

Comportamento espectral de fitofisionomias do Cerrado e desenvolvimento de índices utilizando bandas sintéticas derivadas de Modelos Lineares de Mistura Espectral aplicados na discriminação de fitofisionomias

Márcio Pupin de Mello¹
Bruno Rodrigues do Prado¹
Gustavo Bayma Siqueira da Silva¹
Yosio Edemir Shimabukuro¹
Edson Eyji Sano²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Caixa Postal 515 – CEP 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{pupin, prado, bayma, yosio}@dsr.inpe.br

²Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Cerrados
Caixa Postal 08223 – BR 020, km 18 - CEP 73301-970 Planaltina - DF, Brasil
sano@cpac.embrapa.br

Abstract. The Cerrado biome covers more than two million km² in the central region of Brazil. It is the second largest biome in this country, presenting rich biodiversity. Remote sensing is a useful tool for characterizing land covers. However, because of its particularities and vegetation diversity, Cerrado is not easily distinguishable in optical images. So the use of remote sensing for discriminating Cerrado vegetation requires an investigation of the behavior of their spectral characteristics. This paper analyzes the behavior of vegetation cover in the Cerrado biome through the Landsat5/TM spectral bands and the corresponding synthetic bands derived from mixing models. It also seeks the ways to facilitate the discrimination of the vegetation type classes by defining specific indices using remote sensing tools. The Brasília National Park was chosen as the study area for this research. The methodology used the Linear Spectral Mixture Model applied to two sets of endmembers (green vegetation, bare soil and shade; and green vegetation, dry vegetation and shade) to generate the corresponding fraction images (synthetic bands), which could discriminate the vegetation classes of interest. The use of dry vegetation as one of the endmembers showed more promising results than the use of bare soil for distinguishing Cerrado's phytophysiognomies.

Palavras-chave: remote sensing, Landsat, Brazilian Cerrado phytophysiognomies, vegetation, sensoriamento remoto, Landsat, fitofisionomias do Cerrado brasileiro, vegetação.

1. Introdução

O bioma Cerrado ocupa quase um quarto do território brasileiro e estende-se por mais de dois milhões de quilômetros quadrados na porção central do país (Costa e Olszewski, 2008). Esse bioma representa a segunda maior formação vegetal do Brasil, sendo também a savana tropical mais rica em biodiversidade do planeta (Ratter et al., 1997). O Cerrado caracteriza-se por dois períodos sazonais distintos: um seco e outro chuvoso; e apresenta diferentes tipos de formações herbáceas, arbustivas e arbóreas (Ribeiro e Walter, 1998).

Devido a peculiaridades e diversidade fitofisionômicas do Cerrado, as suas diferentes classes não são facilmente distinguíveis em imagens ópticas de satélite (Sano et al., 2008). Silva et al. (2008) encontraram dificuldades em discriminar as principais fitofisionomias do Cerrado com base em diferentes métodos de classificação digital de imagens e recomendaram o uso de técnicas mais sofisticadas como o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME). Neste modelo, as imagens-fração (*endmembers*) mais comumente utilizadas em casos aplicados ao Cerrado são a vegetação verde, o solo e a sombra. No entanto, as características espectrais intrínsecas do Cerrado sugerem que se leve em conta outras frações, como a vegetação seca.

Uma maneira apropriada de estudar as aplicações de ferramentas do sensoriamento remoto na discriminação de determinados alvos de vegetação é através de uma investigação

do comportamento espectral desses alvos e suas características espectrais intrínsecas (Ponzoni e Shimabukuro, 2005). Assim, uma vez conhecidas as peculiaridades espectrais dos alvos de interesse, pode-se então propor maneiras de equacionar matematicamente algumas relações que evidenciem ou propiciem melhor discriminação dos mesmos. Em sensoriamento remoto, essas relações matemáticas envolvendo características espectrais são conhecidas como índices de vegetação. O mais difundido deles é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index*) (Rouse et al., 1973).

Visto o exposto, este trabalho tem por objetivo estudar o comportamento espectral de fitofisionomias do Cerrado em bandas espectrais e bandas sintéticas derivadas de MLMEs assim como avaliar maneiras de equacionar as inter-relações espectrais dessas fitofisionomias, buscando assim definir meios de facilitar a discriminação das mesmas usando ferramentas do sensoriamento remoto.

2. Material e Métodos

A área de estudo escolhida corresponde ao Parque Nacional de Brasília (PNB) (Figura 1). Essa escolha baseia-se no fato do PNB possuir as principais fitofisionomias de Cerrado, sendo uma área relativamente extensa e preservada (Ferreira et al., 2007). As classes consideradas neste trabalho, segundo o sistema de classificação de cobertura vegetal proposto por Ribeiro e Walter (1998), foram: Campo Limpo, Campo Sujo, Campo Cerrado, Cerrado *sensu stricto* e Mata de Galeria. Áreas correspondentes a outras classes como água e área construída foram desconsideradas.

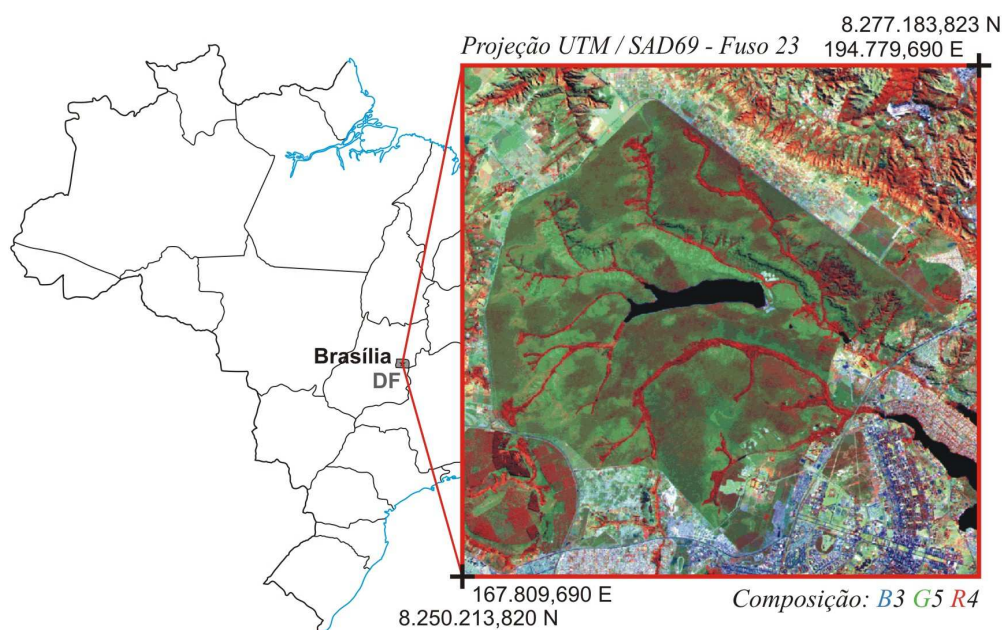


Figura 1. Área de estudo correspondente ao Parque Nacional de Brasília (PNB). Imagem adquirida pelo sensor Landsat5/TM em 16 de junho de 2003.

O mapa de referência de cobertura vegetal do parque utilizado neste estudo foi o proposto por Ferreira (2003). Processou-se um recorte de uma cena obtida pelo sensor *Thematic Mapper* (TM), a bordo do satélite Landsat 5, datada de 16 de junho de 2003 (bandas 1 a 5 e 7, com 30m de resolução espacial). A cena foi georreferenciada, adotando-se o sistema de projeção UTM, *datum* SAD69 (fuso 23S) e corrigida radiometricamente para reflectância de superfície usando o algoritmo 6S (Vermote et al., 1997).

O MLME tem como principal função estimar a proporção dos diferentes elementos presentes na composição espectral de um *pixel* da imagem. Ele utiliza a informação do

comportamento espectral dos chamados “*pixels* puros” (*endmembers*) para estimar a proporção desses elementos dentro de cada um dos *pixels* da imagem, que ao fim do processo são representados em bandas sintéticas chamadas frações ou componentes (Shimabukuro e Smith, 1991). Os modelos ajustados nesse trabalho utilizam componentes de *Vegetação Verde*, *Solo* ou *Vegetação Seca*, e *Sombra*, como descritos nas Equações 1 e 2.

$$r1_i = ppVegV_i.VegV + ppSolo_i.Solo + ppSombra_i.Sombra + e1_i \quad (1)$$

$$r2_i = ppVegV_i.VegV + ppVegS_i.VegS + ppSombra_i.Sombra + e2_i \quad (2)$$

Em que:

- r1_i*: resposta espectral do *pixel* na *i*-ésima banda para o modelo 1;
- r2_i*: resposta espectral do *pixel* na *i*-ésima banda para o modelo 2;
- ppVegV_i*: resposta do *pixel* puro para a componente *Vegetação Verde* na *i*-ésima banda;
- ppSolo_i*: resposta do *pixel* puro para a componente *Solo* na *i*-ésima banda;
- ppVegS_i*: resposta do *pixel* puro para a componente *Vegetação Seca* na *i*-ésima banda;
- ppSombra_i*: resposta do *pixel* puro para a componente *Sombra* na *i*-ésima banda;
- VegV*: proporção estimada para a componente *Vegetação Verde* no *pixel*;
- Solo*: proporção estimada para a componente *Solo* no *pixel*;
- VegS*: proporção estimada para a componente *Vegetação Seca* no *pixel*;
- Sombra*: proporção estimada para a componente *Sombra* no *pixel*;
- e1_i*: erro aleatório associado à *i*-ésima banda espectral no *pixel* para o modelo 1;
- e2_i*: erro aleatório associado à *i*-ésima banda espectral no *pixel* para o modelo 2.

Os modelos MLME 1 e MLME 2 (Equações 1 e 2, respectivamente) foram ajustados utilizando o método dos Mínimos Quadrados Restrito (Shimabukuro e Smith, 1991). Todos os valores dos *endmembers* foram mantidos nos modelos, ou seja, a resposta espectral dos *endmembers* de *Vegetação Verde* e *Sombra* foram as mesmas em ambos os modelos.

Sobre o mapa de referência, foram coletadas amostras representativas de cada fitofisionomia, dadas em número de *pixels*: Campo limpo – 539; Campo Sujo – 636; Campo Cerrado – 609; Cerrado *sensu stricto* – 1263; e Mata de Galeria – 374. De posse das frações resultantes de cada um dos modelos aplicados e das amostras coletadas para as fitofisionomias, procedeu-se o estudo do comportamento das mesmas em relação às suas respostas aos componentes resultantes dos MLMEs. Esse estudo foi realizado de duas maneiras: utilizando a média das amostras de cada uma das fitofisionomias e verificando como ela se comporta em cada uma das componentes de cada modelo; e utilizando gráficos de dispersão usando pares de componentes dos modelos (uma componente no eixo das abscissas e outra nas ordenadas), verificando como as amostras de *pixels* de cada fitofisionomia se comportavam nesses gráficos. Uma vez estudado o comportamento e particularidades das fitofisionomias em relação aos componentes resultantes, propuseram-se equações utilizando essas componentes (bandas sintéticas), permitindo a discriminação das fitofisionomias de interesse.

3. Resultados e Discussão

Amostras representativas de cada uma das cinco fitofisionomias abordadas foram escolhidas para o estudo do comportamento espectral, tanto nas bandas do sensor TM corrigidas radiometricamente, quanto nas componentes (imagens-fração) resultantes da aplicação dos modelos de mistura. A Figura 2a representa o comportamento médio das reflectâncias de superfície nas seis bandas espectrais utilizadas nesse trabalho. A Figura 2b mostra os valores dos desvios-padrão das reflectâncias de superfície de cada amostra, em cada banda.

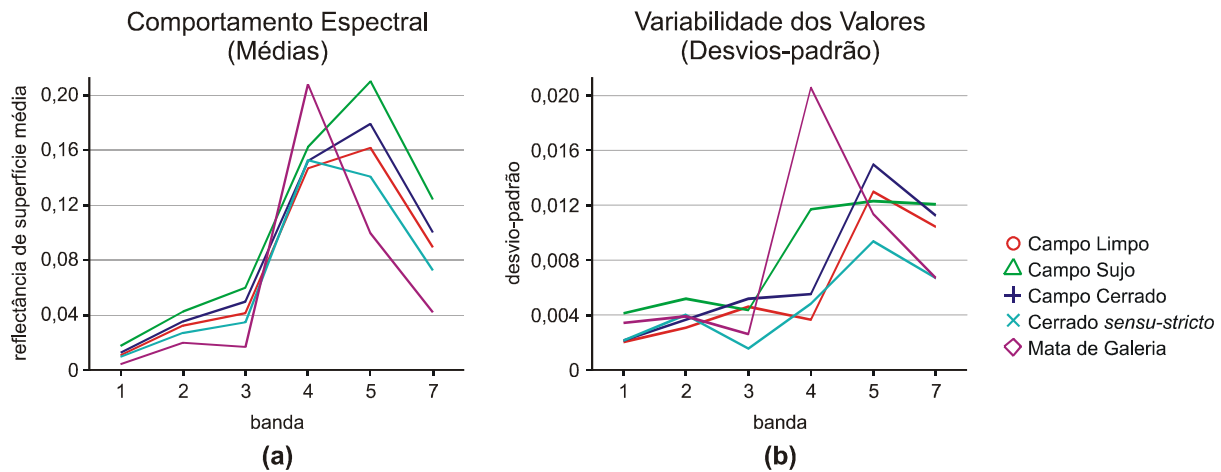


Figura 2. Comportamento espectral das fitofisionomias. (a) valores médios de reflectância de superfície em cada banda do TM; (b) desvios-padrão dos valores de reflectância das amostras.

Percebe-se que o Campo Limpo, o Campo Sujo, o Campo Cerrado e o Cerrado *sensu stricto* apresentaram comportamentos espectrais bem semelhantes, sendo que suas respostas médias diferenciaram-se significativamente apenas nas bandas 5 e 7, que é justamente onde o desvio-padrão mais se acentua. A Mata de Galeria apresentou uma resposta média mais alta que as demais fitofisionomias na banda 4, entretanto esta banda apresentou o maior desvio-padrão para essa classe, evidenciando a grande variabilidade do padrão espectral dessa fitofisionomia. Esses fatos explicam a dificuldade em classificar as fitofisionomias utilizando apenas as respostas às bandas espectrais do sensor.

Uma vez aplicados os MLMEs descritos pelas Equações 1 e 2, procedeu-se ao estudo do comportamento dessas mesmas amostras representativas das cinco fitofisionomias em resposta às componentes geradas pelos modelos. A Figura 3 mostra o comportamento (médias) das fitofisionomias em relação às componentes geradas pelos modelos MLME 1 (Equação 1) e MLME 2 (Equação 2).

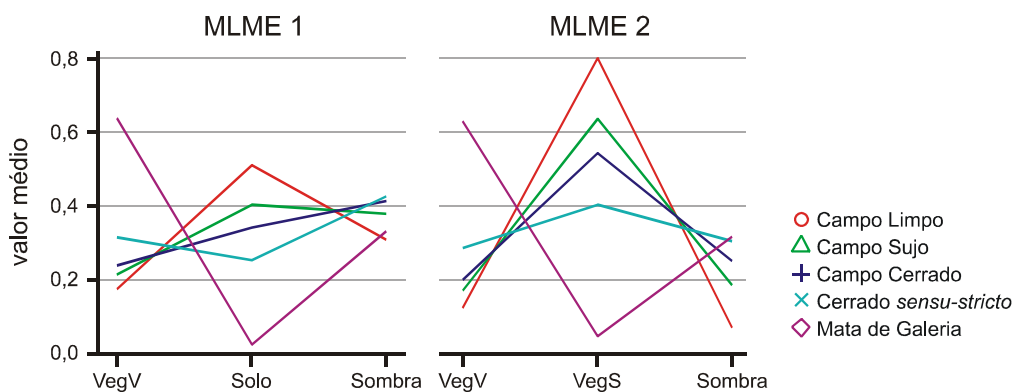


Figura 3. Gráfico do comportamento das fitofisionomias em resposta às componentes ajustadas nos modelos de mistura das Equações 1 e 2, respectivamente.

A Figura 3 mostra que o “degrau” entre *Vegetação Verde (VegV)* e *Vegetação Seca (VegS)* (MLME 2), principalmente nas fitofisionomias de campo, foi significativamente maior que entre *VegV* e *Solo* (MLME 1). O uso da componente *VegS* fez com que os valores das componentes *VegV* e *Sombra* tendessem a diminuir em relação ao uso da componente *Solo*, indicando que o MLME 2 diferencia melhor as particularidades de cada fitofisionomia.

Além dos gráficos de comportamento espectral médio, foram gerados diagramas de dispersão em planos cartesianos bidimensionais contendo todas as amostras. As bandas sintéticas (componentes) resultantes dos MLMEs foram utilizadas nos eixos cartesianos de acordo com as três combinações possíveis. A Figura 4 mostra os diagramas resultantes do MLME 1.

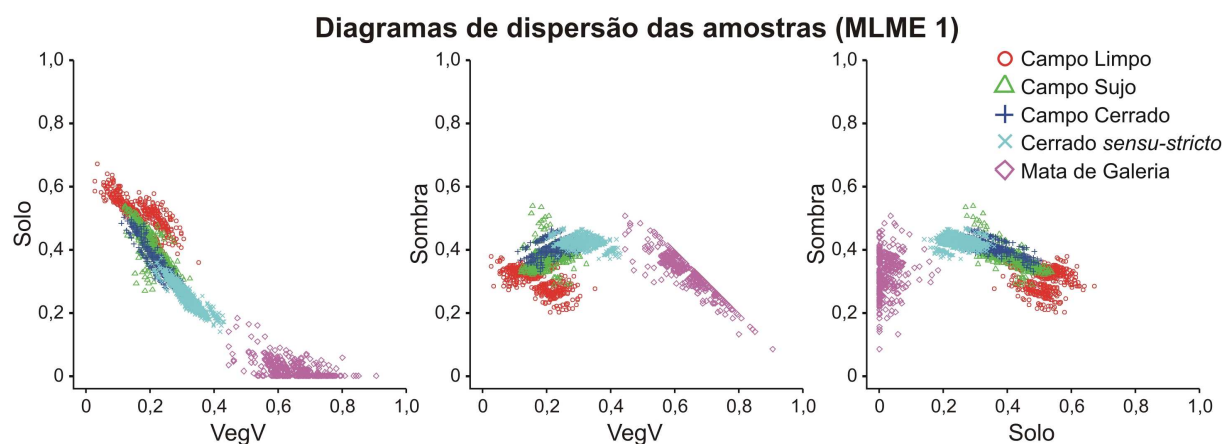


Figura 4. Diagramas de dispersão das amostras representativas das fitofisionomias segundo suas respostas a cada par de componentes (bandas sintéticas) do MLME 1 (Equação 1).

As fitofisionomias Campo Limpo e Mata de Galeria ocupam dois extremos dos diagramas, sendo a primeira caracterizada por apresentar alta resposta na componente *Solo*, baixa resposta na componente *VegV* e resposta intermediária na componente *Sombra*. Já a Mata de Galeria apresenta alta resposta na componente *VegV*, resposta de baixa à média na componente *Sombra* e baixa resposta na componente *Solo*.

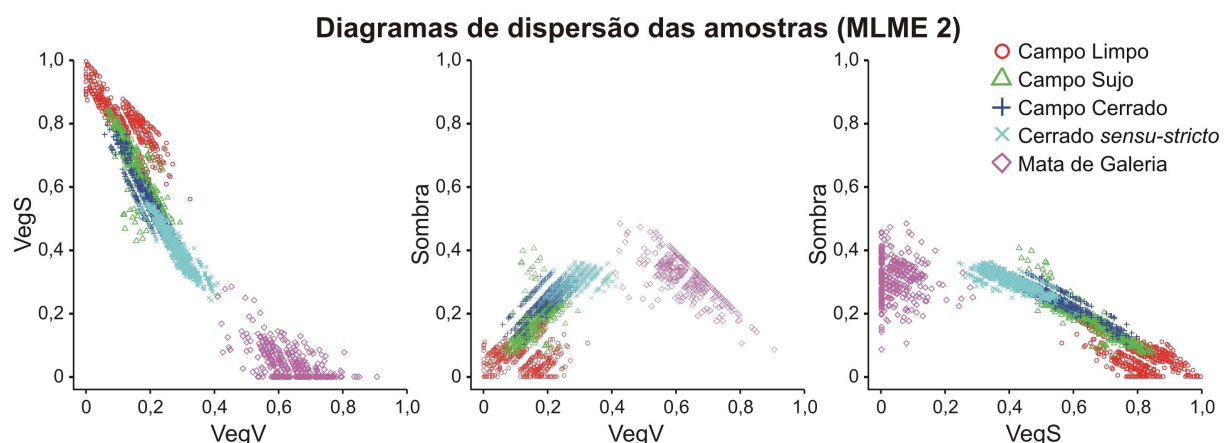


Figura 5. Diagramas de dispersão das amostras representativas de fitofisionomias segundo suas respostas a cada par de componentes (bandas sintéticas) do MLME2 (Equação 2).

Os diagramas do MLME 2 (Figura 5) apresentaram distinção um pouco mais acentuada do que foi possível notar no MLME 1 (Figura 4). Foi possível perceber, nos diagramas dos dois modelos, as mesmas tendências discutidas a respeito do comportamento das médias mostrado na Figura 3. Entretanto, com os diagramas de dispersão pode-se ter uma idéia da variabilidade dos dados de cada amostra, permitindo observar, por exemplo, que as fitofisionomias Campo Sujo e Campo Cerrado se confundem consideravelmente.

Analisando o comportamento espectral nas bandas do sensor TM e nas bandas sintéticas derivadas dos modelos de mistura, pode-se confirmar a afirmação feita por Silva et al. (2008)

de que as características intrínsecas das fitofisionomias do Cerrado fazem com a discriminação das mesmas, utilizando ferramentas de sensoriamento remoto, seja difícil. Buscando alternativas para tal, pode-se usufruir das inspeções feitas no comportamento das fitofisionomias em relação aos modelos de mistura, que se distinguiram entre si mais acentuadamente do que o comportamento das mesmas em relação às bandas espectrais do sensor TM.

A partir das Figuras 3, 4 e 5 pode-se intuir que equações que considerem a inter-relação entre as componentes *VegV* e *Solo* (no caso do MLME 1) ou *VegV* e *VegS* (no caso do MLME 2) são potencialmente capazes de discriminar (ou pelo menos salientar) as fitofisionomias Campo Limpo e Mata de Galeria.

Valendo-se da conhecida formulação do NDVI, foi sugerida uma formulação geral normalizada (Equação 3) e aplicada em diferentes combinações das bandas sintéticas resultantes dos modelos de mistura.

$$R = \frac{(a - b)}{(a + b)} \quad (3)$$

Uma vez formulado o índice, usou-se a ferramenta de equação de bandas para proceder sua aplicação. A Figura 6 mostra, para todos os modelos de mistura, os resultados da aplicação da Equação 3 utilizando as bandas sintéticas de *Solo* (para o MLME 1) ou *VegS* (para o MLME 2) e *VegV*, como variáveis *a* e *b*, respectivamente. Esse índice foi nomeado de Índice de Vegetação Seca Normalizado (IVSN). Para destacar as feições de interesse foram aplicadas operações de contraste linear de histogramas em ambas as imagens da Figura 6.

$$IVSN_{MLME1} = \frac{(Solo - VegV)}{(Solo + VegV)}$$

$$IVSN_{MLME2} = \frac{(VegS - VegV)}{(VegS + VegV)}$$

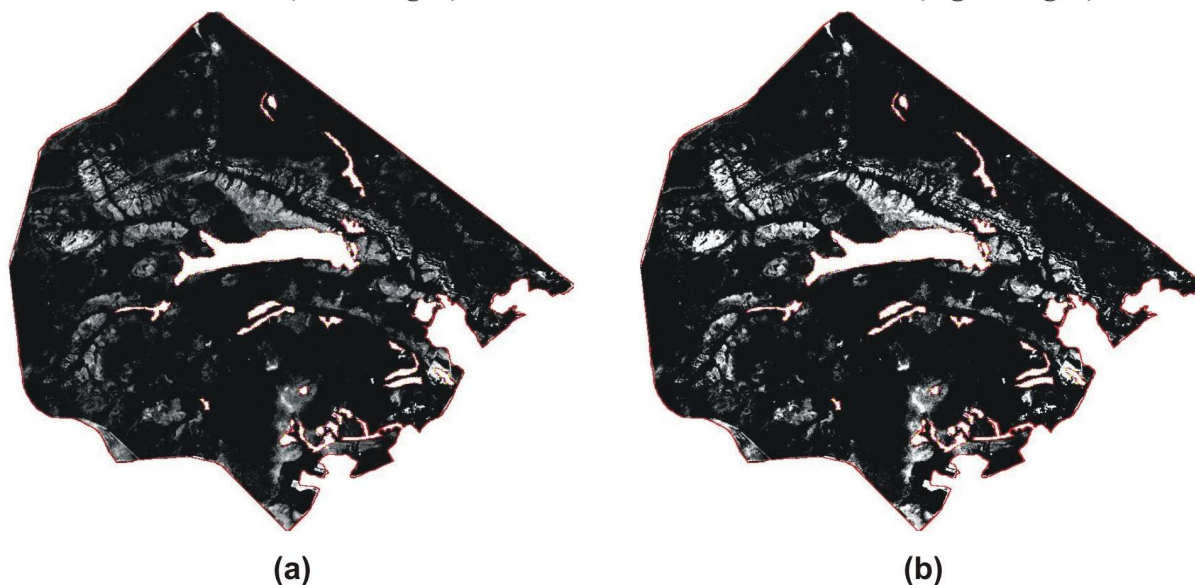


Figura 6. Índice de Vegetação Seca Normalizado (IVSN) usando bandas sintéticas dos modelos (a) MLME 1 e (b) MLME 2.

Aplicando a formulação geral normalizada (Equação 3) com *VegV* e *Solo* (para o MLME 1) ou *VegS* (para o MLME 2) como variáveis *a* e *b*, respectivamente, gerou-se um índice nomeado de Índice de Vegetação Verde Normalizado (IVVN). O resultado para ambos os modelos é apresentado na Figura 7.

$$IVVN_{MLME1} = \frac{(VegV - Solo)}{(VegV + Solo)}$$

$$IVVN_{MLME2} = \frac{(VegV - VegS)}{(VegV + VegS)}$$

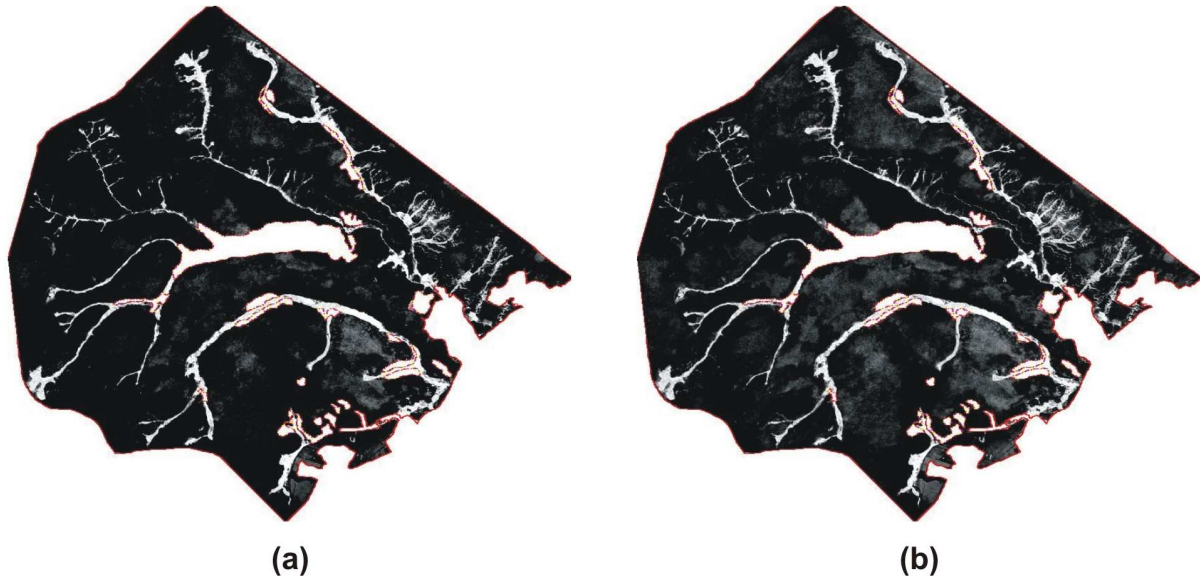


Figura 7. Índice de Vegetação Verde Normalizado (IVVN) usando bandas sintéticas dos modelos (a) MLME 1 e (b) MLME 2.

Os resultados das imagens geradas pelos índices IVSN (Figura 6) e IVVN (Figura 7) mostram que esses índices propostos apresentaram características distintas, sendo que o primeiro destaca o Campo Limpo e o segundo índice destaca a Mata de Galeria e um pouco da vegetação mais densa da fitofisionomia Cerrado *sensu stricto*. A maior discrepância entre valores médios das componentes estimadas pelo MLME 2, em relação ao MLME 1, fez com que índices que consideram *VegS* apresentassem resultado mais eficiente.

4. Conclusões

As fitofisionomias do Cerrado não são fáceis de distinguir usando as bandas convencionais dos sensores orbitais ópticos. O uso de índices (equações) de bandas sintéticas, resultantes da aplicação de MLMEs, apresentou-se como uma alternativa ao estudo e à discriminação de tais fitofisionomias.

Nos estudos aplicados ao Cerrado, o *endmember* de *Vegetação Seca*, empregado na posição da fração *Solo*, mostrou-se promissor em melhor distinguir as características intrínsecas das fitofisionomias, permitindo a geração de índices para uma melhor percepção visual. Os índices IVSN e IVVN apresentaram potencial para destacar as fitofisionomias Campo Limpo e Mata de Galeria.

Entretanto, sabe-se que a sazonalidade é um fator de destaque no Cerrado. Segundo Liesenberg et al. (2007), essa sazonalidade influencia significativamente nas respostas espectrais das classes deste bioma. Isso sugere que, em trabalhos futuros, leve-se em consideração essa característica, estudando o comportamento das fitofisionomias nas estações seca e chuvosa. Uma vez estudado o comportamento espectro-temporal do Cerrado, poder-se-á usar maneiras alternativas de classificação empregando métodos multitemporais, como o método de classificação por superfícies de resposta espectro-temporais, proposto por Vieira (2000), que considera a “assinatura espectral” de cada classe ao longo do tempo.

Referências Bibliográficas

- Costa, L. M.; Olszewski, N. Caracterização da paisagem do Cerrado. In: Faleiro, F. G.; Faria Neto, A. L. (Org.). **Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. cap. 12, p. 363-378.
- Ferreira, M. E. **Análise do modelo linear de mistura espectral na discriminação de fitofisionomias do Parque Nacional de Brasília (bioma Cerrado)**. 2003. 96 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília (UnB), Brasília-DF, 2003.
- Ferreira, M. E.; Ferreira, L. G.; Sano, E. E.; Shimabukuro, Y. E. Spectral linear mixture modelling approaches for land cover mapping of tropical savanna areas in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 2, p. 413-429, 2007.
- Liesenberg, V.; Galvão, L. S.; Ponzoni, F. J. Variations in reflectance with seasonality and viewing geometry: implications for classification of Brazilian savanna physiognomies with MISR/Terra data. **Remote Sensing of Environment**, v. 107, n. 1-2, p. 276-286, 2007.
- Ponzoni, F. J.; Shimabukuro, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. 1 ed. São José dos Campos, SP: Parêntese Editora, 2007. 144 p.
- Ratter, J. A.; Ribeiro, J. F.; Bridgewater, S. The Brazilian Cerrado vegetation and threats to its biodiversity. **Annals of Botany**, v. 80, n. 3, p. 223-230, 1997. Disponível em: <<http://aob.oxfordjournals.org/cgi/reprint/80/3/223>>. Acesso em: 09 nov. 2008.
- Ribeiro, J. F.; Walter, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: Sano, S. M.; Almeida, S. P. (Org.). **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina-DF: EMBRAPA, 1998. cap. 3, p. 87-166.
- Rouse Jr., J. W.; Hass, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3., 1973, Washington, D.C, USA. **Proceedings...** Washington: National Aeronautics and Space Administration (NASA), 1973. p. 309-317.
- Sano, E. E.; Rosa, R.; Brito, J. L. S.; Ferreira, L. G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 153-156, 2008. Disponível em: <www.scielo.br/pdf/pab/v43n1/a20v43n1.pdf>. Acesso em: 09 nov. 2008.
- Shimabukuro, Y. E.; Smith, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16-20, 1991.
- Silva, G. B. S.; Betiol, G. M.; Sano, E. E. Análise comparativa de quatro métodos de classificação supervisionada para a discriminação de fitofisionomias de Cerrado. **Geografia, Ensino & Pesquisa**, v. 12, n. 1, p. 3935-3947, 2008. Disponível em: <<http://bibdigital.sid.inpe.br/rep-/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/05.27.22.12>>. Acesso em: 05 jun. 2008.
- Vermote, E. F.; Tanre, D.; Deuze, J. L.; Herman, M. A.; Morcette, J. J. A. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 3, p. 675-686, 1997.
- Vieira, C. A. O. **Accuracy of remotely sensing classification of agricultural crops: a comparative study**. 2000. 323 p. Tese (Ph.D. em Geografia Física) - University of Nottingham, Nottingham, Inglaterra, 2000.