o sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), para diferentes tipos de estudos, como por exemplo: análise da correlação dos padrões de precipitação em larga escala e séries NDVI na região do Sahara-Sahel na África (Tucker et al., 1991); variação espacial e temporal de vegetação tipo C₃ e C₄ (Prince 1991 a,b); análise dos efeitos antrópicos na vegetação (Wessels et al., 2004), entre outros. Estudos utilizando séries temporais AVHRR também foram desenvolvidos para classificar tipos de vegetação por seus padrões fenológicos (De Fries et al., 1995; De Fries & Townshend, 1994; Running et al., 1995). Recentemente, essa abordagem tem sido desenvolvida para o sensor MODIS (Huete et al., 2002).

No entanto, o espectro NDVI multitemporal apresenta uma forte interferência de ruídos, o que ocasiona variações indesejáveis e prejudica a análise espectral. Para obter um espectro mais suavizado foi utilizada a transformação MNF. A transformação 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.

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.

Após a obtenção do espectro do NDVI multitemporal com minimização da componente ruído são realizadas análises comparativas entre o espectro da Mata Seca e os demais tipos descritos pelo mapa de vegetação do programa de Zoneamento Econômico e Ecológico (ZEE) de Tocantins, na escala 1:250.000. No propósito de realçar essas diferenças são identificadas as variações máximas de NDVI para a Mata Seca.

Dentre os métodos de detecção de mudança, as operações matemáticas de subtração e divisão entre bandas de dois tempos distintos são muito empregadas para a identificação de zonas de desmatamento, mudanças no uso do solo, entre outros propósitos (Weismiller et al., 1977, Gong et al., 1992, e Manavalan et al., 1995). Com o escopo específico de detectar mudanças da cobertura vegetal são utilizadas técnicas de subtração e divisão de bandas temporais dos índices de vegetação (Coiner, 1980; Nelson, 1983; Singh, 1989; Coppin & Bauer, 1994; Lyon et al., 1998; Yuan & Elvidge, 1998). No presente trabalho é utilizada a subtração do índice NDVI considerando o seu valor de mínimo e máximo ao longo do ano, para a vegetação de Mata Seca.

Análise e interpolação dos dados pluviométricos

Como a resposta espacial da relação entre vegetação fotossinteticamente ativa (VFA) e vegetação não fotossinteticamente ativa (VNFA) expressa na assinatura temporal NDVI é dependente das ocorrências de chuvas, torna-se importante descrever sua distribuição espacial e seus efeitos. Eventualmente, pode-se obter uma expressiva variação de NDVI em um determinado local proveniente de uma chuva isolada ou por uma estiagem um pouco mais prolongada. No presente trabalho foram utilizados os valores mensais de chuva de 36 estações pluviométricas localizadas na área de estudo (Figura 3), fornecidos pela Agência Nacional de Águas – ANA (ANA, 2005).

Primeiramente, foi realizada uma análise exploratória e estrutural dos dados com relação às estatísticas básicas (Druck, 2002). Esse procedimento permite analisar os fatores como: distribuições assimétricas, presença de dados discrepantes, agrupamentos de dados no espaço, tendência dos dados etc, (Druck, 2002; Evangelista, 2004).

Após a análise exploratória foi realizada a interpolação dos dados pelo algoritmo TOPOGRID (Hutchinson, 1989), do programa *ArclInfo*, considerando uma resolução espacial de 250m. A Figura 4 apresenta as imagens de pluviometria da área de estudo para os doze meses. Considerando 64 pontos coletados com presença de Mata Seca pela EMBRAPA foram feitas análises comparativas das assinaturas temporais e os dados pluviométricos mensais.

RESULTADOS

Um dos principais problemas no processamento digital de imagens multitemporais é a dificuldade de normalizar a seqüência temporal de dados e diminuir a presença de ruídos. O emprego da transformação MNF permite eliminar esses dois problemas.

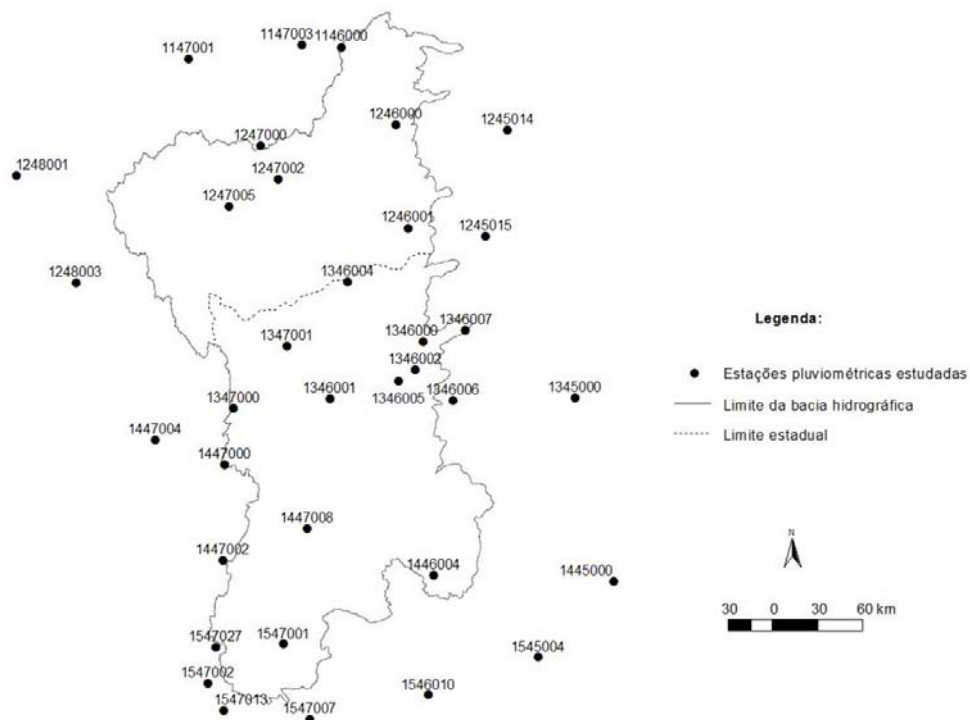


Figura 3 – Mapa de localização das estações pluviométricas estudadas.

A análise do gráfico de autovalores da transformação MNF salienta a alta redundância de informações presentes na série temporal com a concentração de informações nas primeiras componentes (Figura 5). Desta forma, os autovalores descrevem uma pronunciada queda de seus valores até a sétima componente quando é definido um patamar de baixos valores. As primeiras sete componentes praticamente detêm as informações relativas ao sinal, enquanto as demais componentes são referentes ao ruído. A análise complementar da qualidade das imagens também confirma essa distribuição do sinal em relação ao ruído.

Considerando apenas as bandas de sinal na transformação inversa do MNF são obtidos espectros NDVI multitemporais suavizados com menor variação de ruídos (Carvalho Júnior et al., 2002) (Figura 6). Esse método é bastante simples e de rápido processamento.

Além disso, as componentes MNF para a área de estudo permitem um expressivo realce da vegetação. A Figura 7 apresenta uma composição colorida das três primeiras componentes MNF onde a área relativa a Mata Seca adquire um comportamento característico. Os diferentes padrões tonais observados refletem comportamentos distintos ao longo do tempo. Similarmente, muitos autores têm aplicado a APC como método para

a detecção de mudança (Byrne et al., 1980; Ingebritsen & Lyon, 1985; Fung & LeDrew, 1987, Fung, 1990). Esses trabalhos salientam a capacidade da APC de normalizar os dados e utilizam uma análise da matriz de autovetores para descrever as componentes principais. No entanto, a transformação MNF possui como vantagem em relação a APC a capacidade de melhor segmentar a fração de ruído, importante problema neste tipo de dado. Além disso, o retorno do espaço MNF para o espaço NDVI multitemporal, como é proposto no presente trabalho, permite uma definição de assinaturas temporais suavizadas para as fitofisionomias que podem ser correlacionadas com dados de pluviometria ou com outras informações distribuídas no tempo. Neste propósito, torna-se importante retornar ao espaço espectral ao invés de ficar apenas restrito ao espaço da APC ou MNF.

Para a caracterização da assinatura espectral NDVI da Mata Seca foram identificados pontos no campo, demarcados com GPS, em áreas representativas desse tipo de vegetação, visitados na época de chuva e da seca (Figura 7). Nesses pontos os espectros NDVI apresentam pouca variação entre si demonstrando uma coerência do comportamento espectral da Mata Seca. Complementarmente, os espectros da Mata Seca foram comparados com outros tipos de vegetação (cerrado típico e campo sujo) descritos

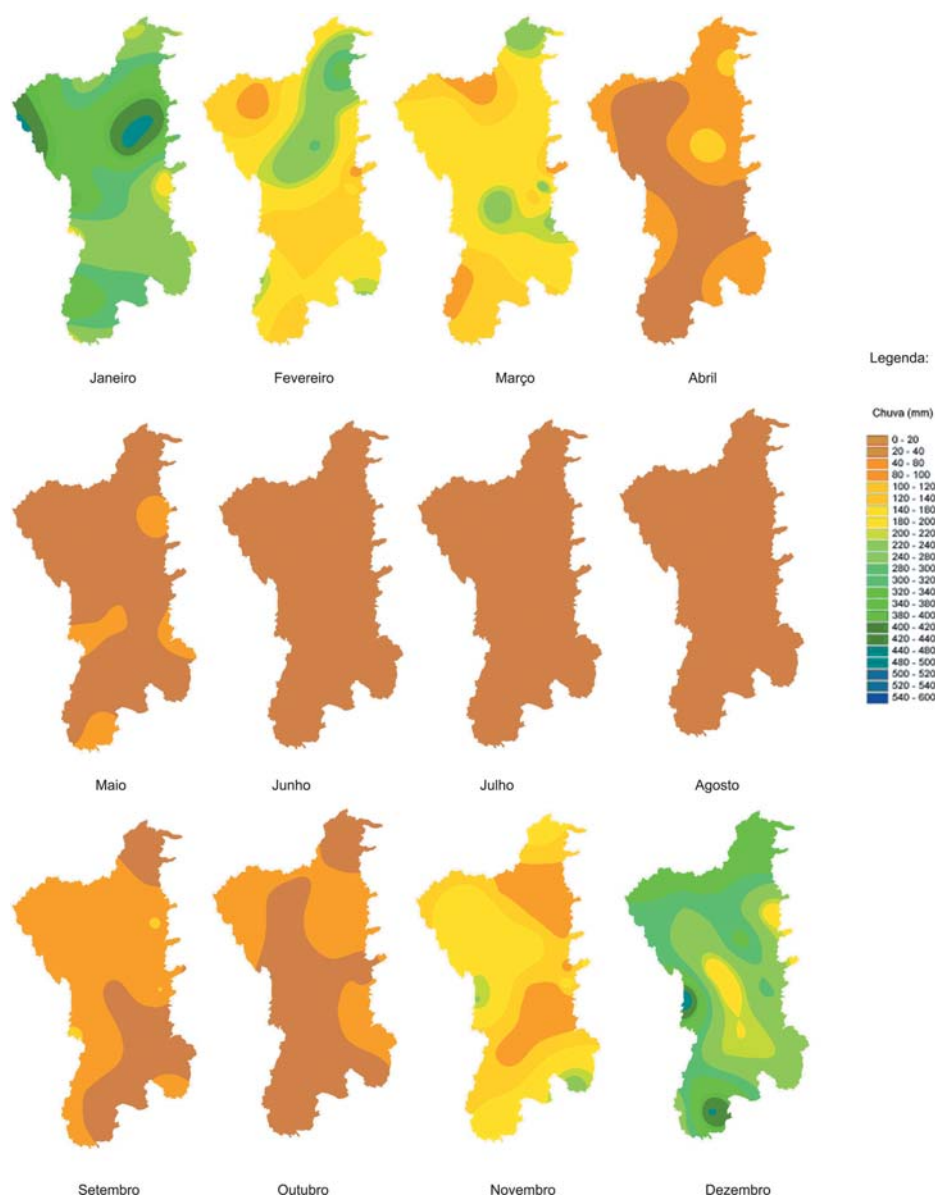


Figura 4 – Imagens pluviométricas da bacia do rio Paranã interpolado pelo método TOPOGRID relativo aos doze meses.

pelo mapa de vegetação do programa de Zoneamento Econômico e Ecológico (ZEE) de Tocantins, na escala 1:250.000, relativo apenas à parte norte da bacia do Paranã (Figura 8).

Observa-se que o espectro da Mata Seca apresenta um comportamento característico, possuindo o maior valor de NDVI na estação chuvosa e o menor valor na estação seca em relação às outras fitofisionomias do Cerrado (Figura 9). É importante salientar que o índice pluviométrico ao longo do ano apresenta na área de ocorrência de Mata Seca uma baixa variância espacial não promovendo, assim, uma variação local do índice NDVI. Desta forma,

a variação espacial do índice NDVI torna-se dependente das características de deciduidade do tipo de vegetação presente.

A partir da análise do espectro temporal pode-se distinguir as imagens relativas à maior diferença de NDVI para a Mata Seca (Figura 10). A utilização da detecção de mudança pela técnica de subtração enfatiza a ocorrência de Mata Seca como as células de maior brilho na imagem. No entanto, deve-se atentar que eventuais pontos claros isolados podem corresponder às áreas agrícolas, que geralmente são identificados pelo padrão espacial de parcelas. Portanto, a Mata Seca caracteriza-se pela maior

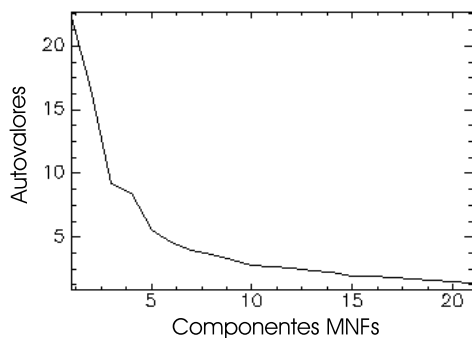


Figura 5 – Gráfico de autovalores da transformação MNF para imagens NDVIs evidenciando a concentração de informação nas sete primeiras bandas.

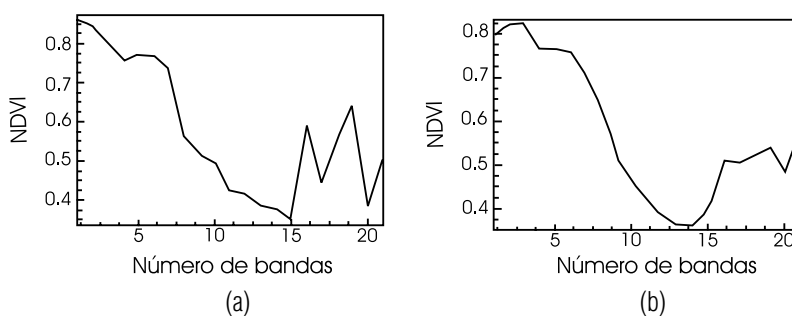


Figura 6 – Série temporal contínua NDVI (a) original com presença de ruído e com alta variação, e (b) espectros suavizados pela transformação MNF.

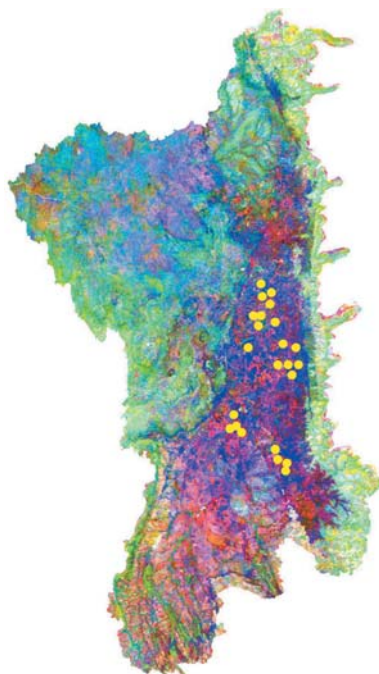


Figura 7 – Composição colorida das três primeiras componentes MNF (R-1ª MNF /G-2ª MNF /B-3ª MNF). Os pontos em amarelo correspondem aos locais levantados em campo com a presença da Mata Seca.

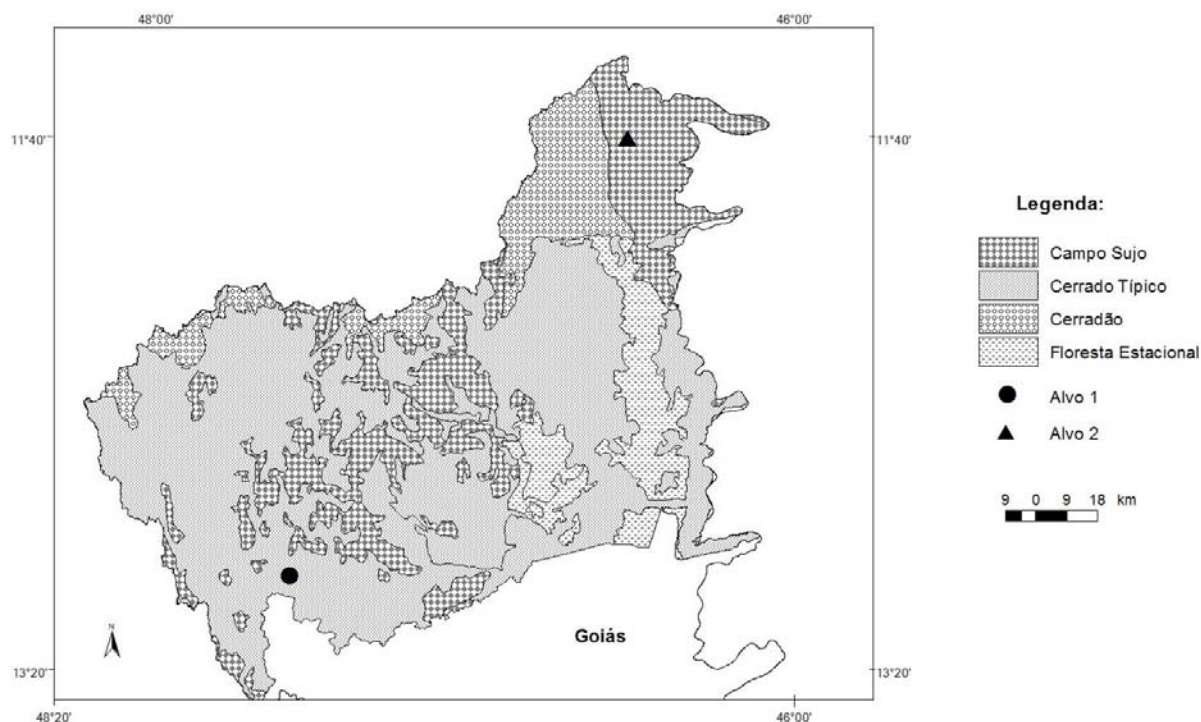


Figura 8 – Mapa de vegetação de parte da bacia localizada no estado de Tocantins com localização dos alvos relativos ao cerrado típico (alvo1) e campo sujo (alvo2).

variação natural de NDVI entre as fitofisionomias do Cerrado, presentes na Bacia do Paranã. A distribuição observada possui uma grande similaridade com os polígonos de Mata Seca estipulados por pesquisadores do Centro Nacional de Pesquisa de Recursos Genéticos e Biotecnologia da EMBRAPA, no âmbito do projeto “Conservação das Florestas Estacionais Deciduais do Vale do Paranã”. Isso demonstra a eficiência da técnica para identificar as áreas de ocorrência dessa formação florestal em escala regional.

CONCLUSÃO

No presente trabalho foi desenvolvido um procedimento metodológico para a detecção da formação florestal de Mata Seca na Bacia do rio Paranã utilizando técnicas de processamento digital de imagens multitemporais. A metodologia adotada buscou definir assinaturas temporais do NDVI balizadas por dados de distribuição de chuva tanto espacialmente quanto temporalmente.

Os espectros de NDVI multitemporais sofreram tratamento de ruído pela transformação MNF. Esse método permite eliminar os ruídos do espectro favorecendo a análise espectral de forma eficaz, simples e rápida. O método MNF também permite gerar componentes que enfatizam os diferentes comportamentos de alvos ao longo do tempo. Composições coloridas das componentes MNF

de sinal salientam também padrões distintos para a Mata Seca.

A Mata Seca apresenta um comportamento espectral do NDVI multitemporal típico sendo os valores mais altos na época de chuva e mais baixos na época de estiagem, diferenciando-se dos demais tipos de vegetação. Constatou-se que o emprego da detecção de mudança por subtração permitiu delimitar a região de Mata Seca que se caracteriza por apresentar os valores mais altos em relação às demais vegetações naturais. Essa abordagem permite diferenciar as características sazonais da vegetação e mostrou-se eficaz para a delimitação regional da Mata Seca.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido durante a realização deste trabalho das seguintes instituições: Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (FINATEC) pelo apoio logístico; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento de bolsas de pesquisa aos professores e à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de mestrado da autora, desenvolvido no Curso de Pós-Graduação em Geografia. Agradecemos especialmente ao pesquisador Alexandre Bonesso Sampaio e aos demais pesquisadores da EMBRAPA CENARGEM que participam do projeto “Conservação das Flores-

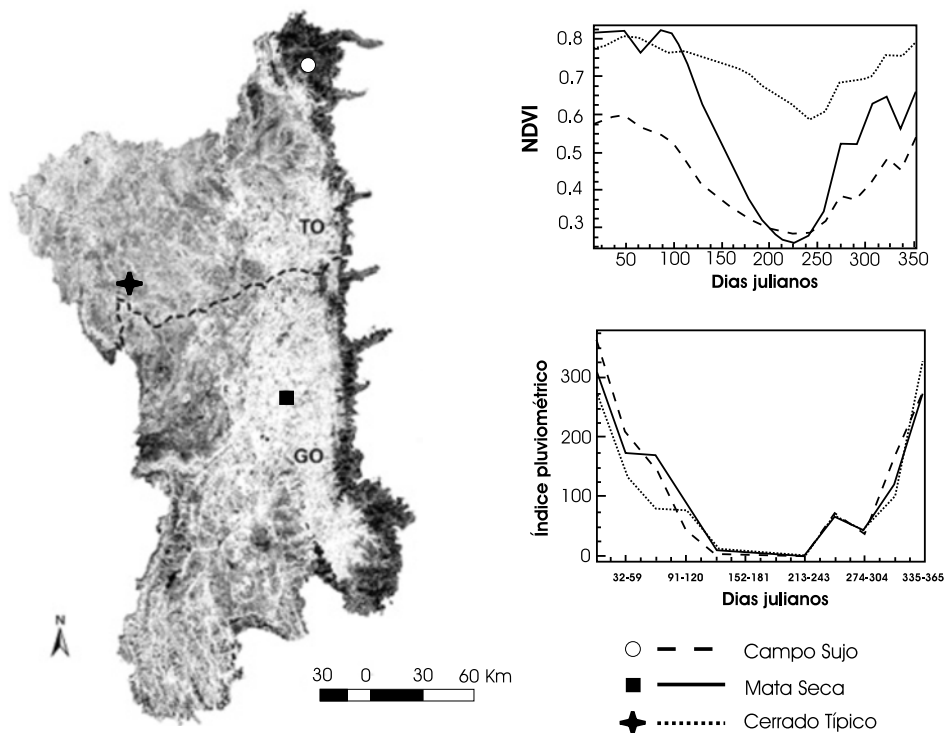


Figura 9 – Localização e comportamento espectral NDVI multitemporal da Mata Seca, Campo sujo e Cerrado Típico.

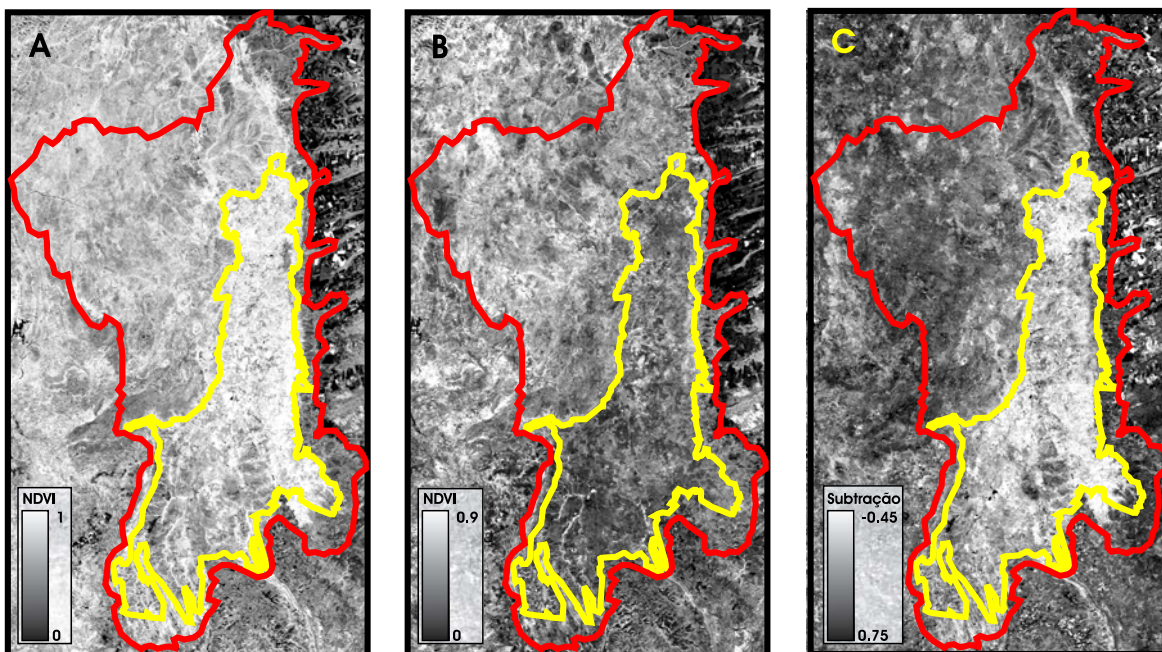


Figura 10 – Imagens do sensor MODIS do índice NDVI relativas à: (a) época chuvosa com valor máximo de NDVI para a Mata Seca, (b) época seca com valor mínimo de NDVI para a Mata Seca e (c) diferença entre os dois períodos. O polígono vermelho refere-se ao limite da bacia do Paran  enquanto o polígono amarelo   a área de Mata Seca estipulado pelo Centro Nacional de Pesquisa de Recursos Genéticos e Biotecnologia da EMBRAPA.

tas Estacionais Deciduais do Vale do Paraná” pelo apoio científico e auxílio prestado em campo.

REFERÊNCIAS

- ADÁMOLI J, MACEDO J, AZEVEDO LG & MADEIRA NETTO J. 1987. Caracterização da região dos Cerrados. In: GOEDERT WJ (Ed.). So- los dos Cerrados: tecnologias e estratégias de manejo. Planaltina: EMBRAPA – CPAC; São Paulo: NOBEL, 33–98.
- ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. 2005. Sistema de Informa- ções Hidrológicas. Brasília: ANA. Disponível em: <[http://hidroweb. ana.gov.br/HidroWeb](http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb)>. Acesso em: 20 mar. 2005.
- ANDAHUR JP. 2001. Florestas e questões de gestão ambiental na ba- cia do rio Paraná. Dissertação de Mestrado, Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília, 71 pp.
- ANDERSON GL, HANSON JD & HAAS RH. 1993. Evaluating Landsat Thematic Mapper derived vegetation indices for estimating above-ground biomass on semiarid rangelands *Remote Sensing of Environment*, 45(2): 165–175.
- ASNER GP. 1998. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 64: 234–253.
- ASSAD ED, CASTRO LHR & ALMEIDA SAO. 1996. Análise exploratória da variação espaço temporal do índice de vegetação NOAA/AVHRR e plu- viometria: caso dos Cerrados brasileiros. Anais do 8º Simpósio Brasi- leiro de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos: INPE, 491–493, Salvador, BA.
- BRASWELL BH, SCHIMEL DS, LINDER E & MOORE B III. 1997. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature va- riability. *Science*, 278: 870–872.
- BYRNE GF, CRAPPER PF & MAYO KK. 1980. Monitoring land-cover change by principal component analysis of multitemporal Landsat data, *Remote Sensing of Environment*, 10: 175–184.
- CARVALHO JÚNIOR OA, CARVALHO APF, MENESES PR & GUIMARÃES RF. 2002. Classificação e eliminação dos ruídos em imagens hiperes- pectrais pela análise sequencial da transformação por fração de ruído mínima. *Revista Brasileira de Geofísica*, 20(1): 31–41.
- 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 pp.
- CASTRO PTA. 1997. Os conglomerados da borda SW do Cráton do São Francisco junto a porção S da Faixa Brasília: sedimentologia e relações estratigráficas com as rochas do Grupo Bambuí. Tese de Doutorado, Ins- tituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 246 pp.
- CASTRO PTA. & DARDENNE MA. 2000. The sedimentology stratigraphy and tectonic context of the São Francisco Supergroup at the southern boundary of the São Francisco craton, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30: 345–437.
- COINER JC. 1980. Using Landsat to monitor changes in vegetation cover induced by desertification processes. Proceeding of the 14th Internatio- nal Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor, MI: En- vironmental Research Institute of Michigan, San Jose, Costa Rica, 3(4): 1341–1351.
- CONTI JB & FURLAN SA. 1998. Geoecologia: o clima, os solos e a bi- ota. In: ROSS JLS (Ed.), *Geografia do Brasil*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo – EDUSP, 67–208 pp.
- COPPIN PR & BAUER ME. 1994. Processing of multitemporal Landsat TM imagery to optimize extraction of forest cover change features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60(3): 287–298.
- COSTA IC, BRAGA CC, MELO MLD & VENTURA ED. 2003. Interligação entre índice de vegetação derivado do satélite NOAA e precipitação nos Estado da Paraíba. Anais do 11º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos: INPE, Belo Horizonte, MG. 1289–1295.
- CURRAN PJ. 1983. Multispectral remote sensing for the estimation of green leaf area index. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 309(1508): 257–269.
- DARDENNE MA. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. Anais XXX Congr. Bras. Geol., 2: 597–610. Recife, PE.
- DARDENNE MA. 1981. Os grupos Paranoá e Bambuí na Faixa Dobrada Brasília. Anais do 1º Simpósio do Cráton São Francisco e Suas Faixas Marginais, 140–157, Salvador, BA.
- DE FRIES R & TOWNSHEND JRG. 1994. NDVI derived land cover clas- sification at global scales. *International Journal of Remote Sensing*, 15(17): 3567–3586.
- DE FRIES R, HANSEN M & TOWNSHEND JRG. 1995. Global discrimi- nation of land cover types from metrics derived from AVHRR pathfinder data. *Remote Sensing of Environment*, 54: 209–222.
- DONG J, KAUFMANN RK, MYNENI RB, TUCKER CJ, KAUPPI PE, LISKI J, BUERMANN W, ALEXEYEV V & HUGHES MK. 2003. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks. *Remote Sensing of Environment*, 84: 393–410.
- DRUCK S. 2002. A geoestatística e os Sistemas de Informações Geográficas. *Espaço & Geografia*, 5(1): 1–15.
- EITEN G. 1972. The cerrado vegetation of Brazil. *Botanical Review*, 38(2): 201–341.
- EVANGELISTA BA. 2004. Aplicações geoestatísticas na análise da precipitação pluviométrica no estado de Goiás e Distrito Federal. Brasília: Dissertação de mestrado, Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 112 pp.

- FLORENZANO TG. 2002. *Imagens de Satélite para Estudos Ambientais*. São Paulo: Oficina de Textos, 97 pp.
- FUNG T & LEDREW E. 1987. Application of principal components analysis to change detection, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53(12): 1649–1658.
- FUNG T. 1990. An assessment of TM imagery for land-cover change detection, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(4): 681–684.
- GONG P, LEDREW EF & MILLER JR. 1992. Registration-noise reduction difference images for change detection. *International Journal of Remote Sensing*, 13: 773–779.
- GOWARD SN, TUCKER CJ & DYE DG. 1985. North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer. *Vegetation*, 64: 3–14.
- 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.
- GUARINO ESG. 2004. *Germinação de sementes e estabelecimento de plântulas de árvores em florestas estacionais decíduas e pastagens abandonadas*. Dissertação de mestrado, Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília, 66 pp.
- 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.
- HUTCHINSON MF. 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 106: 211–232.
- IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. 1991. *Programa Nacional de Conservação e Desenvolvimento Florestal Sustentado*. Brasília, 94 pp.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 1991. *Manual técnico da vegetação Brasileira*. (Manuais Técnicos de Geociências, n.1). Rio de Janeiro: IBGE, 92 pp.
- INGEBRITSEN SE & LYON RJP. 1985. Principal components analysis of multitemporal image pairs, *International Journal of Remote Sensing*, 6(5): 687–696.
- IVANAUSKAS NM & RODRIGUES RR. 2000. Florística e fitossociologia de remanescentes de floresta estacional decidual em Piracicaba, São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Botânica*, 23(3): 291–304.
- JUSTICE CO, TOWNSHEND JRG, VERMOTE EF, MASUOKA E, WOLFE RE, SALEOUS N, ROY DP & MORISSETTE JT. 2002. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 83: 3–15.
- KUMAR M & MONTEITH JL. 1981. Remote sensing of crop growth. In: SMITH H (Ed.) *Plants and the daylight spectrum*. London: Academic Press, 133–144.
- 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.
- LI J, LEWIS J, ROWLAND J, TAPPAN G & TIESZEN LL. 2004. Evaluation of land performance in Senegal using multi-temporal NDVI and rainfall series. *Journal of Arid Environments*, 59: 463–480.
- LIU HQ & 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.
- LYON JG, YUAN D, LUNETTA RS & ELVIDGE CD. 1998. A change detection experiment using vegetation indices. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 64: 143–150.
- MANAVALAN P, KESAVASAMY K & ADIGA S. 1995. Irrigated crops monitoring through seasons using digital change detection analysis of IRD-LISS 2 data. *International Journal of Remote Sensing*, 16: 633–640.
- MARTINS-NETO MA, PEDROSA-SOARES AC & LIMA SAA. 2001. Tectono-sedimentary evolution of sedimentary basins from Late Paleoproterozoic to Late Neoproterozoic in the São Francisco Craton and Araçuaí Fold belt, Eastern Brazil. *Sedimentary Geology*, 141/142: 343–370.
- MISI A. 2001. Estratigrafia isotópica das seqüências do supergrupo São Francisco, coberturas neoproterozóicas do cráton do São Francisco – idade e correlações. In: PINTO CP & MARTINS-NETO MA (Ed.), *Bacia do São Francisco – Geologia e Recursos Naturais*. Belo Horizonte: SBGMG, 67–92.
- MIURA T, HUETE AR, FERREIRA LG & SANO EE. 2003. Discrimination and biophysical characterization of Cerrado physiognomies with EO-1 hyperspectral Hyperion. *Anais do IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 1077–1082. Belo Horizonte – MG.
- 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.
- MOTTA JLG, FONTANA DC & WEBER E. 2003. Análise da evolução temporal do NDVI/NOAA em região de soja no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, 11(2): 353–369.
- MYNENI RB, KEELING CD, TUCKER CJ, ASRAR G & NEMANI RR. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386: 698–702.
- MYNENI RB, DONG J, TUCKER CJ, KAUFMANN RK, KAUPPI PE, LISKI J, ZHOU L, ALEXEYEV V & HUGHES MK. 2001. A large carbon sink

- in the woody biomass of northern forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98: 14784–14789.
- NELSON RF. 1983. Detecting forest canopy change due to insect activity using Landsat MSS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49: 1303–1314.
- PALTRIDGE GW & BARBER J. 1988. Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA/AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 25: 381–394.
- PEDRALLI G. 1997. Florestas secas sobre afloramentos de calcário em Minas Gerais: florística e fisionomia. *Bios*, 5(5): 81–88.
- PEREIRA BAS, MECENAS VV, LEITE FQ & CARDOSO ES. 1996. APA da Cafuringa: o retrato do cerrado. Brasília: Paralelo 15, 126 pp.
- PRINCE SD. 1991a. A model of regional primary production for use with coarse-resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 12: 1313–1330.
- PRINCE SD. 1991b. Satellite remote sensing of primary production: Comparison of results for Sahelian grasslands 1981–1988. *International Journal of Remote Sensing*, 12: 1301–1311.
- PRINCE JC. 1992. Estimating vegetation amount from visible and near infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 41: 29–34.
- RAMOS PCM. 1989. Estudos fitossociológicos em uma floresta mesofítica semidecídua na Fercal, Brasília-DF. Dissertação de mestrado, Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília, 145 pp.
- RIBEIRO JF & WALTER BMT. 1998. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO SM & ALMEIDA SP (Ed.). *Cerrado: ambiente e flora*. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 89–166.
- RIZZINI CT. 1979. *Tratado de Fitogeografia do Brasil. Aspectos sociológicos e florísticos II*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo – HUCITEC, 374 pp.
- ROUSE JW, HAAS RH, SCHELL JA & DEERING DW. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Proceedings of the Third ERTS Symposium*, NASA SP-351, NASA, Washington, DC, Vol. 1, p. 309–317.
- RUNNING SW, LOVELAND TR, PIERCE LL, NEMANI RR & HUNT ERJ. 1995. A remote sensing based vegetation classification logic for global land cover analysis. *Remote Sensing of Environment*, 51(1): 39–48.
- SADER SA, STONE TA & JOYCE AT. 1990. Remote sensing of tropical forests: an overview of research and applications using nonphotographic sensors. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56: 1343–1351.
- SAMPAIO AB. 2001. Efeito de borda nas espécies arbóreas de uma floresta estacional decidual no Vale do Paranã. Dissertação de mestrado, Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília, 82 pp.
- SANO EE, BARCELLOS AO & BEZERRA HS. 2001. Assessing the spatial distribution of cultivated pastures in the Brazilian savanna. *Pasturas Tropicales*, 22(3): 2–15.
- SANO SM & ALMEIDA SP. 1998. *Cerrado: ambiente e flora*. Planaltina: EMBRAPA – CPAC, 556 pp.
- SELLERS PJ. 1987. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence. *International Journal of Remote Sensing*, 6: 1335–1372.
- SILVA LA & SCARIOT A. 2003. Composição florística e estrutura da comunidade arbórea em uma floresta estacional decidual em afloramento calcário (Fazenda São José, São Domingos, GO, bacia do rio Paranã). *Acta Botanica Brasílica*, 17(2): 305–313.
- SINGH A. 1989. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 10: 989–100.
- 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.
- TOMAZ FILHO A, KAWASHITA K & CORDANI UG. 1998. A origem do Grupo Bambuí no contexto da evolução geotectônica e de idades radiométricas. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 70(3): 527–548.
- TUCKER CJ. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8: 127–150.
- TUCKER CJ, NEWCOMB WW, LOS SO & PRICE SD. 1991. Mean an inter-year variation of growing season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989. *International Journal of Remote Sensing*, 12: 1133–1135.
- VELOSO HP, RANGEL FILHO ALR & LIMA JC. 1991. Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal. Rio de Janeiro: IBGE – Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 124 pp.
- VIEIRA DLM. 2002. Efeitos da exploração madeireira na estrutura populacional e regeneração de árvores de floresta estacional decidual. Dissertação de mestrado, Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília, 63 pp.
- WEISMILLER RA, KRISTOF SJ, SCHOLZ PE, ANUTA PE & MOMIN SA. 1977. Change detection in coastal zone environments. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43: 1533–1539.
- WESSELS KJ, PRINCE SD, FROST PE & VAN ZYL D. 2004. 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*, 91: 47–67.
- YUAN D & ELVIDGE C. 1998. NALC land cover change detection pilot study: Washington D.C. area experiments. *Remote Sensing of Environment*, 66: 166–178.

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.

Potira Meirelles Hermuche. Recebeu o título de geógrafa pela Universidade de Brasília em 2002 e o grau de mestre em geografia pela Universidade de Brasília em 2005. Atualmente é pesquisadora no Departamento de Geografia no Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais. Possui como principais linhas de pesquisa o sensoriamento remoto. Durante o seu curso de mestrado foi bolsista da CAPES.

Renato Fontes Guimarães. Recebeu o título de engenheiro cartógrafo pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro em 1987, o grau de mestre em geofísica pelo Observatório Nacional em 1991 e o grau de doutor em geologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2000. Atualmente é professor Adjunto do Departamento de Geografia e chefe do Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais do Departamento de Geografia. Possui como principais linhas de pesquisa o sensoriamento remoto e a modelagem matemática dos processos erosivos. É bolsista de produtividade e pesquisa do CNPq.