



INTEGRAÇÃO DE PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS E IMAGEM ASTER PARA A DELIMITAÇÃO DAS FITOFISIONOMIAS DA SERRA DA CANASTRA, PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA, MG

Antonio Felipe Couto Junior

Universidade de Brasília, Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais - Departamento de Geografia - ICC Ala Norte - Asa Norte - Brasília-DF - Cep 70910-900 - e-mail: antoniofelipejr@gmail.com

Vinicius Vasconcelos de Souza

Universidade de Brasília, Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais - Departamento de Geografia - ICC Ala Norte - Asa Norte - Brasília-DF - Cep 70910-900 - e-mail: vinicius.vascoza@gmail.com

Osmar Abílio de Carvalho Junior

Professor Adjunto - Universidade de Brasília, Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais - Departamento de Geografia - ICC Ala Norte - Asa Norte - Brasília-DF - Cep 70910-900 - e-mail: osmarjr@unb.br

Eder de Souza Martins

Pesquisador - Embrapa Cerrados, BR 020, km 18 - Rod. Brasília-Fortaleza - Planaltina-DF - Caixa Postal 08223 - Cep 73310-970 - e-mail: eder@cpac.embrapa.br

Otacílio Antunes Santana

Universidade de Brasília, Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais - Departamento de Geografia - ICC Ala Norte - Asa Norte - Brasília-DF - Cep 70910-900 - e-mail: otaciliosantana@gmail.com

Leonardo Figueiredo Freitas

Universidade de Brasília, Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais - Departamento de Geografia - ICC Ala Norte - Asa Norte - Brasília-DF - Cep 70910-900 - e-mail: leoffreitas@yahoo.com.br

Roberto Arnaldo Trancoso Gomes

Professor Adjunto - Universidade de Brasília, Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais - Departamento de Geografia - ICC Ala Norte - Asa Norte - Brasília-DF - Cep 70910-900 - e-mail: robertogomes@unb.br

Resumo

Este trabalho teve como objetivo delimitar as fitofisionomias utilizando parâmetros morfométricos e imagens do sensor ASTER na Serra da Canastra, Parque Nacional da Serra da Canastra, MG. Foram identificadas fitofisionomias através das observações de campo: ambientes rupestres (Campo Rupestre + Cerrado Rupestre), Campo Limpo, Campo Sujo, Cerrado Sentido Restrito, Mata de Galeria + áreas de drenagem. Os parâmetros morfométricos, obtidos do Modelo Digital de Terreno (MDT), foram dispostos em gráficos de dispersão tridimensional com o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e com o Normalized Difference Water Index (NDWI). Estes gráficos evidenciaram cinco conjuntos de dados, representando as fitofisionomias encontradas em campo. Foi observada uma variação espectral correspondente aos membros finais: Vegetação Fotossinteticamente Ativa (VFA) e Vegetação Não Fotossinteticamente Ativa (VNFA). Das fitofisionomias agrupadas o Campo Limpo foi a mais abrangente (60,45%) e a única que faz limite com todas as demais, seguido por ambientes rupestres (21,02%), Campo Sujo (12,40%), Mata de Galeria e Campo Úmido (4%), e Cerrado Sentido Restrito (1,90%). Os perfis topográficos obtidos a partir da integração da classificação espectral e do MDT permitiram evidenciar a distribuição da vegetação em relação ao relevo.

Palavras-chave: parâmetros morfométricos, mapa de fitofisionomias, perfis topográficos

Abstract

This work aimed to delimit the phytophysiognomies using morphometric patterns and images acquired by ASTER sensor in the Serra da Canastra, Serra da Canastra National Park, MG. The phytophysiognomies were identified in the field observations: outcrops environments (Campo Rupestre + Cerrado Rupestre), Campo Limpo, Campo Sujo, Cerrado Sentido Restrito, Vegetação Hidromórfica (Mata de Galeria+Áreas de Drenagem). The morphometric patterns, obtained from the Digital Terrain Model (DTM), were disposed in 3D scatter plot with the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Normalized Difference Water Index (NDWI). This scatter evidenced five data groups, representing the phytophysiognomies found in field observation. A spectral variation was observed, corresponding to the endmembers: Active Photosynthetic Vegetation (VFA) and Non Active Photosynthetic Vegetation (VNFA). The Campo Limpo (60.45%) was the most common and the only that make frontier with all phytophysiognomies, followed by the Ambiente Rupestre (21.02%), Campo Sujo (12.40%), and Mata de Galeria and Campo Úmido (4%), and Cerrado Sentido Restrito (1.90%). Topographic profiles obtained from the integration of the phytophysiognomies and the DTM evidenced the vegetation distribution through the relief.

Keywords: morphometric patterns, phytophysiognomies, topographic profiles

Introdução

Associações entre as condições ambientais e os solos, proporcionados pela geomorfologia local, são fatores determinantes para estabelecimento de fitofisionomias (Newbery e Proctor, 1984; Clark, 2002). Estudos realizados na África e na América Central mostraram que as características edáficas, e por fatores de declividade e altitude, influenciam na distribuição das espécies arbóreas, e consequentemente as unidades de paisagens (Newbery e Proctor, 1984; Basnet, 1992; Johnston, 1992; Clark et al. 1995, 1998, 1999; Swaine, 1996; Clark, 2002). A mesma relação foi observada em trabalhos que relacionam os tipos de solo, aspectos geomorfológicos e fisionomias do Bioma Cerrado (Felfili e Silva Júnior, 1993; Felfili et al., 1998; Ribeiro e Walter, 1998). Áreas em condições semelhantes de clima, altitude e tipo de solo apresentam maiores similaridades florísticas (Salis et al. 1995; Torres et al. 1997).

O Cerrado abrange 23% do território brasileiro, ocupando aproximadamente 2 milhões de quilômetros quadrados na América do Sul (Ribeiro e Walter, 1998). Em sua área é possível observar uma grande diversidade de solos, geologia, clima e tipos de vegetação (Silva et al., 2006). Apresenta alta diversidade em espécies vegetais e em fitofisionomias, abrangendo desde fisionomias campestres, como o Campo Limpo, até florestais, como o cerradão, e passando por formas intermediárias, como o Campo Sujo, Campo Cerrado e Cerrado sensu stricto (Coutinho, 1978; Castro et al., 1999). Essa diversidade fitofisionômica tem sido relacionada à variação de características edáficas, dentre elas, principalmente a disponibilidade de nutrientes e o teor de alumínio no solo (Alvim e Araújo, 1952; Goodland e Pollard, 1973; Ratter et al., 1977; Silva Júnior et al., 1987; Haridasan, 2000). Alguns autores também sugeriram uma relação entre fitofisionomias e a topografia (Gibbs et al.,

1983; Oliveira Filho e Martins, 1986; Furley e Ratter, 1988; Oliveira Filho et al., 1989; Furley, 1996), bem como à dinâmica da água no solo (Oliveira Filho e Martins, 1986; Oliveira Filho et al., 1989; 1997).

Os fatores geomorfológicos influenciam nos aspectos morfológicos do relevo e microclimáticos (irradiação, radiações incidentes, precipitação, temperatura do ar e do solo, declive, nutrientes, pressão do vento e distúrbios meteorológicos), ocasionando uma heterogeneidade espacial da vegetação e da paisagem (Ustin et al., 2004a). Outro fator importante é a ocorrência dos movimentos de massa, os quais afetam na distribuição da vegetação (Hoersch et al., 2002). Desta forma, o fator topográfico, o clima e a dinâmica do relevo induzem a formação de diferentes habitats ecológicos, proporcionando o desenvolvimento de um mosaico de fisionomias vegetais (Serrano et al., 2000; Hoersch et al., 2002; Ustin et al., 2004b). Eiten (1972, 2001) foi um dos primeiros autores a classificar os tipos fitofisionômicos para o Cerrado, principalmente pela densidade arbórea, e posteriormente pela espacialização da vegetação ao longo de gradientes e topossequências.

Com o propósito de caracterizar e identificar habitats em áreas de topografia variada, muitos trabalhos utilizam técnicas de processamento de imagens integradas a modelo digitais do terreno (MDT), mostrando-se uma satisfatória e significativa ferramenta para delimitação de fitofisionomias (Austin et al., 1996; Carvalho Júnior et al., 2008; Florinsky, 1998; Ustin et al., 1996).

O objetivo deste trabalho foi delimitar as fitofisionomias utilizando parâmetros morfométricos e imagens do sensor Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) na Serra da Canastra, Parque Nacional da Serra da Canastra, MG.

Área de Estudo

A Serra da Canastra localiza-se dentro do Parque Nacional da Serra da Canastra, situando-se na porção sudoeste de Minas Gerais nos limites dos municípios de São Roque de Minas e uma pequena porção inserida em Sacramento (Figura 1).

O clima da região é caracterizado por duas estações bem definidas: uma chuvosa durante o verão e uma mais seca durante o inverno. A temperatura média do mês mais frio é inferior a 18° C e a do mês mais quente não ultrapassa 22° C. Segundo estudos de Souza (1993), a área apresenta características de pluviosidade anual entre 1.000 e 1.500mm.

De acordo com Ab'Saber (1970) a Serra da Canastra pertence ao domínio dos chapadões tropicais interiores com cerrados e florestas de galeria. A região é parte do domínio

morfoestrutural dos remanescentes de cadeias dobradas, composto pelo subdomínio da região dos planaltos da Canastra separando-se em Unidade Patamares da Canastra e Unidade Serra da Canastra (Gatto et al., 1983). Ross (1985) considera que a Serra da Canastra está inserida dentro da morfoestrutura dos planaltos e serras de Goiás-Minas. Esse domínio geomorfológico está associado à faixa de dobramentos Brasília, apresentando serras residuais das antigas dobras com alinhamento de cristas sustentadas com frequência por rochas metamórficas.

A maior parte da serra é coberta por formações campestres, que englobam três fitofisionomias: Campo Rupestre, Campo Limpo e Campo Sujo, Cerrado Sentido Restrito e Cerrado Rupestre (Ribeiro e Walter, 1998).

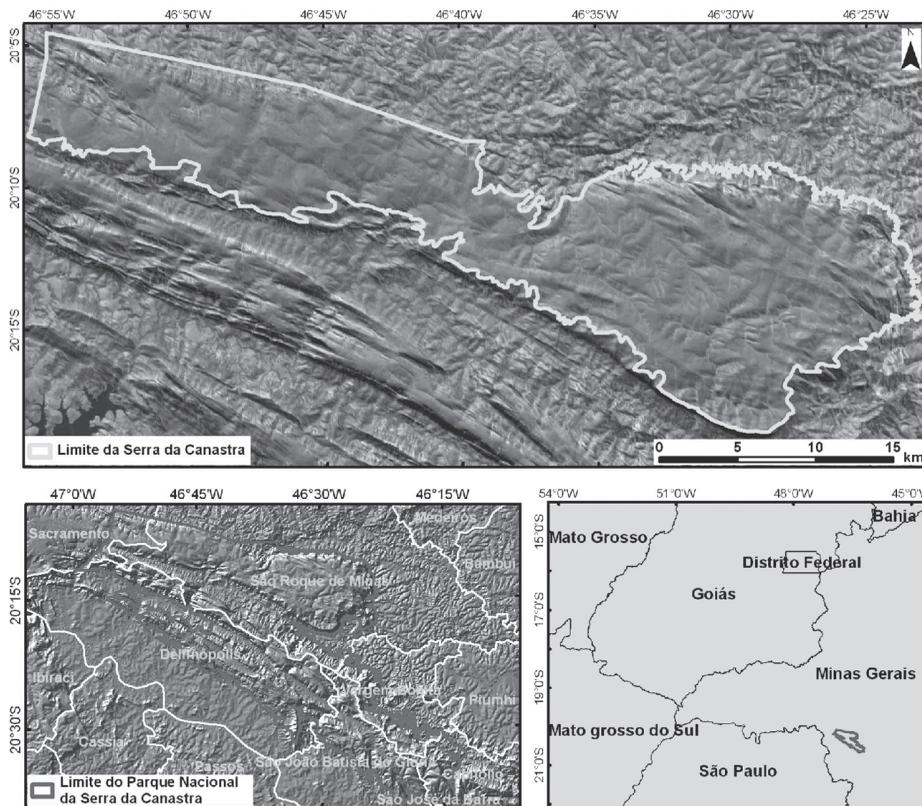


Figura 1 - Localização da Serra da Canastra (figura superior), imagem Landsat5 TM órbita/ponto: 220/074 datada de 20/06/2007 e sua localização dentro da área do Parque Nacional da Serra da Canastra, MG (figura inferior), imagem SRTM de 2000.

Materiais e Métodos

Modelo digital de terreno

Para a confecção do Modelo Digital de Terreno (MDT) foram utilizadas as folhas: SF-23-V-A-III-3, SF-23-V-A-III-4, SF-23-V-B-I-3, SF-23-V-A-III-1, SF-23-V-A-III-2, SF-23-

V-B-I-1. Esta base cartográfica foi obtida através da página eletrônica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE - www.ibge.gov.br) em formato digital na escala 1:50.000, contendo curvas de nível com equidistância de 20 metros, pontos cotados e hidrografia corrigidos. Foi realiza-

da a interpolação pelo método TOPOGRID presente no programa ArcGis 9.3, que emprega um algoritmo que conjuga tanto o esforço de manter as características hidrográficas, a remoção de dados espúrios relativos a pontos de depressões ou de elevações e uma técnica de interpolação por diferenças finitas (Hutchinson, 1989). O MDT foi gerado com uma resolução espacial de 10 metros. A partir deste MDT foram obtidos os seguintes parâmetros morfométricos: declividade e altimetria.

Imagem Aster

Para o mapeamento das fitofisionomias foi utilizado o produto AST07, obtido através da página eletrônica Global Visualization (USGS-GLOVIS - glovis.usgs.gov) já com a correção do efeito atmosférico (Thome et al., 1998). A primeira etapa foi a compatibilização das resoluções espaciais entre as imagens VNIR (15 metros) e as do SWIR (30 metros). Foi realizada a reamostragem espacial por vizinho mais próximo no programa ENVI 4.5 dos pixels das imagens do SWIR, gerando um produto final com 15 metros de resolução espacial. Após esta compatibilização foram gerados dois produtos: (a) índices de vegetação; e (b) classificação espectral.

Índices de vegetação

Os índices de vegetação minimizam as interferências relativas às variações provenientes do ângulo solar e dos efeitos atmosféricos, dentre eles encontram-se o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e o Normalized Difference Water Index (NDWI).

O NDVI é um índice desenvolvido para realçar a clorofila, variando entre -1 e 1, onde os valores mais altos referem-se às áreas com vegetação fotossinteticamente ativa. Este índice é definido pela seguinte equação (Rouse et al., 1973):

$$NDVI = (\rho_{IVP} - \rho_{VIS}) / (\rho_{IVP} + \rho_{VIS})$$

Onde ρ_{IVP} é a reflectância referente ao intervalo de comprimento de onda do infravermelho próximo, enquanto o ρ_{VIS} é a reflectância do intervalo de comprimento de onda do visível.

O NDWI é um índice desenvolvido para evidenciar o conteúdo de água na estrutura interna da folha. O NDWI é equivalente ao NDVI com o canal do IVP sendo substituído pelo infravermelho médio (IVM), sendo expresso pela seguinte equação (Gao, 1996):

$$NWVI = (\rho_{IVP} - \rho_{IVM}) / (\rho_{NIR} + \rho_{IVM})$$

A reflectância do IVM reflete as mudanças tanto no conteúdo de água da vegetação como da estrutura do mesófilo

esponjoso no dossel da vegetação, enquanto que a reflectância do IVP é afetada pela estrutura interna da folha e os teores de matéria seca, mas não pelo conteúdo de água. Desta forma, a combinação do IVP com o IVM remove as variações induzidas pela estrutura interna da folha e os teores de matéria seca, melhorando a precisão na recuperação do teor de água de vegetação (Ceccato et al. 2001; Zarco-Tejada et al. 2003).

Em contraposição, Ceccato et al (2002a, b) demonstra que o índice NDVI possui capacidade limitada para a detecção do teor de água da folha, devido aos seguintes motivos: (a) cada espécie de planta possui sua própria relação de clorofila e conteúdo de água na vegetação, (b) um decréscimo de conteúdo de clorofila não implica em um decréscimo de VMC; e (c) um decréscimo de conteúdo de água na vegetação não implica em um decréscimo de conteúdo de clorofila. Adicionalmente, o NDVI satura em valores intermediários de índice de área foliar, não podendo responder ao intervalo completo de conteúdo de água no dossel (Jackson et al. 2004). No presente trabalho o NDWI foi elaborado a partir da banda 3 (0,76 μm - 0,86 μm) e banda 4 (1,60 μm - 1,86 μm) do sensor ASTER.

Os índices de vegetação (NDVI e NDWI) foram comparados com os dados morfométricos (declividade e altimetria) utilizando gráficos tridimensionais. Nesta análise foram selecionados 50 pontos significativos e georreferenciados de observação em campo.

Classificação espectral

A identificação dos membros finais foi realizada conforme a metodologia proposta por Boardman e Kruse (1994), que pode ser subdividida nos seguintes passos: (a) redução dimensionalidade espectral pelo método Minimum Noise Fraction (MNF) (Green et al., 1988), (b) identificação automatizada dos pixels puros usando o método Pixel Purity Index (PPI) (Boardman e Kruse, 1994; Boardman et al., 1995), e (c) identificação manual dos membros finais a partir do visualizador N-dimensional (Boardman e Kruse, 1994). Essa metodologia é amplamente utilizada em trabalhos com imagens hiperespectrais, no entanto se mostra eficiente para imagens multiespectrais, como as imagens ASTER (Carvalho Junior et al., 2003).

A classificação espectral foi realizada a partir da aplicação do método Spectral Correlation Mapper (SCM) (Carvalho Junior e Meneses, 2000) utilizando os membros finais anteriormente encontrados. O SCM é um classificador espectral que apresenta vantagens sobre o método Spectral Angle Mapper (SAM) (Kruse et al., 1993) devido à capacidade de detectar falsos positivos, o SCM tem sido utilizado com eficiência para a identificação de vegetação (Bruce et al., 2007).

Além da classificação espectral foram utilizadas informações referentes aos 50 pontos de observação com posicionamento cartográfico por GPS, registro fotográfico e descrição fitofisionômica. Adicionalmente, um sobrevôo de helicóptero foi realizado para caracterização visual da relação relevo e vegetação.

Para demonstrar a associação proveniente da classificação espectral com os dados morfométricos foram gerados perfis topográficos a partir do MDT, utilizando o programa ArcGis 9.3, ao longo de topossequências representativas.

Resultados e Discussão

Relações dos parâmetros morfométricos e os índices de vegetação

Com as observações de campo foram encontradas as seguintes fitofisionomias: Campo Rupestre, Cerrado Rupestre, Campo Limpo, Campo Sujo, Cerrado Sentido Restrito, Mata de Galeria e Campo Úmido.

A análise do gráfico de dispersão tridimensional entre os parâmetros morfométricos e os índices de vegetação permitiram caracterizar a maioria das fitofisionomias observadas em campo (Figura 2). No entanto, dois grupos de fitofisionomias foram agrupados devido à similaridade dos parâmetros analisados: (a) Mata de Galeria e Campo Úmido, e (b) Cerrado Rupestre e Campo Rupestre.

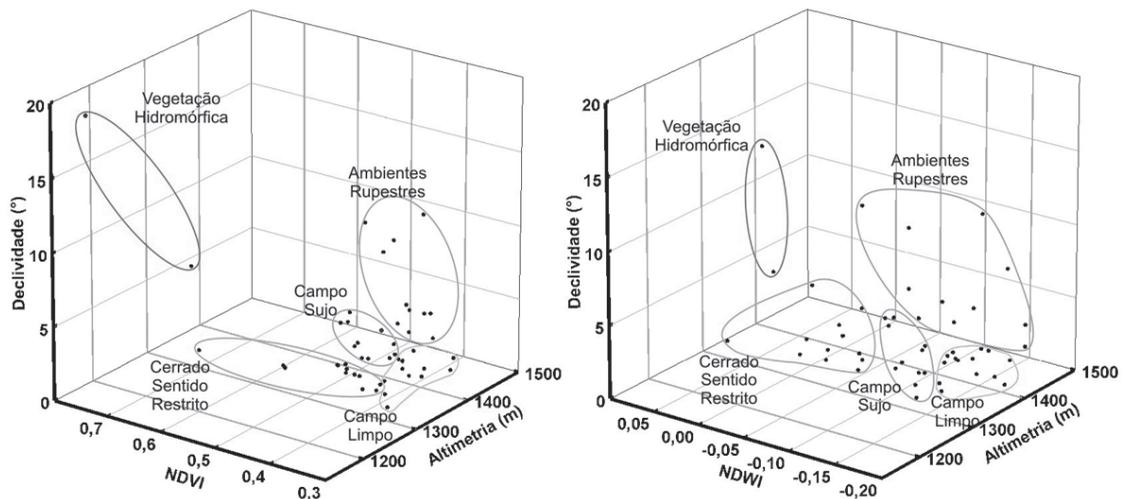


Figura 2 - Gráfico de dispersão tridimensional obtido a partir da compilação dos dados morfométricos associados aos índices de vegetação, NDVI (esquerda) e NDWI (direita).

Os gráficos com os eixos NDVI e NDWI apresentam-se complementares, sendo que o primeiro associa-se ao conteúdo de clorofila na vegetação e o segundo ao da água foliar. O NDWI evidenciou o comportamento crescente de água foliar do Campo Limpo para o Campo Sujo e por fim para o Cerrado Sentido Restrito. Esta relação retrata o aumento da quantidade do estrato arbóreo, que na época da seca (data de aquisição da imagem) mantém maior porcentagem de vegetação fotossinteticamente ativa do que o estrato herbáceo. As vegetações rupestres apresentaram maior proximidade de seus valores de NDWI com o Campo Limpo e Campo Sujo.

A Mata de Galeria e o Campo Úmido destacam-se das demais fitofisionomias por apresentar os maiores valores de NDVI e NDWI, proveniente de sua maior proporção de vegetação fotossinteticamente ativa (Figura 2). Em relação à Mata de Galeria, observa-se a possibilidade de seu desenvolvimento em área de declividade acima de 15°, relativo aos locais que sofreram processo de voçorocamento e solapamento (Figura 3). Os campos úmidos muitas vezes se desenvolvem ao longo de zonas de fratura que proporcionam armazenamento de água e acúmulo de umidade. Estes fatores ambientais provocam, normalmente, transições abruptas nas formações campestres (Ribeiro e Walter, 1998; Spera et al., 2005) (Figura 4).



Figura 3 - Estágios evolutivos ao longo de zonas de falha: (a) descontinuidade presente pela falha com presença de Campo Úmido, (b) desenvolvimento de voçorocas, e (c) estabilização das voçorocas e ocupação por Mata de Galeria.

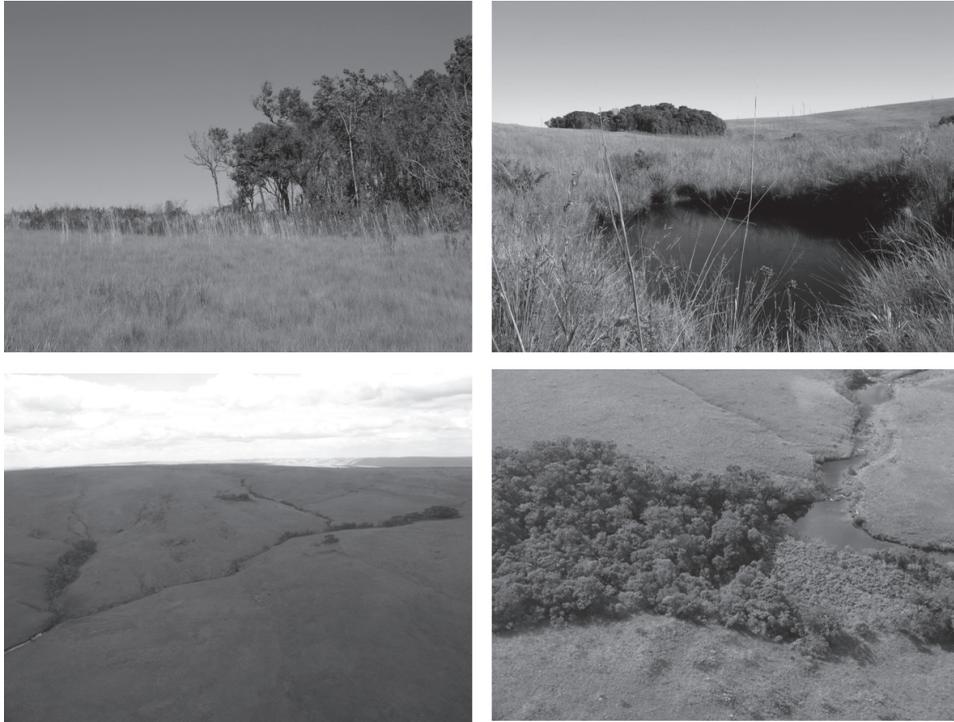


Figura 4 - Presença de vegetação de Mata de Galeria e Campo Úmido ao longo das fraturas, contrastando com o Campo Limpo, evidenciando uma ruptura abrupta dos solos.

Os ambientes rupestres, formado pela associação Campo Rupestre e Cerrado Rupestre, foram encontrados nas bordas da serra e em topos de planalto acima de 1300 metros. Aqueles associados às bordas da serra apresentaram

declividade de aproximadamente 12° em áreas de morros. Nos topos dos planaltos, estes ambientes foram observados em declividade menores que 6° em relevo de suave ondulado a ondulado (IBGE, 2007) (Figura 5).

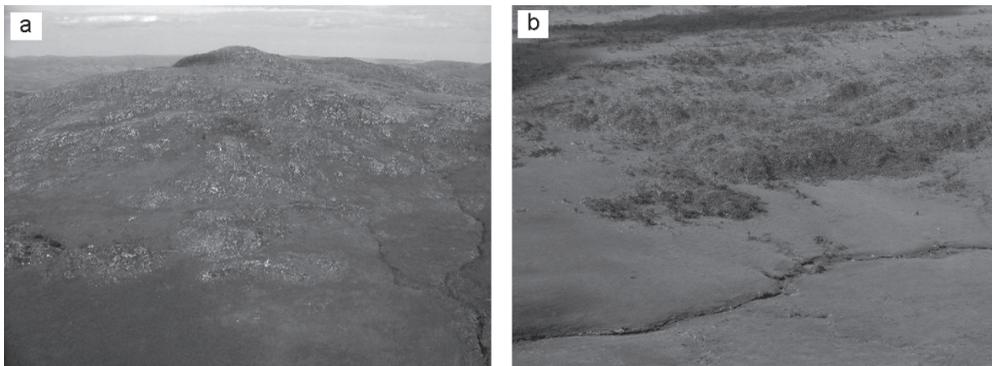


Figura 5 - Ambientes rupestres associados às bordas da serra (a) e topos dos planaltos (b).

O Campo Sujo e Cerrado Sentido Restrito apresentaram valores similares de altimetria e variações de NDVI e NDWI (Figura 2). De acordo com observações de campo, o Campo Sujo é caracterizado por uma vegetação arbustivo-herbácea esparsa (Figura 6), cujas plantas são menos desenvolvidas que

as árvores do Cerrado Sentido Restrito (Figura 7). Além disso, é possível constatar pela Figura 2, que o Campo Sujo teve uma maior variação de declividade que o Cerrado Sentido Restrito, sendo que essa diferença pode estar relacionada à formação de solo (Reatto et al., 2003; Teramoto et al., 2001).



Figura 6 - Campo Sujo com cobertura arbustivo-herbácea.



Figura 7 - Árvores retorcidas do Cerrado Sentido restrito e uma menor proporção de vegetação rasteira.

O Campo Limpo constituído predominantemente pelo estrato herbáceo com poucos arbustos e ausência de árvores, caracteriza-se por uma vegetação não fotossinteticamente ativa na época da seca. Desta forma, esta fitofisionomia é caracte-

terizada por ter os menores valores dos índices NDVI e NDWI (Figura 8). Além disso, demonstra a maior variação altimétrica dentre as fitofisionomias e uma menor variação de declividade, predominantemente, em relevo plano a suave ondulado.



Figura 8 - Vista panorâmica do Campo Limpo.

Resultado da classificação espectral

A variação espectral observada corresponde, principalmente, aos seguintes membros finais: Vegetação Fotossinteticamente Ativa (VFA) e Vegetação Não-Fotossinteticamente Ativa (VNFA) (Figura 9).

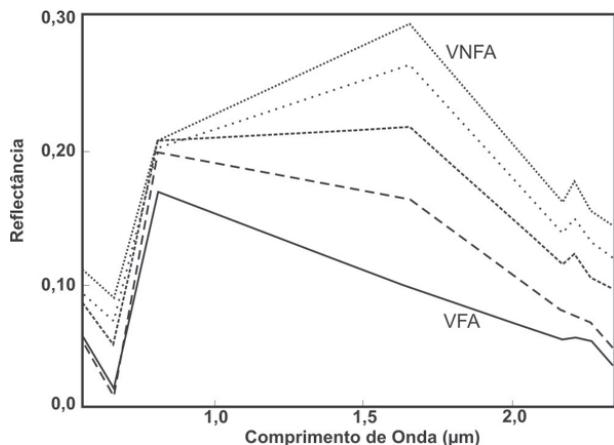


Figura 9 - Variação do comportamento espectral da vegetação fotossinteticamente ativa para vegetação não fotossinteticamente ativa.

A formação campestre, onde predominam espécies gramíneas, apresenta um comportamento sazonal onde, periodicamente, as partes aéreas ficam secas apresentando um comportamento espectral de VNFA (Figura 2). Quando a folha entra em processo de senescência ou estresse hídrico, apresenta redução no teor de clorofila, levando à redução da intensidade das bandas de absorção em 0,45mm – 0,65mm, ocasionando um aumento simultâneo da reflectância. Essas modificações não são devidas apenas a redução das feições de absorção da água, mas também às alterações estruturais que ocorrem na folha quando esta perde umidade. Na formação campestre observam-se incidências de queimadas devido ao acúmulo de biomassa combustível e pela ação direta de atividades humanas. O resultado da classificação espectral, interpretação visual e observações de campo podem ser vistas na Figura 10.

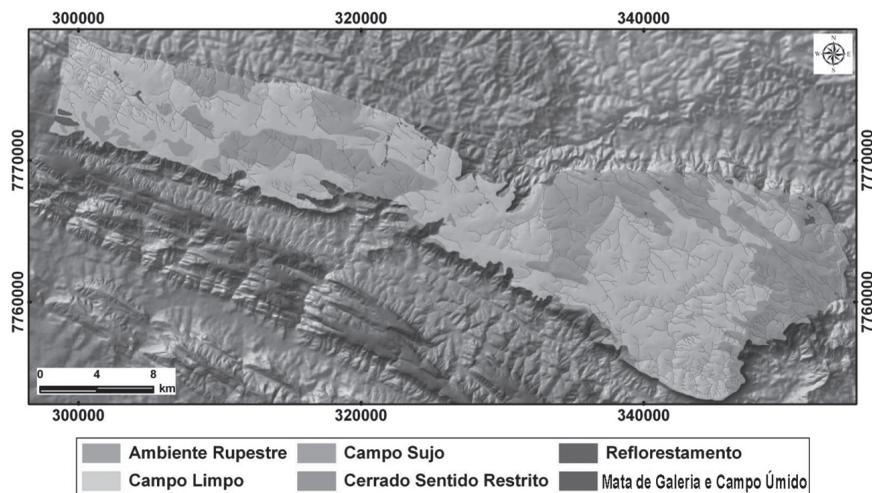


Figura 10 - Resultado da classificação espectral obtida da imagem ASTER referente às fitofisionomias encontradas na Serra da Canastra; ao fundo composição com imagem SRTM de 2000.

O Campo Limpo é a única fitofisionomia que faz limite com todas as demais. Esta fitofisionomia é a mais abrangente com aproximadamente 480km² da Serra da Canastra (60,45%), seguida do ambiente rupestre (21,02%) e Campo Sujo (12,40%). A Mata Galeria somado do Campo Úmido (4%) e o Cerrado Sentido Restrito (1,90%) apresentaram áreas menores que 20km². As áreas de abrangência de cada fitofisionomia encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Distribuição de área de cada fitofisionomia na Serra da Canastra.

Fitofisionomia	Área	
	km ²	%
Ambiente Rupestre	100	21,02
Campo Limpo	287	60,45
Campo Sujo	59	12,40
Cerrado Sentido Restrito	9	1,90
Mata de Galeria e Campo Úmido	19	4,00
Reflorestamento	1	0,22
Total	476	100

Para evidenciar a relação entre as fitofisionomias e o relevo, a classificação espectral foi sobreposta ao MDT e elaborados perfis topográficos (Figura 11). Nos perfis topográficos A-B e C-D é possível observar que o Campo Limpo encontra-se no topo de colinas em relevo plano a suave on-

dulado (Figura 12). No perfil A-B o Campo Úmido, constituído por herbáceas, encontra-se encaixado nas vertentes provenientes de fraturas, enquanto a Mata de Galeria está posicionada em um patamar acima em um relevo plano (Ribeiro e Walter, 1998; Correia et al., 1998).

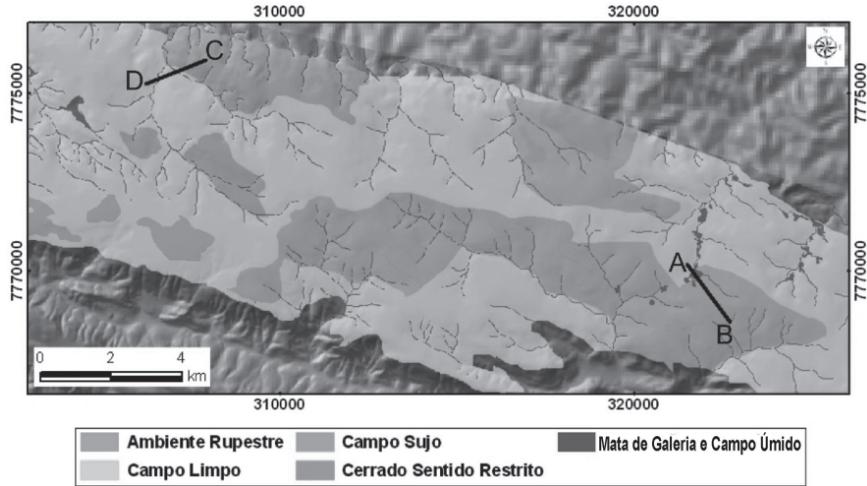


Figura 11 - Detalhe da classificação espectral e localização dos perfis topográficos esquemáticos, imagem de fundo sombreado do MDT.

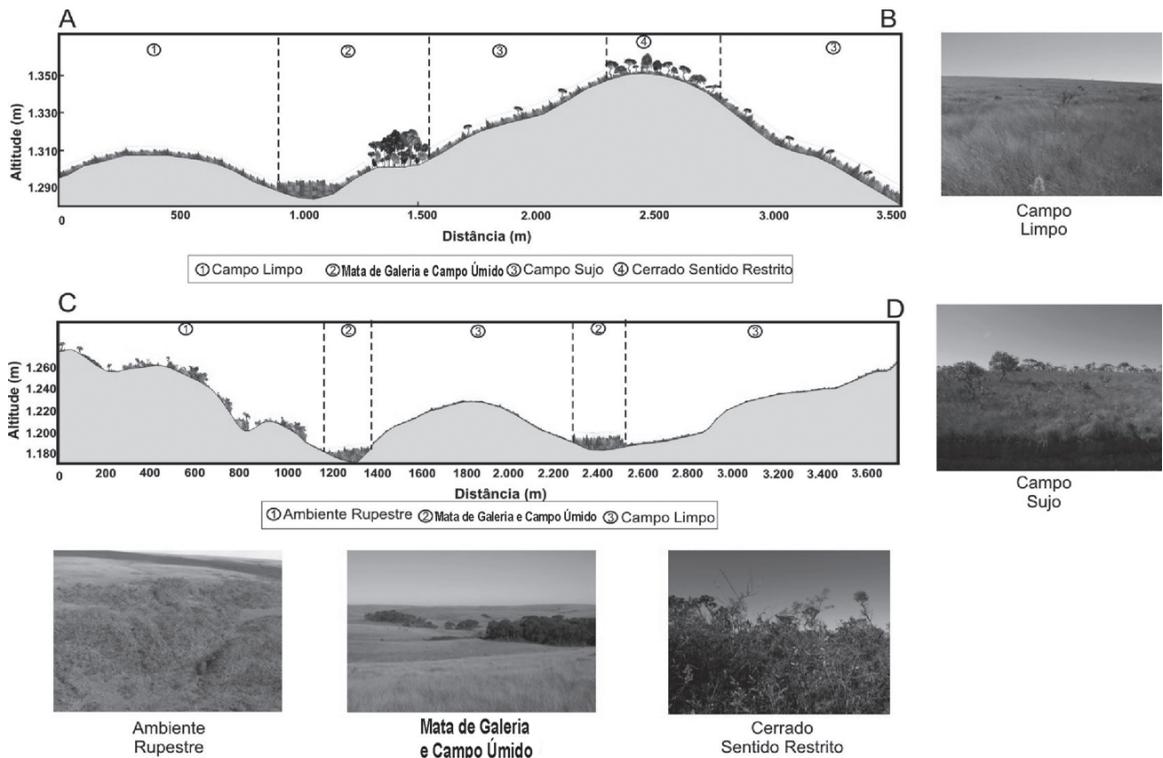


Figura 12 - Perfis topográficos relacionando as fitofisionomias com o relevo.

O Cerrado Sentido Restrito (Perfil A-B, Figura 12) localiza-se no topo da colina em relevo plano, circundado por uma maior declividade onde foi delimitado o Campo Sujo. No perfil C-D (Figura 12) observa-se que o ambiente rupestre foi encontrado em relevo acidentado, com uma variação altimétrica de aproximadamente 100 metros.

Conclusões

A análise dos gráficos de dispersão tridimensionais considerando os parâmetros morfométricos (declividade e altimetria) e os índices de vegetação permitiu evidenciar a distribuição das fitofisionomias no relevo. Os dois índices mostraram-se complementares, sendo o NDVI associado à presença de clorofila na vegetação e o NDWI relativo ao conteúdo de água foliar. A partir do gráfico de dispersão identificou-se que as fitofisionomias Cerrado Rupestre, Campo Rupestre, Campo Limpo, Campo Sujo, Cerrado Sentido Restrito podem apresentar valores de NDVI similares entre si. Estas mesmas fitofisionomias apresentaram uma maior diferenciação em relação ao NDWI, onde se constata um conteúdo de água foliar crescente: Campo Limpo – Campo Sujo – Cerrado Sentido Restrito. Além disso, o ambiente rupestre apresentou valores de NDWI mais próximos do Campo Limpo e Campo Sujo, podendo apresentar valores aproximados aos do Cerrado Sentido Restrito.

A classificação espectral, a partir da identificação dos membros finais, permitiu a separação das fitofisionomias identificadas em campo. Além disso, seu resultado mostrou que a fitofisionomia mais abrangente foi o Campo Limpo, confirmando as observações de campo. Para a integração entre o mapa de fitofisionomias e o MDT foram destacados perfis esquemáticos ao longo de topossequências, mostrando-se uma ferramenta eficiente para evidenciar as relações entre a vegetação e relevo.

Referências Bibliográficas

AB'SÁBER, N.A. **Províncias geológicas e domínios morfoclimáticos no Brasil**. São Paulo, Ed. Universidade de São Paulo, 1970. 29 p.

ALVIM, P.T.; ARAÚJO, W.A. El suelo como factor ecológico en el desarrollo de la vegetación en el centro-oeste del Brasil. **Turrialba** v. 2n. 4, p. 153-160, 1952.

AUSTIN, G.E.; THOMAS, C.J.; HOUSTON, D.C.; THOMPSON, D.B.A. Predicting the Spatial Distribution of Buzzard Buteo buteo Nesting Areas Using a Geographical Information System and Remote Sensing. **Journal of Applied Ecology**, v. 33, n. 6, p. 1541-1550, 1996.

BASNET, K. Effect of topography on the pattern of trees in tabonuco (*Dacryodes excelsa*) dominated rain Forest of Puerto Rico. **Biotropica**, v. 24, p. 31-42, 1992.

BOARDMAN, J.W.; KRUSE, F.A.; GREEN, R.O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data: In: Annual JPL Airborne Geosciences Workshop, 5, 1995, Pasadena, CA. **Summaries ... JPL Publ.** 95-1, v. 1, p. 23-26.

BOARDMAN, J.W.; KRUSE, F.A. Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, North Grapevine Mountains, Nevada, In: Proceedings of the Tenth Thematic Conference on Geological Remote Sensing, 1994. Environmental Research Institute of Michigan, San Antonio, TX, p. 407-418.

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

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

CARVALHO JÚNIOR, O.A.; CARVALHO, A.P.F.; GUIMARÃES, R.F.; MENESES, P.R. Mistura espectral: (I) classificadores espectrais para identificação. **Espaço e Geografia**, v. 6, n. 1, p. 151-176, 2003.

CARVALHO JÚNIOR, O.A.; GUIMARÃES, R.F.; MARTINS, E.S.; CARVALHO A.P.F.; GOMES, R.A.T. Aplicação do método de identificação espectral para imagens do sensor ASTER em ambiente de cerrado. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 2, p. 159-172, 2005.

CARVALHO JUNIOR, O.A.; COELHO, M.A.N.; MARTINS, E.S.; GOMES, R.A.T.; COUTO JUNIOR, A.F.; OLIVEIRA, S.N.; SANTANA, O.A. Mapeamento da vegetação na floresta atlântica usando o classificador de árvore de decisão para integrar dados de sensoriamento remoto e modelo digital de terreno. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 3, p. 331-345, 2008.

CASTRO, A.A.J.F.; MARTINS, F.R.; TAMASHIRO, J.Y.; SHEPHERD, G.J. How rich is the flora of Brazilian Cerrados? **Annals of Missouri Botanical Garden**, v. 86, p. 192-221, 1999.

CECCATO, P.; FLASSE, S.; TARANTOLA, S.; JACQUEMOND, S.; GREGOIRE, J. Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain. **Remote Sensing of Environment**, v. 77, p. 22-33, 2001.

CECCATO, P.; FLASSE, S.; GREGOIRE, J.M. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 2. Validation and applications. **Remote Sensing of Environment**, v. 82, n. 2-3, p. 198-207, 2002a.

CECCATO, P.; GOBRON, N.; FLASSE, S.; PINTY B.; TARANTOLA, S. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1 Theoretical approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 82, n. 2-3, p. 188-197, 2002b.

CLARK, D.A.; CLARK, D.B.; SANDOVAL, M.R.; CASTRO, C.M.V. Edaphic and human effects on landscape-scale distributions of tropical rain Forest palms. **Ecology**, v. 76, p. 2581-2594, 1995.

- CLARK, D.B.; CLARK, D.A.; READ, J.M. Edaphic variation and the mesoscale distribution of tree species in a neotropical rain forest. **Journal of Ecology**, v. 86, n. 1, p.101-112, 1998.
- CLARK, D.B.; PALMER, M.W.; CLARK, D.A. Edaphic factors and the landscape-scale distributions of tropical rain forest trees. **Ecology**, v. 80, p. 2662-2675, 1999.
- CLARK, D.B. Los factores edáficos y la distribución de las plantas. In Guariguata, M.R.; Kattan, G.H. (Ed.). **Ecología y conservación de bosques neotropicales**. Ediciones LUR, 2002. Cartago, p.193-221.
- COUTINHO, L.M. O conceito de cerrado. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 1, p. 17-23, 1978.
- EITEN, G. Cerrado vegetation of Brazil. **Botanical Review**, v. 38, n. 2, p. 201-341, 1972.
- EITEN, G. **Vegetação natural do Distrito Federal**. Brasília, Universidade de Brasília/SEBRAE, 2001. 162p.
- FELFILI, J.M.; SILVA JÚNIOR, M.C. A comparative study of cerrado (*sensu stricto*) vegetation in Central Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, v. 9, p. 277-289, 1993
- FELFILI, J.M.; SILVA JÚNIOR, M.C.; FILGUEIRAS, T.S.; NOGUEIRA, P.E. Comparison of cerrado (*sensu stricto*) vegetation in central Brazil. **Ciência e Cultura**, v. 50, p.237-343, 1998.
- FLORINSKY, I.V. Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations. **Progress in Physical Geography**, v. 22, n. 1, p. 33-60, 1998.
- FURLEY, P.A.; RATTER, J.A. Soil resources and plant communities of the central Brazilian Cerrado and their development. **Journal of Biogeography**, v. 15, p. 97-108, 1988.
- FURLEY, P.A. The influence of slope on the nature and distribution of soils and plant communities in the central Brazilian Cerrado. **Advances in Hillslope Processes**, v. 1, n. 15, p. 327-345, 1996.
- GAO, B.C. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 257-266, 1996.
- GATTO, L.C.S.; RAMOS, V.L.S.; NUNES, B.T.A.; MAMEDE, L.; GÓES, M.H.B.; MAURO, C.A.; ALVARENGA, S.M.; FRANCO, E.M.S.; QUIRICO, A.F.; NEVES, L.B. (1983) Geomorfologia.. In: **Projeto RadamBrasil: Levantamento de Recursos Naturais**. v. 32. Rio de Janeiro, Ministério de Energia e Minas, Secretaria Geral. p. 305-384
- GIBBS, P.E.; LEITÃO FILHO, H.F.; SHEPHERD, G. Floristic composition and community structure in an area of Cerrado in SE Brazil. **Flora** v. 173, p. 433-449, 1983.
- GOODLAND, R.; POLLARD, R. The Brazilian cerrado vegetation: a fertility gradient. **Journal of Ecology**, v. 61, p. 219-224, 1973.
- GREEN, A.A.; BERMAN, M.; SWITZER, P.; CRAIG, M.D. A transformation for ordering multispectral data in terms of images quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing**, v. 26, n. 1, p. 65-74, 1988.
- HARIDASAN, M. Nutrição mineral de plantas nativas do Cerrado. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 12, p. 54-64, 2000.
- HOERSCH, B.; BRAUNB, G.; SCHMID, U. Relation between landform and vegetation in alpine regions of Wallis, Switzerland. A multiscale remote sensing and GIS approach. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 26, p. 113–139, 2002.
- HUTCHINSON, M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, v. 106, p.211-232, 1989.
- INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ESTATISCA. **Manual Técnico de Pedologia**. Rio de Janeiro, RJ, 2007. 316 p.
- JACKSON, T.J.; CHEN, D.; COSH, M.; LI, F.; ANDERSON, M.; WALTHALL, C.; DORIASWAMY, P.; HUNT, E. R. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, p. 475–482, 2004.
- JOHNSTON, M.H. Soil-vegetation relationships in a tabonuco forest community in the Luquillo Mountains of Puerto Rico. **Journal of Tropical Ecology**, v. 8, p. 253-263, 1992.
- KRUSE, F.A.; LEFKOFF, A.B.; BOARDMAN, J.W.; HEIEDBRECHT, K.B.; SHAPIRO, A.T.; BARLOON, P.J.; GOETZ, A.F.H. The spectral image processing system (SIPS) – Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 437-456, 1993.
- MACHADO, R.B.; RAMOS NETO, M.B.; PEREIRA, P.G.P.; CALDAS, E.F.; GONÇALVES, D.A.; SANTOS, N.S.; TABOR, K.; STEININGER, M. (2004) **Estimativa de perda de área do Cerrado brasileiro**. Brasília, DF, Conservação Internacional, 2004. 22 p.
- MITTERMEIER, R.A.; GIL, P.R.; HOFFMAN, M.; PILGRIM, J.; BROOKS, T.; MITTERMEIER, C.G.; LAMOREUX, J.; DA FONSECA, G.A.B. **Hotspots revisited: earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions**. 2 ed. Boston: University of Chicago Press., 2005. 392 p.
- MORENO, M.I.C.; SCHIAVINI, I. Relação entre vegetação e solo em um gradiente florestal na Estação Ecológica do Panga, Uberlândia (MG). **Revista Brasileira de Botânica**, v. 24, n. 4, p. 537-544, 2001.
- NEWBERY, D.M.; PROCTOR, J. Ecological studies in four contrasting lowland rain forests in Gunung Mulu National Park, Sarawak. **Journal of Ecology**, v. 72, p. 475-493, 1984.
- OLIVEIRA FILHO, A.T.; MARTINS, F.R. Distribuição, caracterização e composição florística das formações vegetais

- da região da Salgadeira, na Chapada dos Guimarães, MT. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 9, p. 207-223, 1986.
- OLIVEIRA FILHO, A.T.; SHEPHERD, G.J.; MARTINS, F.R.; STUBBLELINE, W.H. Environmental factors effecting physiognomic and floristic variation in area of Cerrado in Central Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, v.5, p. 413-431, 1989.
- PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA. **Plano de Manejo**. IBAMA/Terra Brasilis. São Roque de Minas, MG, 2002, p. 108-125.
- RATTER, J.A.; ASKEW, G.P.; MONTGOMERY, R.F.; GIFFORD, D.R. Observações adicionais sobre o Cerradão de solos mesotróficos no Brasil Central. In: IV Simpósio sobre o Cerrado. São Paulo, EDUSP, 1977, p. 303-316.
- REATTO, A.; MARTINS, E.S.; CARDOSO, E.A.; SPERA, S.T.; CARVALHO JR, O.A.; GUIMARÃES, R.F.; FARIAS, M.F.R.; SILVA, A.V. **Relação entre as classes de solos e as principais fitofisionomias do alto curso do Rio Descoberto, Distrito Federal e Goiás**. Boletim de pesquisa e desenvolvimento. Planaltina/EMBRAPA Cerrado, 2003. 28 p.
- RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de. (Ed.). **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina, DF: Embrapa-CPAC, p. 89-166.
- ROSS, J.L.S. Relevo Brasileiro: Uma nova proposta de classificação. **Revista do Departamento e Geografia**, n. 4, 1985.
- ROSSI, M.; MATTOS, I.F.A.; COELHO, R.M.; MENK, J.R.F.; ROCHA, F.T.; PFEIFER, R.M.; DeMARIA, I.C. Relação solo/vegetação em área natural no Parque Estadual de Porto Ferreira, São Paulo. **Revista do Instituto Florestal**, v. 17, n. 1, p. 45-61, 2005.
- SAADI, A. **Ensaio sobre a morfotectônica de Minas Gerais**. 1991. Tese (Doutorado em Geologia). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1991.
- SALIS, S.M.; SHEPHERD, G.J.; JOLY, C.A. Floristic comparison of mesophytic semideciduous forests of the interior of the state of São Paulo, Southeast Brazil. **Vegetatio**, v. 119, p. 155-164, 1995.
- SERRANO, L.; USTIN, S.L.; ROBERTS, D.A.; GAMON, J.A.; PEÑUELAS, J. Deriving Water Content of Chaparral Vegetation from AVIRIS Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, p. 570-581, 2000.
- SILVA, F.J.; FARIÑAS, M.R.; FELFILI, J.M.; KLINK, C.A. Spatial heterogeneity, land use and conservation in the Cerrado region of Brazil. **Journal of Biogeography**, v. 33, p. 536-548, 2006.
- SILVA JÚNIOR, M.C.; BARROS, M.F.; CÂNDIDO, J.F. (1987) Relações entre parâmetros do solo e da vegetação de Cerrado na Estação Florestal de Experimentação de Paraopeba, MG. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 10, p. 125-137.
- SPERA, S.T.; REATTO, A.; MARTINS, E.S.; CORREIA, J.R. **Atributos físicos de solos e distribuição das fitofisionomias de Cerrado na bacia hidrográfica do Rio Jardim, DF**. Boletim de pesquisa e desenvolvimento. Planaltina/EMBRAPA Cerrado, 2005. 19 p.
- SOUZA, S.M.T. **Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais**. Hidrossistemas e COPASA/MG, 1993. 264 p.
- SOUZA, J.S.; ESPÍRITO-SANTO, F.D.B.; FONTES, M.A.L.; OLIVEIRA-FILHO, A.T.; BOTEZELLI, L. Análise das variações florísticas e estruturais da comunidade arbórea de um fragmento de floresta semidecídua às margens do Rio Capivari, Lavras-MG. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 185-206, 2003.
- SWAINE, M.D. Rainfall and soil fertility as factors limiting forest species distributions in Ghana. **Journal of Ecology**, v. 84, p. 419-428, 1996.
- TERAMOTO, E.D.; LEPSCH, L.F.; VIDAL-TORRADO, P. Relações solo, superfície geomórfica e substrato geológico na microbacia do Ribeirão Martins (Piracicaba – SP). **Scientia Agricola**, v. 58, n. 2, p. 361-371, 2001.
- THOME, K.; ARAI, K.; HOOK, S.; KIEFFER, H.; LANG, H.; MATSUNAGA, T.; ONO, A.; PALLUCONI, F.; SAKUMA, H.; SLATER, P.; TAKASHIMA, T.; TONOOKA, H.; TSUCHIDA, S.; WELCH, R.M.; ZALEWSKI, E. ASTER preflight and insight calibration and the validation of level 2 products. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1161-1172, 1998.
- TORRES, R.B.; MARTINS, F.R.; KINOSHITA, L.S. Climate, soil and tree flora relationships in forests in the state of São Paulo, southeastern Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 20, p. 41-50, 1997.
- USTIN, S.L.; HART, Q.J.; DUAN, L.; SCHEER, G. Vegetation mapping on hardwood rangelands in California. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, p. 3015-3036, 1996.
- USTIN, S.L.; ROBERTS, D.A.; GAMON, J.A.; ASNER, G.P.; GREEN, R.O. Using Imaging Spectroscopy to Study Ecosystem Processes and Properties. **BioScience**, v. 54, n. 6, p. 523-534, 2004a.
- USTIN, S.L.; JACQUEMOUD, S.; ZARCO-TEJADA, P.J.; ASNER, G. **Remote Sensing of Environmental Processes, State of the Science and New Directions**. In Manual of Remote Sensing, v. 4. Remote Sensing for Natural Resource Management and Environmental Monitoring. ASPRS. John Wiley and Sons, New York, 2004b. 768p.
- YAMAGUCHI, Y.; KAHLE, A.B.; TSU, H.; KAWAKAMI, T.; PNIEL, M. Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1062-1071, 1998.
- ZARCO-TEJADA, P.J.; RUEDA, C.A.; USTIN, S.L. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. **Remote Sensing of Environment**, v. 85, p.109-124, 2003.