Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, Brasil, 11-18 setembro 1998, INPE, p. 1315-1325.

Identificação de Minerais em Solos Tropicais a partir de Dados Hiperespectrais do Sensor AVIRIS

Marco Antônio Pizarro
José Carlos Neves Epiphanio
Lênio Soares Galvão

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515, 12201-910 São José dos Campos, SP, Brasil
{marco, epiphani, lenio}@ltid.inpe.br

Abstract. The Spectral Feature Fitting (SFF) technique was applied to AVIRIS data to verify the possibility of spectral identification of some minerals in tropical soils (hematite/goethite and kaolinite/montmorillonite). The relationships between the classification results and constituents of three different soil types were discussed. Laboratory and AVIRIS reflectance spectra of these soils were compared to each other. The results indicate that the soils of the study area are spectrally dominated by the presence of hematite and kaolinite. However, the classification results are strongly influenced by the occurrence of opaque substances in the soils, which obliterates the direct relationship between absorption band parameters and soil constituents. The spectral effects of the green and the non-photosynthetic vegetation on the mineral identification process need to be better investigated. They can be responsible by the differences observed between AVIRIS and laboratory reflectance spectra.
Keywords: Hyperspectral Remote Sensing, Soils, Mineral Identification.

1 Introdução

Os dados utilizados para extrair informações de interesse em aplicações de sensoriamento remoto são normalmente provenientes de sensores multiespectrais como, por exemplo, o Landsat 5/TM (Thematic Mapper) e o SPOT 3/HRV(High Resolution Visible). Estes sensores possuem resolução espectral limitada, entre três e sete bandas, a qual impossibilita a caracterização mais detalhada do comportamento espectral dos alvos. Entretanto, recentes avanços tecnológicos conduziram ao desenvolvimento de uma nova etapa de coleta de dados: a do sensoriamento remoto hiperespectral, também conhecida como Espectroscopia de Imageamento (Goetz et al., 1985). Na faixa óptica, este tipo de imageamento pode ser realizado com mais de cem bandas por *pixel*, com larguras normalmente da ordem de 10 a 20 nm. Consequentemente, em relação aos tradicionais sensores multiespectrais, os sensores hiperespectrais oferecem possibilidades de uma melhor discriminação entre as feições espectrais presentes nos materiais da superfície terrestre. Para cada *pixel* da cena, eles podem adquirir um espectro de forma praticamente contínua, produzindo dados com resolução espectral suficiente para identificar materiais por meio de suas feições de absorção. Para a utilização plena deste crescente volume de informação exige-se um conhecimento cada vez mais detalhado do comportamento espectral dos alvos.

Desde 1989 o imageamento hiperespectral já é operacional a nível aerotransportado através do espectrômetro imageador AVIRIS (Airborne Visible InfRared Imaging Spectrometer). Outro imageador com características semelhantes ao AVIRIS, operacional desde 1995, é o HYDICE (HYperspectral Digital Imagery Collection Experiment). Em breve, dados hiperespectrais serão gerados também a nível orbital (p. ex., sensor ARIES com 105 bandas e lançamento previsto para 2.000 ou 2.001).

A ênfase das aplicações de sensoriamento remoto hiperespectral tem sido a utilização de técnicas de classificação para identificação de materiais na cena. Exemplos de tais técnicas incluem a SAM (Spectral Angle Mapper) (Kruse et al., 1993), a SFF (Spectral Feature Fitting) (Clark et al., 1990), e a Tricorder (Clark and Swayze, 1995). Em geral, o processo de classificação hiperespectral envolve a comparação do espectro de reflectância de cada *pixel* com espectros de referência contidos em bibliotecas espectrais, ou coletados pelo usuário em campo/laboratório, ou extraídos a partir da própria cena de acordo com algum critério. O resultado final pode ser expresso através de mapas mostrando a distribuição dos materiais espectralmente dominantes na cena. Entretanto, a maior parte das aplicações destas técnicas tem sido feita em regiões temperadas, ou em áreas com boa exposição de rochas e solos com feições de absorção bem definidas em seus espectros. Pouco se conhece sobre os efeitos impostos pelas condições de acentuada alteração mineral dos ambientes tropicais, ou da influência da cobertura vegetal, sobre esse processo de classificação.

No Brasil, dados hiperespectrais foram obtidos pelo sensor hiperespectral AVIRIS no período de agosto a setembro de 1995 durante a missão SCAR-B (Smoke, Sulfate, Clouds And Radiation – Brazil). As imagens foram coletadas em 224 bandas espectrais estreitas (10 nm de largura) na faixa 400-2500 nm, com resolução espacial de 20 metros. No presente trabalho, resultados preliminares da utilização da técnica de classificação hiperespectral SFF para a identificação de minerais de óxidos de ferro (goetita e hematita) e de argila (caulinita e montmorilonita) em diferentes tipos de solos que ocorrem em uma área próxima a cidade de Campo Grande (MS) são apresentados. As relações entre os resultados da classificação e as características químicas dos solos expostos são discutidas. Espectros de reflectância representativos destes solos, obtidos a partir das imagens AVIRIS, são comparados com curvas de reflectância adquiridas em laboratório para amostras coletadas em campo.

2 Área de Estudo

A **Figura 1** mostra a localização da área selecionada para estudo. O conjunto área/imagem escolhido atendeu aos seguintes requisitos básicos: não conter quase nenhuma cobertura por nuvens; não ter incidência de falhas na aquisição de dados; apresentar topografia quase plana; conter distintos tipos de solos, com alguma variação mineralógica; ter talhões com solos homogêneos; apresentar solos expostos; e estar em local de fácil acesso. Para atender a estes quesitos, quatro sub-cenas da linha de vôo denominada Campo Grande foram escolhidas, compreendendo uma área retangular de aproximadamente 11 x 44 km. Conforme visto na **Figura 1**, a área de estudo situa-se entre os municípios de Camapuã e Ribas do Rio Pardo, na porção centro-oriental do estado do Mato Grosso do Sul. A região caracteriza-se pela marcante

FIG. 1

homogeneidade na morfoestrutura (IBGE/SEPLAN/MS, 1988), estando situada no contexto geológico regional na porção oeste da Bacia do Paraná.

Através do mapa exploratório de solos (PROJETO RADAMBRASIL, 1987), *escala* 1:250.000, foram identificadas três classes de solos: LRd3 (Latossolo Roxo-Distrófico A moderado textura argilosa relevo suave ondulado e plano + Terra Roxa Estruturada eutrófica A moderado textura argilosa); LEa11 (Latossolo Vermelho-Escuro álico A moderado textura média relevo plano e suave ondulado + Areias Quartzosas álicas A moderado); PVa (Podzólico Vermelho – Amarelo álico A moderado Tb textura arenosa/média + Areias Quartzosas álicas A moderado relevo suave ondulado).

3 Metodologia

Os dados coletados pelo sensor AVIRIS utilizados neste estudo foram corrigidos para os efeitos de absorção e espalhamento atmosféricos através do método de Green et al. (1993). Ele é baseado no modelo de transferência radiativa MODTRAN, na calibração do sensor AVIRIS para radiância em laboratório e em dados de calibração em vôo que, para a temporada de 1995, foram obtidos no início do ano na região de Ivanpah Playa, CA, USA (Green et al., 1996). Com este método é possível calcular os valores de reflectância aparente na superfície do terreno, a partir dos dados de radiância total medidos pelo AVIRIS no topo da atmosfera. Esses valores são função dos parâmetros: radiância total, irradiância solar, reflectância da atmosfera e transmitâncias nos dois sentidos (do sensor até a superfície e desta até o sensor) do caminho percorrido pela energia eletromagnética.

Para a identificação espectral de minerais na cena, a técnica SFF foi utilizada. Este método baseia-se na comparação entre o espectro do alvo não conhecido (AVIRIS) e espectro(s) de referência. Ela pressupõe que os dados de reflectância, tanto a nível de imagem quanto de espectros de referência (biblioteca espectral), sejam normalizados através de um *contínuo* espectral, ou seja, uma função matemática usada para filtrar as bandas de absorção dos espectros (Clark e Roush, 1984). A etapa seguinte é basicamente uma comparação das relações de similaridade espectral do espectro de cada *pixel* com o(s) espectro(s) de referência, banda por banda, a partir de um ajuste de mínimos quadrados. O resultado final do processo é a obtenção de duas imagens para cada material de referência testado. A primeira é a denominada imagem *escala*, com os *pixels* mais claros representando áreas de feições de absorção mais bem definidas e com maiores chances de conter o material testado para a classificação. A outra é uma imagem gerada a partir dos valores do erro quadrático médio (RMS), com os *pixels* mais escuros representando um menor erro ou um melhor ajuste das bandas de absorção testadas. Em outras palavras, para um determinado *pixel*, a razão *escala*/RMS produz uma terceira imagem, onde áreas com *pixels* claros indicam razões com valores altos e representam uma maior probabilidade destes *pixels* conterem o material testado para classificação.

No presente estudo, a técnica SFF foi aplicada em duas etapas. Na primeira, a imagem foi testada para classificação em relação a presença dos minerais hematita e goetita, utilizando-se o intervalo 600-1100 nm, faixa espectral de domínio dos óxidos de ferro. Na outra etapa, os

minerais caulinita e montmorilonita foram considerados na análise, selecionando-se o intervalo 2100-2300 nm, em que normalmente aparecem as bandas de absorção dos argilo-minerais. Em ambas as etapas, os espectros de referência destes quatro minerais foram extraídos da biblioteca espectral do Jet Propulsion Laboratory (JPL/NASA).

Para a análise dos resultados da classificação, foram identificadas na imagem AVIRIS e no campo áreas de solo exposto representativas da ocorrência de Latossolo Roxo (LRd3), Latossolo vermelho-Escuro (LEa11) e Podzólico Vermelho-Amarelo (PVa). A **Figura 2** mostra uma composição colorida da área de estudo obtida com as bandas 188 (2150 nm), 137 (1651 nm) e 50 (826 nm) do AVIRIS exibidas, respectivamente, em vermelho, verde e azul, e já convertidas para reflectância aparente e corrigidas para os efeitos atmosféricos. Em geral, as áreas de vegetação verde (p. ex., culturas desenvolvidas) aparecem em tonalidades azuis nesta composição colorida, em função de sua maior reflectância na banda 50 (plateau do infravermelho) em relação as demais bandas. A vegetação com pouca atividade fotossintética ocorre em tonalidades amareladas, enquanto áreas com predomínio de solos são expressas por cores mais avermelhadas. Os três pontos mais bem representativos dos solos mencionados, que foram visitados durante o trabalho de campo efetivado em 1997, estão indicados nesta figura (LRd3, LEa11 e PVa). Para cada um destes pontos e para cada par de minerais de referência (goetita/hematita e caulinita/montmorilonita), foram construídos diagramas para as relações entre a razão *escala*/RMS e alguns constituintes químicos dos solos relacionados na **Tabela 1**, especialmente ferro total (Fe_2O_3) e alumina (Al_2O_3). Os valores desta razão foram obtidas para áreas de 3 x 3 *pixels*.

FIG. 2

TAB. 1

As amostras de solos obtidas em campo foram coletadas a partir da camada superficial (0 a 20 cm da superfície) e georreferenciadas. Uma pequena porção de cada amostra foi separada para a efetivação de análises químicas e enviada ao laboratório do Departamento de Ciência do Solo (ESALQ/USP). A porção maior foi utilizada na obtenção do Fator de Reflectância Bidirecional, conforme procedimento descrito no trabalho de Epiphanio et al. (1992). Para tal finalidade, utilizou-se o espectrorradiômetro IRIS (InfraRed Intelligent Spectroradiometer), que adquiriu dados com resolução espectral de 2 nm na faixa 400-1000 nm, e de 4 nm no intervalo 1000-2500 nm. Uma lâmpada de tungstênio e uma placa de spectralon foram usadas, respectivamente, como fonte de iluminação e padrão de referência. Espectros de reflectância extraídos diretamente da imagem AVIRIS (3 x 3 *pixels*) foram comparados com aqueles obtidos em laboratório.

4 Resultados e Discussão

A **Figura 3** mostra imagens da razão *escala*/RMS para os minerais caulinita (**Fig. 3a**) e hematita (**Fig. 3b**). Quanto maior for esta razão, ou mais claros forem os *pixels* na **Figura 3**, melhores serão as chances de classificação correta destes materiais. Na **Figura 3a**, a área de destaque para a provável ocorrência de caulinita é a de LEa11, que ocorre em cores avermelhadas na composição colorida da **Figura 2**. Observe que várias estradas secundárias, que indiretamente representam solo exposto, também são bem delineadas na imagem classificada. Alguns pontos

FIG. 3

FIG. 2

esbranquiçados na **Figura 3a** (p. ex., solo exposto PVa da **Fig.2**) são importantes, porque podem ajudar na definição dos locais a serem visitados nas atividades de campo. Na Figura 3b, a identificação espectral da hematita está associada, além da área de LEa11 discutida anteriormente, a uma seqüência de solos expostos ao longo do Rio Pardo (**Fig. 2**) composta principalmente por LRd3. Os resultados para goetita e montmorilonita (não mostradas neste trabalho) apresentaram desempenho inferior ao mostrado na **Figura 3**, respectivamente, para hematita e caulinita.

FIG. 3a FIG. 2 FIG. 3

As **Figuras 4a e 4b** exibem as variações da razão *escala*/RMS em função dos teores de ferro total (Fe_2O_3) e de alumina (Al_2O_3) para pontos representativos dos três tipos de solos (LRd3, LEa11 e PVa) indicados na **Figura 2**. As curvas mostram que os minerais caulinita e hematita têm maior probabilidade de serem encontrados nestes locais, ou são espectralmente mais dominantes, do que a goetita e montmorilonita. Na **Figura 4a**, o maior valor da razão *escala*/RMS para hematita foi obtido para LEa11, que possui um conteúdo de ferro total superior ao do PVa, mas inferior ao do LRd3 (**Tabela 1**). Por outro lado, na **Figura 4b**, o pior resultado para caulinita é observado para LRd3 que, no entanto, possui o maior conteúdo de Al_2O_3, um indicador da presença de argilas. Galvão e Vitorello (1998) demonstraram que a profundidade das bandas de absorção não é um indicador direto do conteúdo de um determinado constituinte na amostra, em função da forte influência espectral das substâncias opacas nos solos tropicais (p.ex., matéria orgânica e magnetita). Em outras palavras, embora um latossolo roxo possa conter uma quantidade expressiva de minerais argilosos, a presença de uma pequena quantidade de magnetita tende a obliterar o surgimento de bandas de absorção bem definidas em 2200 nm. O contrário também pode ser válido para solos mais claros que podem conter pequenas quantidades de óxidos de ferro, mas bandas de absorção profundas em 900 nm, em função de possuírem uma menor quantidade de matéria orgânica. Desta forma, técnicas de classificação hiperespectral como a SFF produzirão melhores resultados, ou serão mais úteis para a identificação espectral de minerais, em regiões onde prevalecem solos de albedo intermediário a alto, mais pobres em substâncias opacas.

FIG. 4 FIG. 2 TAB. 1

A **Figura 5** possibilita a comparação entre espectros de reflectância obtidos em laboratório com o espectrorradiômetro IRIS e os extraídos da imagem AVIRIS em áreas de 3 x 3 *pixels* equivalentes aquelas em que foram calculados os valores da razão *escala*/RMS. Em geral, quando os espectros obtidos pelos diferentes sensores são comparados, observa-se uma certa concordância no formato das curvas no visível e início do infravermelho. O mesmo não ocorre no infravermelho médio, onde os espectros IRIS (Fig. 5a) são ascendentes à medida em que o albedo das amostras aumenta, ocorrendo o contrário com os espectros AVIRIS (**Fig. 5b**). Em termos de bandas de absorção, as feições decorrentes de processos de transições eletrônicas envolvendo Fe^{+3} e Fe^{+2} em 900 nm (Hunt, 1977) e de processos vibracionais envolvendo OH^- (Hunt e Salisbury, 1976) são visíveis nos dois conjuntos de dados, embora com uma melhor definição no contexto de laboratório. As causas das diferenças verificadas nos dois conjuntos de espectros ainda estão sendo investigadas, mas certamente refletem os diferentes ambientes de coleta de dados (laboratório/campo). Por exemplo, o espectro de laboratório de PVa apresenta uma feição dupla de absorção em 2200 nm típica do mineral caulinita. Esta feição não está

FIG. 5

presente no espectro AVIRIS correspondente a este solo, o qual apresenta, na **Figura 4b**, uma razão *escala*/RMS inferior a do LEa11. Nesse sentido, o aspecto côncavo observado no espectro AVIRIS de PVa em torno de 1600 nm na **Figura 5b** pode ser uma indicação da influência espectral de vegetação não-fotossinteticamente ativa. Isto poderia explicar a ausência da feição dupla de absorção característica da caulinita, embora experimentos adicionais sejam necessários para confirmar esta hipótese.

FIG. 4

FIG. 5

5 Conclusões

Os resultados da aplicação da técnica SFF indicam que as bandas de absorção que aparecem nos espectros AVIRIS, em torno de 900 e 2200 nm, estão associadas, respectivamente, com a presença de hematita e caulinita nos solos. Entretanto, não existe uma associação direta entre as características destas feições e os constituintes químicos dos solos. Em outras palavras, a identificação espectral de minerais nos solos tropicais está fortemente associadas com a presença de substâncias opacas (p. ex., matéria orgânica e magnetita), que tendem a mascarar o aparecimento de bandas de absorção bem definidas nos espectros. Conseqüentemente, para propósitos de confecção de mapas mineralógicos, a aplicação de técnicas de classificação hiperespectral será mais efetiva em regiões dominadas pela presença de solos de albedo intermediário a alto, normalmente mais pobres em materiais opacos. Além dos opacos, a influência de pequenas quantidades de vegetação verde, ou mesmo de material não-fotossinteticamente ativo, sobre o processo de classificação mineralógica hiperespectral nos solos tropicais, necessita ser melhor caracterizada.

Referências

Clark, R.N.; Roush, T.L. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. **Journal of Geophysical Research**, 89(7):6329-6340, 1984.

Clark, R.N.; Gallagher, A.J.; Swayze, G.A. Material absorption band deph mapping of imaging spectrometer data using a complete band shape least-squares fit with library reference spectra. . In: Proceedings of the Second Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (avirisd) Workshop, 2. June 4-5, 1990. **Proceedings.** Pasadena, NASA.JPL, Nov. 15, 1990. p.176-186. (JPL Publication 90-54).

Clark, R.N.; Swayze, G.A. Mapping minerals, amorphous materials, environmental materials, vegetation, water, ice, and snow, and other materials: the USGS Tricorder algorithm. In: Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, 5.. **Summaries**. Pasadena, NASA.JPL, 1995, p. 39-40. (JPL Publication 95-1)

Epiphanio, J.C.N.; Formaggio, A.R.; Valeriano, M.M.; Oliveira, J.B. de. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo.** São José dos Campos, INPE, jun. 1992. 132 p. (INPE-5424-PRP/172).

Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística/ Secretaria de Planejamento e Coordenação Geral do Mato Grosso do Sul (IBGE/SEPLAN/MS). **Macrozoneamento Geoambiental do Estado de Matogrosso do Sul.** Campo Grande/MS. SEPLAN, 1988.

Galvão, L.S.; Vitorello, I. Role of organic matter in obliterating the effects of iron on spectral reflectance and color of Brazilian tropical soils. **International Journal of Remote Sensing**, 1998 (In Press)

Goetz, A F. H.; Vane, G.; Solomon, J.E.; Rock, B. N. Imaging spectrometry for Earth remote sensing**. Science,** 228(4704):1147-1153, 1985.

Green, R.O.; Conel, J.E; Margolis, J. In-flight calibration and validation of the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). In: Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, 6. Mar. 4-8, 1996. **Summaries.** Pasadena, NASA/JPL, March 4, 1996. v.1, p.51-57. (JPL Publication 96) (Preliminary version).

Green, R.O; Conel, J.E.; Roberts, D.A. Estimation of aerosol optical depth, pressure elevation, water vapor and calculation of apparent surface reflectance from radiance by the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) using a radiative transfer code. **Proceedings**. Bellingham, WAS. SPIE, 1993. p.2-11. (SPIE, 1937).

Hunt, G.R.; Salisbury, J.W. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: XI. sedimentary rocks. **Modern Geology**, 5:211-217, 1976.

Hunt, G.R.; Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. **Geophysics,** 44(3):501-513, 1977.

Kruse, F.A.; Lefkoff, A.B.; Boardman, J.W.; Heidebrecht, 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**, 44(2/3):145-163, 1993.

Projeto RADAMBRASIL. **Folha SE22YC**; carta exploratória de uso de solos. Rio de Janeiro, 1987.

Secretaria de Planejamento e Coordenação Geral do Estado do Mato Grosso do Sul (SEPLAN/MS). **Referencial de Acesso Rodoviário em Mato Grosso do Sul.** 1990.

Tabela 1 – Resultados das análises químicas de amostras representativas dos solos estudados.

CLASSE DE SOLO	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3[1] (%)	TiO_2 (%)	M.O[2] . g/kg
LRd3	16,6	14,53	24,97	2,19	22
LEa11	9,9	7,8	3,79	0,9	3
PVa	4,2	1,94	0,45	0,37	7

Obs.: (1) conteúdo de ferro total e (2) matéria orgânica.
As classes de solos estão identificadas no texto.

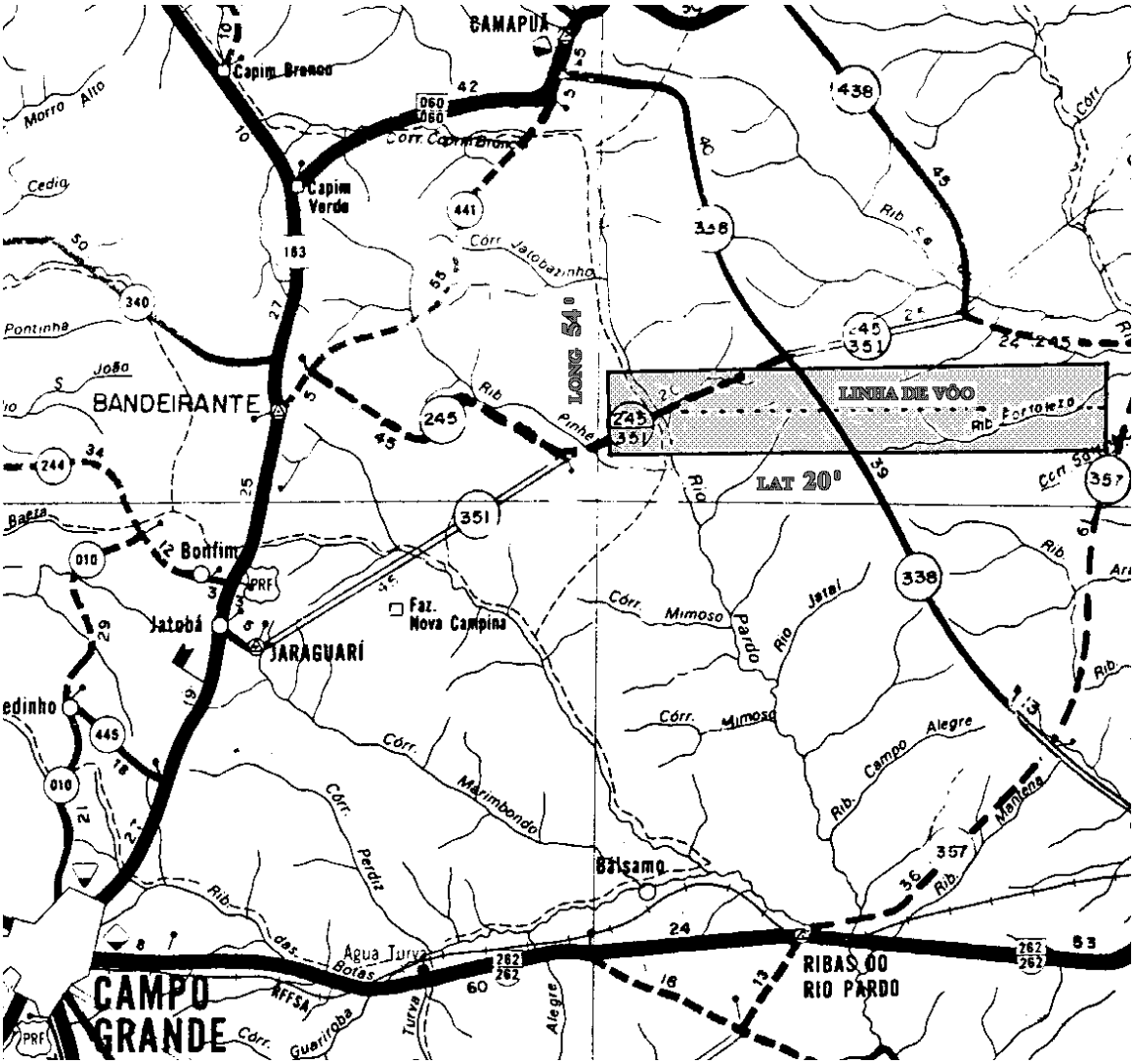


Figura 1 – Localização da área de estudo.
Fonte: Adaptado de SEPLAN/MS (1990).

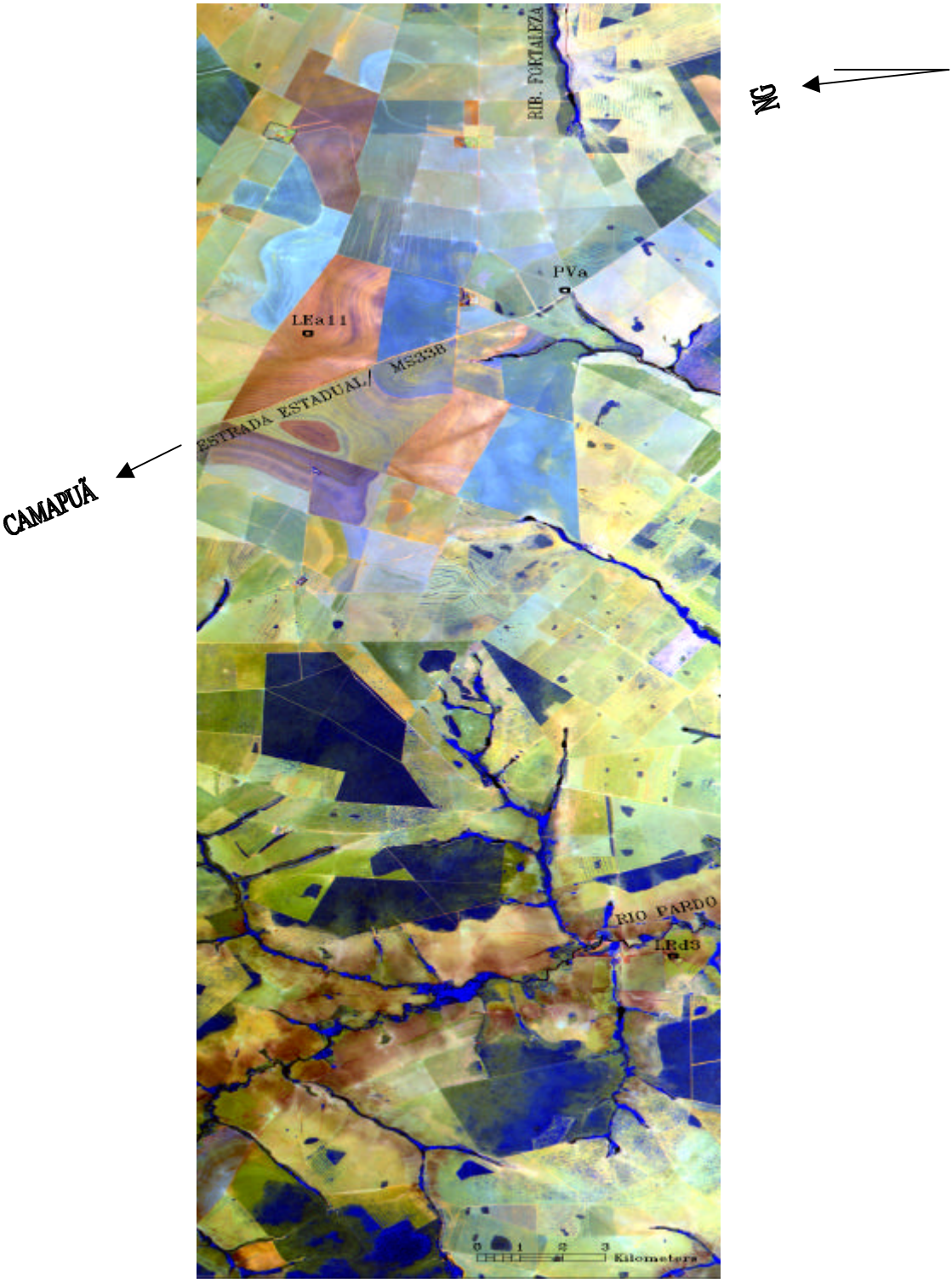
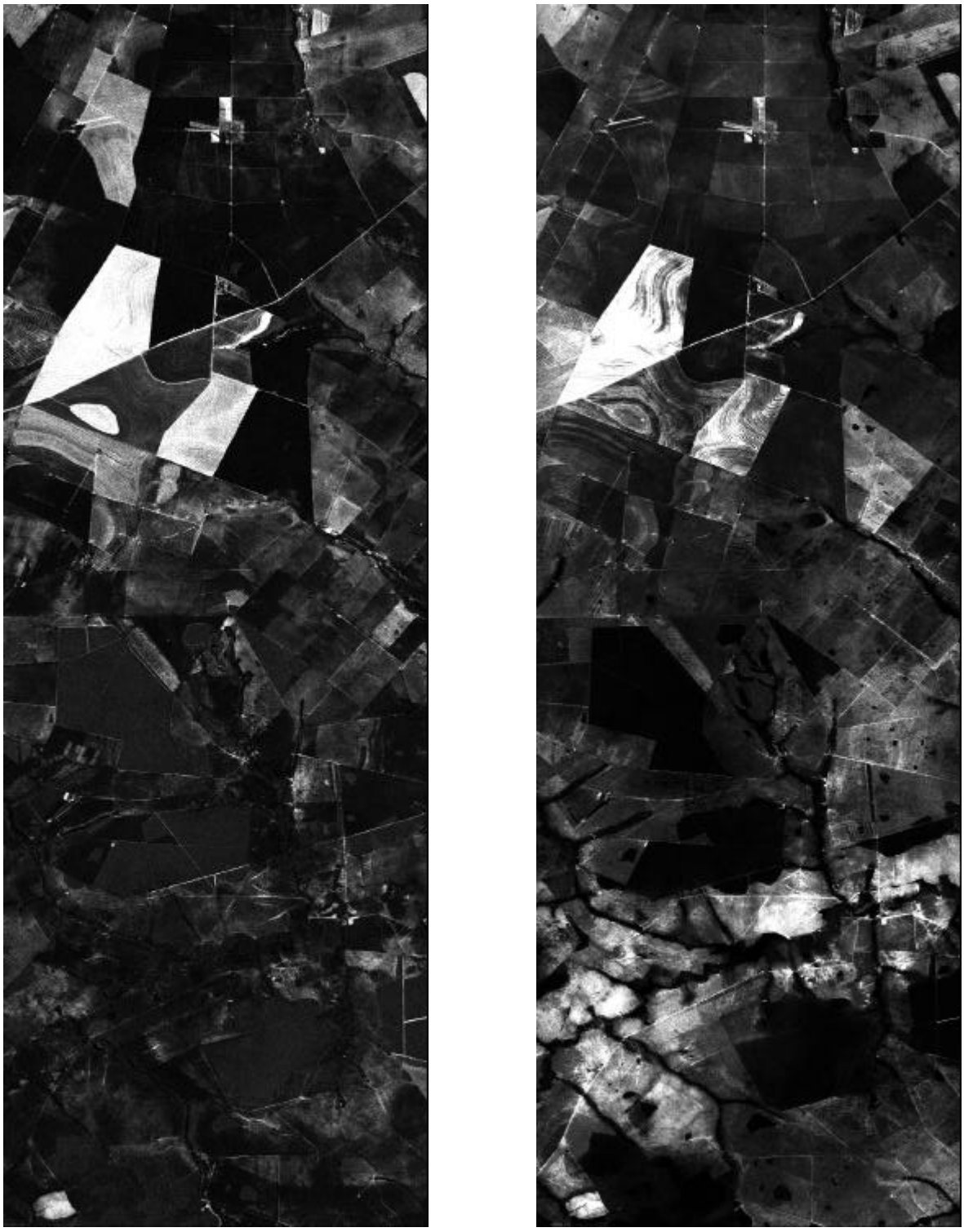


Figura 2 – Composição colorida da área de estudo, obtida com a reflectância das bandas 188 (2150 nm), 137 (1651 nm) e 50 (826 nm) do sensor AVIRIS exibidas, respectivamente, em vermelho, verde e azul. Áreas de solo exposto representativas das classes Latossolo Roxo (LRd3), Latossolo Vermelho-Escuro (LEa11) e Podzólico Vermelho-Amarelo (PVa) estão indicadas.



(a) (b)

Figura 3 – Imagens da razão *escala*/RMS para os minerais de referência caulinita (a) e hematita (b), obtidas a partir da aplicação da técnica Spectral Feature Fitting (SFF) na imagem VIRIS. Quanto mais claros forem os *pixels*, maiores as probabilidades de identicação espectral destes minerais na cena.

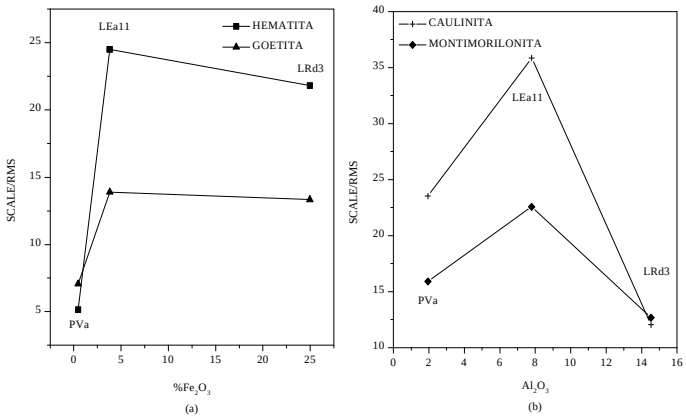


Figura 4 – Variação da razão *escala*/RMS para áreas (3 x 3 *pixels*) de solo exposto indicadas na Figura 2 (LRd3, LEa11 e PVa), em função do conteúdo de ferro total (Fe_2O_3) e de Al_2O_3, para os minerais hematita/goetita (a) e caulinita/montmorilonita (b). As abreviações dos solos são explicadas no texto.

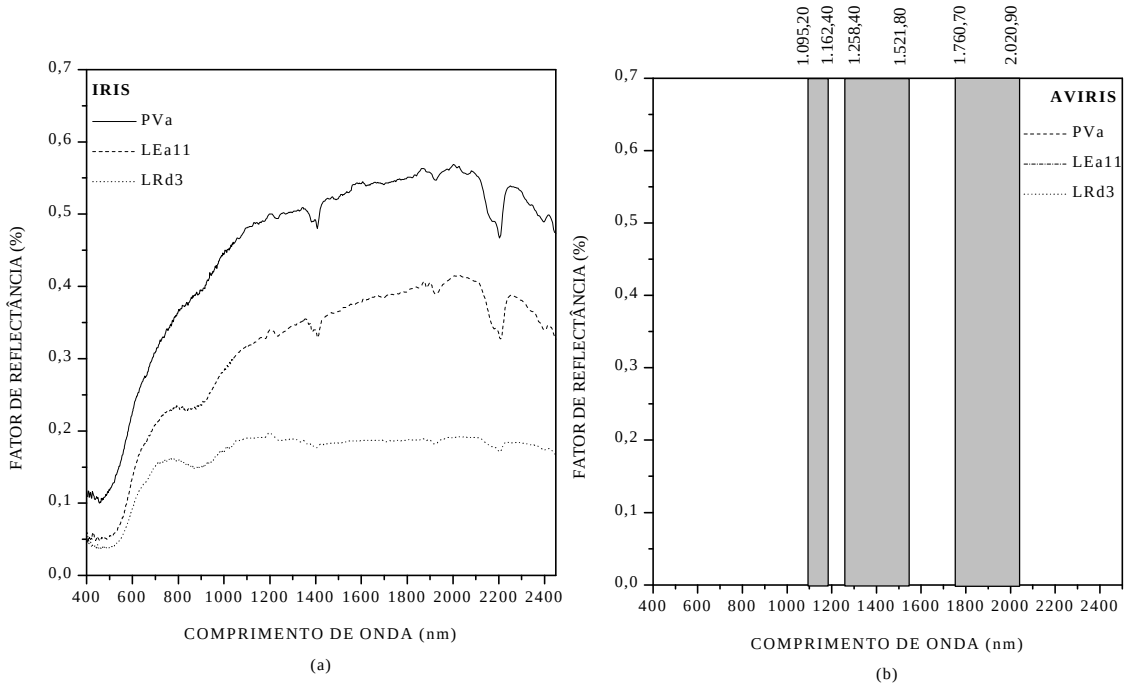


Figura 5 - Espectros de reflectância representativos de três classes de solo (LRd3, LEa11 e PVa) obtidos em laboratório com o IRIS (a) e extraídos diretamente da imagem AVIRIS (3 x 3 *pixels*) (b). As abreviações dos solos são discutidas no texto. Em (b), as faixas hachuradas indicam intervalos espectrais de forte absorção atmosférica.