



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Análise do Modelo Linear de Mistura Espectral na
Discriminação de Fitofisionomias do Parque Nacional
de Brasília (Bioma Cerrado)**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 172

MANUEL EDUARDO FERREIRA

Brasília, DF

2003

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Análise do Modelo Linear de Mistura Espectral na
Discriminação de Fitofisionomias do Parque Nacional de
Brasília (Bioma Cerrado)

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 172

MANUEL EDUARDO FERREIRA

Orientador:

Dr. Edson Eyji Sano (Embrapa Cerrados)

Examinadores:

Dr. Paulo Roberto Meneses (IG - UnB)

Dr. Yosio Edemir Shimabukuro (INPE)

Brasília, DF

Maio de 2003

Dissertação Submetida ao Instituto de Geociências, Departamento de Geologia Geral e
Aplicada da Universidade de Brasília, em cumprimento a requisito parcial para
obtenção do Título de Mestre em Geologia

Autor:

Manuel Eduardo Ferreira

Banca Examinadora:

Dr. Edson Eyji Sano

Orientador

Dr. Paulo Roberto Meneses

Membro da Banca

Dr. Yosio Edemir Shimabukuro

Membro da Banca

Brasília, DF
20 de maio de 2003

AGRADECIMENTOS

Ao exímio pesquisador e amigo Dr. Edson Eyji Sano, por sua orientação, suporte e ensinamentos, essenciais na concretização desta etapa.

Ao pesquisador Dr. Paulo Roberto Meneses que, com sabedoria e clareza, despertou-me o interesse pelo Sensoriamento Remoto, repassando-me, desde os tempos da graduação, os fundamentos desta ciência.

Ao pesquisador Dr. Yosio Edemir Shimabukuro, pelas valiosas discussões sobre Modelo Linear de Mistura Espectral, e por compor, junto com o Dr. Paulo Roberto Meneses, a banca examinadora.

Ao pesquisador Dr. Laerte Guimarães Ferreira, pelos “insights”, discussões e companheirismo de sempre. Seu entusiasmo e rigor científico impulsionaram esta pesquisa.

Ao pesquisador Dr. George Eiten, pelas enriquecedoras discussões acerca da vegetação de Cerrado no Parque Nacional de Brasília.

Ao Instituto de Geociências - UnB, juntamente com o seu corpo docente, técnico e administrativo, que tão bem me acolheram e apoiaram neste período.

Ao Laboratório de Biofísica Ambiental da Embrapa - CPAC, em especial ao Heleno S. Bezerra, por seu apoio na atualização do mapa de vegetação do PNB.

À administração do Parque Nacional de Brasília, pelo apoio aos trabalhos de campo, em especial ao Elmo Monteiro (Chefe do PNB) e Christiane Horowitz.

Ao TBRS (Terrestrial Biophysics and Remote Sensing) - Universidade do Arizona, e LBA (*Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*), pelos dados de sensoriamento remoto cedidos a esta pesquisa.

Aos colegas do Mestrado e Doutorado, companheiros nas longas jornadas de estudo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq), pelo fomento a esta pesquisa.

DEDICATÓRIA

À minha família,
em especial aos meus pais,
Laerte Guimarães Ferreira e Libânia Rabello Ferreira,
pela ética e perseverança a mim transmitida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1 - Considerações Iniciais.....	1
1.1 - Objetivos	4
CAPÍTULO 2 - MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL	5
2.1 - MLME vs. Classificadores Convencionais	5
2.2 - MLME vs. Índices de Vegetação	8
2.3 - Fundamentos do Modelo Linear de Mistura Espectral	9
2.3.1 - Aplicações Gerais do MLME	15
2.3.2 - Etapas para Aplicação do MLME.....	18
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 - Área de Estudo	33
3.2 - Atualização do Mapa de Vegetação do PNB	40
3.3 - Geração das Imagens Fração.....	43
3.3.1 - Modelos Lineares.....	44
3.3.2 - Elaboração das Bibliotecas Espectrais (<i>Imagem e Referência</i>)	45
3.3.3 - Uso da Técnica de Fração de Ruído Mínimo (<i>Minimum Noise Fraction</i>).....	48
3.4 - Análise Estatística dos Dados	49
3.4.1 - Amostras	49

3.4.2 - Análise Discriminante e Separabilidade entre Classes.....	51
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1 - Mapa de Vegetação Atualizado do PNB.....	53
4.2 - Potencial das Imagens Fração para o Mapeamento do Cerrado.....	57
4.2.1 - Modelo Linear Geral (<i>vegetação, solo e sombra</i>)	57
4.2.2 - Modelo Linear Específico.....	68
4.3 - Interferência Atmosférica no MLME.....	77
CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXOS.....	97
ANEXO A - Trabalho apresentado no XI SBSR (abril de 2003)	98
ANEXO B - Trabalho apresentado no X SELPER (nov. de 2002)	106
ANEXO C - Base bibliográfica sobre MLME e vegetação (1971-2003)	117
ANEXO D - Novo Mapa de Vegetação do PNB (tamanho A3)	127

LISTA DE FIGURAS

1.1 -	Estrutura vegetacional do Cerrado.....	2
1.2 -	Área ocupada pelo bioma Cerrado no Brasil, e a sua atual taxa de conversão motivada pela criação de pastagens e agricultura.....	3
2.1 -	Imagem do Parque Nacional de Brasília, submetida ao MLME (Imagem Fração <i>vegetação</i>) e a uma classificação supervisionada (<i>MaxVer</i>). Na Imagem Fração, a variação na escala de cinza indica, de forma contínua, a proporção de um determinado alvo (ex. Mata de Galeria).....	7
2.2 -	Representação física de um <i>pixel</i> misturado, devido à presença de dois tipos de materiais no GIFOV do sensor	10
2.3 -	(a) O <i>pixel</i> (linha vermelha) se encontra na fronteira de alvos diferentes. (b) Diferentes materiais contidos em um único pixel	10
2.4 -	(a) Geometria de reflexão em um plantio. (b) Variação da radiância espectral em função dos diferentes ângulos zenitais (solares).....	11
2.5 -	Curvas de reflectância da vegetação verde, vegetação seca (não-fotossintética), solo exposto e água.....	12
2.6 -	Comportamento espectral de três classes de vegetação, típicas do bioma Cerrado: Cerrado <i>sensu stricto</i> , Campo Sujo e Campo Limpo, obtidas por espectrorradiometria de campo no Parque Nacional de Brasília (época seca). A área circulada indica a confusão espectral destas classes nas regiões do vermelho e infravermelho próximo	13
2.7 -	Imagens Fração <i>solo</i> , <i>vegetação</i> e <i>sombra</i> (água) do Parque Nacional de Brasília, com a respectiva imagem erro.....	15
2.8 -	Método geral, com as etapas obrigatórias (caixa tracejada na cor vermelha) e complementares, para a aplicação de um Modelo Linear de Mistura Espectral em dados multiespectrais ou hiperespectrais.....	19
2.9 -	Espectro solar com as bandas de absorção/interferência atmosférica	21
2.10 -	Influência da atmosfera na trajetória da radiação eletromagnética entre a fonte e o sensor	22
2.11 -	Representação gráfica da Análise por Componentes Principais em duas dimensões. Os eixos originais da imagem (bandas 1 e 2) são rotacionados, redistribuindo os <i>pixels</i> (elipse) sobre um novo sistema de eixos, formado pelas Componentes Principais 1 e 2	25
2.12 -	Distribuição dos autovalores (<i>eigenvalues</i>) após realização da ACP e do MNF, para as bandas 1-5 e 7 do sensor ETM+	27

2.13 - A primeira fileira de imagens corresponde às bandas 1-5 e 7 do sensor ETM+, Parque Nacional de Brasília (julho de 2001). A segunda fileira corresponde às imagens resultantes da ACP. A terceira fileira corresponde às imagens resultantes da transformação MNF. Note que os ruídos ficam segregados a partir da MNF 4 e da PC 5, enquanto que a dimensionalidade dos dados fica restrita para as primeiras MNFs e PCs	28
2.14 - Imagem resultante do <i>Índice de Pureza dos Pixels (Pixel Purity Index - PPI)</i> , representando <i>pixels</i> espectralmente puros, e sobreposição destes <i>pixels</i> após o uso de um limite mínimo e máximo, visando a seleção de <i>endmembers</i> em áreas específicas da imagem.....	29
2.15 - Distribuição dos <i>pixels</i> no espaço amostral vermelho-infravermelho próximo, onde a proximidade dos extremos favorece a busca por componentes espectralmente mais puros, como demonstrado pelo comportamento dos espectros.....	31
2.16 - <i>Simplex</i> de frações em um caso tridimensional, onde <i>Bf1</i> , <i>Bf2</i> e <i>Bf3</i> são as bases ortogonais para três <i>endmembers</i> , atendendo às restrições do método (Equação 2.7).....	32
3.1 - Imagem do Parque Nacional de Brasília (composição colorida RGB 543 julho de 2001), obtida pelo satélite Landsat 7 ETM+.....	34
3.2 - Mapa climático do PNB.....	35
3.3 - Dados de precipitação total (mm) no Parque Nacional de Brasília, para os anos de 2001 (azul) e 2002 (verde). Estação pluviométrica de Santa Maria - CAESB, Latitude Sul 15° 40' 00" e Longitude Oeste 47° 57' 57"	36
3.4 - Mapa de hidrografia do PNB e entorno.....	36
3.5 - Mapa de solos do PNB	38
3.6 - Mapa das unidades geológicas no PNB.....	39
3.7 - Cenas do satélite IKONOS cobrindo cerca de 61% da área do PNB (composição RGB 123).....	40
3.8 - Atualização do mapa de vegetação do PNB, por meio das cenas ETM+ e IKONOS	41
3.9 - Incursões no Parque Nacional de Brasília, durante a realização do novo mapa de vegetação (out./2002)	43
3.10 - Imagem ETM+ do Parque Nacional de Brasília, com e sem os alvos Mata de Galeria, solo exposto e água, seguida pela nova distribuição dos <i>pixels</i> no espaço vermelho (x) - infravermelho próximo (y)	46

3.11 - Biblioteca espectral referente ao modelo linear geral, para as imagens ETM+ Valor Digital e Reflectância.....	46
3.12 - Ilustração do espectrorradiômetro utilizado na pesquisa, modelo Field-Spec Pro FR (350 - 2500 nm), produzido pela Analytical Spectral Devices (ASD Inc.).	47
3.13 - Procedimentos realizados no Parque Nacional de Brasília para a análise das fitofisionomias Campo Limpo, Campo Sujo e Cerrado <i>sensu stricto</i> (modelo linear específico), por meio de espectrorradiometria aérea.....	48
3.14 - Seleção das curvas espectrais obtidas para as fitofisionomias Campo Limpo, Campo Sujo e Cerrado <i>sensu stricto</i> (modelo linear específico), a partir dos dados de espectrorradiometria aérea gerados no Parque Nacional de Brasília.....	49
3.15 - Imagem MNF (RGB 123) do Parque Nacional de Brasília, com as curvas espectrais para os <i>endmembers</i> Campo Limpo, Campo Sujo e Cerrado <i>sensu stricto</i> no espaço MNF e no ETM+	50
3.16 - Amostras de <i>pixels</i> obtidas nas diversas categorias de análise. VD = Valor Digital, R = Reflectância.....	51
4.1 - Exemplo de ajustes vetoriais realizados para o novo mapa de vegetação nas classes temáticas <i>Solo Exposto, Mata de Galeria, Cerrado sensu stricto</i> e <i>Campo Limpo com Murundum</i> , utilizando imagens IKONOS (1 m e 4 m de resolução espacial). Os vetores vermelhos correspondem às áreas corrigidas (mapa atualizado); os vetores azuis correspondem às falhas no antigo mapeamento	53
4.2 - Comparação visual entre os dois mapas de vegetação do PNB: (A) mapeamento antigo (FUNATURA-1995), e (B) mapeamento atual (2002).....	55
4.3 - Novo mapa de vegetação do Parque Nacional de Brasília.	56
4.4 - Imagens Frações do PNB, resultantes do modelo linear geral. IF RGB: Veg./Solo/Sombra.....	59
4.5 - IF Vegetação e Solo, seguido pela identificação visual das principais fitofisionomias do bioma Cerrado.....	60
4.6 - Comparação do mapa de vegetação com as IF RGB Veg./Solo/Sombra (modelo linear geral)	61
4.7 - IF do PNB, resultantes do modelo linear específico, com <i>endmembers</i> obtidos diretamente na imagem ETM+. IF RGB: CSS/CL/CS. A legenda “sem dados” indica as áreas de MG, solo exposto e água, mascaradas nesta análise	69

4.8 -	Imagens Frações do PNB, resultantes do modelo linear específico, com <i>endmembers</i> obtidos por espectrorradiometria de campo. IF RGB: CSS/CL/CS. A legenda “sem dados” indica as áreas de MG, solo exposto e água, mascaradas nesta análise.....	70
4.9 -	Comparação entre a IF RGB (modelo linear específico) e o mapa de vegetação atualizado do PNB	71
4.10 -	Comparação visual entre as IF (RGB) geradas a partir do MLME geral e específico. Observa-se um destaque maior das classes de Cerrado com as imagens obtidas pelo MLME específico	72

LISTA DE TABELAS

3.1 -	Propriedades das classes de Cerrado encontradas no PNB	34
3.2 -	Características do Domínio Poroso	39
3.3 -	Características gerais dos sensores Landsat ETM+ e IKONOS	42
3.4 -	Categorias de imagens, modelos lineares, fonte de <i>endmembers</i> e processamentos utilizados para análise do MLME no Parque Nacional de Brasília	50
4.1 -	Classes temáticas presentes no antigo e no novo mapeamento do PNB, com a respectiva área (hectares e %)	54
4.2 -	Análise Discriminante para as Imagens Fração “Valor Digital” (IF-VD)	63
4.3 -	Análise Discriminante para as Imagens Fração “Reflectância” (IF-R)	63
4.4 -	Análise Discriminante para a cena ETM+ (bandas 1-5 e 7)	64
4.5 -	Análise Discriminante para a imagem NDVI	64
4.6 -	Matriz “F” para as Imagens Fração “Valor Digital” (IF-VD)	65
4.7 -	Matriz “F” para as Imagens Fração “Reflectância” (IF-R)	65
4.8 -	Matriz “F” para a cena ETM+ (bandas 1-5 e 7)	66
4.9 -	Matriz “F” para a imagem NDVI	67
4.10 -	Análise Discriminante para as Imagens Fração <i>Referência</i>	73
4.11 -	Análise Discriminante para as Imagens Fração <i>Imagem</i>	73
4.12 -	Análise Discriminante para a cena ETM+ (bandas 1-5 e 7)	74
4.13 -	Análise Discriminante para as Imagens Fração <i>MNF</i>	75
4.14 -	Matriz “F” para as Imagens Fração <i>Referência</i>	75
4.15 -	Matriz “F” para as Imagens Fração <i>Imagem</i>	76
4.16 -	Matriz “F” para a cena ETM+ (bandas 1-5 e 7)	76
4.17 -	Matriz “F” para as Imagens Fração <i>MNF</i>	77
4.18 -	Teste-t realizado com a Imagem Fração Água - VD e R	79

4.19 - Teste-t realizado com a Imagem Fração Solo - VD e R.....	79
4.20 - Teste-t realizado com a Imagem Fração Vegetação - VD e R	79

RESUMO

O bioma savânico, localmente conhecido como Cerrado, compreende um mosaico de vegetação verticalmente estruturado pelos estratos herbáceo, arbustivo e arbóreo. Presente em 25% território nacional (2 milhões de km²), e em 45% da América do Sul, este ecossistema desempenha um importante papel no fluxo de energia, água e carbono da região. Apesar disso, estima-se que 40% da cobertura original de Cerrado no país já tenham sido convertidas em pastagens cultivadas, áreas agrícolas e urbanas. Dentro deste contexto, esta pesquisa investigou o potencial do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) para o mapeamento das principais fitofisionomias de Cerrado (Campo Limpo, Campo Sujo, Campo Cerrado e Cerrado *sensu stricto*). Os objetivos específicos foram: avaliar um conjunto de diferentes *endmembers*, assim como a contaminação atmosférica, no desempenho do MLME neste bioma. O estudo foi conduzido no Parque Nacional de Brasília, uma área com aproximadamente 30.000 ha, ao norte do Distrito Federal (15° 35' - 15° 45' latitude sul e 47° 53' - 48° 05' longitude oeste). O MLME foi aplicado sobre uma cena do sensor ETM+ (órbita 221; ponto 71) de 20 de julho de 2001 (estação seca), com e sem correção atmosférica. Dois modelos de mistura foram testados: um geral, cujos *endmembers* foram a vegetação verde, solo e sombra (substituído pela água nesse estudo), e um específico, cujos *endmembers* foram o Campo Limpo, Campo Sujo e o Cerrado *sensu stricto*. Os *endmembers* foram adquiridos diretamente da imagem e por meio de espectrorradiometria de campo no PNB (espectros de referência), realizada também em julho de 2001. A análise visual indicou uma boa concordância entre os dados de verdade terrestre (mapa de vegetação) e as Imagens Fração, as quais foram capazes de discriminar os principais domínios de Cerrado, com proporções variando de 0,7 a 1,0. As análises estatísticas demonstraram a existência de uma confusão espectral mais intensa entre o Campo Sujo e o Campo Cerrado em todas as categorias de dados analisadas, causada pela similaridade dessas duas fitofisionomias, em termos de estrutura e cobertura verde. Por outro lado, o MLME obteve um grau de separabilidade maior do que as imagens NDVI e ETM+ (bandas 1-5 e 7), tornando possível um mapeamento mais preciso para a região. Por último, foi observado que o potencial do MLME, na discriminação das classes de Cerrado, não aumentou com a correção dos efeitos atmosféricos, previamente realizada na cena ETM+. Mais especificamente, este resultado demonstra que as análises com o MLME podem ser realizadas com uma demanda computacional menor, aumentando assim a operacionalidade do método no monitoramento ambiental. No entanto, foram observadas diferenças significativas nos valores médios das classes de Cerrado, nas respectivas Imagens Fração (valor digital e reflectância), mostrando que a correção atmosférica é importante na realização de Análises de Mistura Temporal.

ABSTRACT

The savanna biome, locally known as Cerrado, comprises a vertically structured mosaic of herbaceous, arbustive, and arborescent strata. This ecosystem covers approximately 25% of Brazil and 45% of South America, playing an important role in the energy, water and carbon fluxes on region. It is estimated that about 40% of the Cerrado land cover has already been converted into cultivated pastures, agricultural crops, and urban areas. This research evaluated the usefulness of the Spectral Linear Mixing Model (SLMM) for mapping the major Cerrado physiognomies (Cerrado grassland, shrub Cerrado, wooded Cerrado, and Cerrado woodland). The specific goals were: to evaluate a different set of endmembers and the impact of atmospheric contamination on the model output. The study was conducted at the Brasilia National Park (BNP), an area of approximately 30,000 hectares, located in the northern Federal District, Brazil (15°35' and 15°45' south latitude and 47°53' and 48°05' west longitude). The SLMM was performed over a Landsat ETM+ scene (path 221; row 71), obtained on July 20th 2001 (dry season), with and without atmospheric correction. Two models were applied: one representing a general model (endmembers = green vegetation, soil and shade, in this case, replaced by water), and the other, representing a specific model (endmembers = Cerrado grassland, shrub Cerrado and Cerrado woodland). The endmembers were acquired from both the image and aerial spectroradiometer over the BNP (July 2001). The visual analysis showed a good agreement between the ground truth data (vegetation map) and the fraction images, which were capable of discriminating the major Cerrado domains, with proportions ranging from 0.7 to 1.0. The statistical analysis demonstrated a spectral confusion between Campo Sujo and Campo Cerrado for all data set because of their similarity in terms of structure and green cover. The SLMM presented a higher separability than NDVI or ETM+ data set (bands 1-5 e 7). The SLMM capability to discriminate the Cerrado vegetation did not increase with the atmospheric correction. However, there were considerable differences in the average values for each class in their respective fraction images, showing that the atmospheric correction is important when multitemporal mixture analysis is performed.