

Caracterização Espectral de Solos Tropicais através de Componentes Principais e da Correlação entre Reflectância e Análises Químicas

MARCO ANTONIO PIZARRO¹
LÊNIO SOARES GALVÃO¹
JOSÉ CARLOS NEVES EPIPHANIO¹

¹INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515 - 12201-097 - São José dos Campos - SP, Brasil
pizarro@dea.inpe.br, lenio@ltid.inpe.br, epiphani@ltid.inpe.br

AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) data collected in central Brazil were used for the spectral characterization of three tropical soils. Reflectance values and constituents (total iron, organic matter, TiO_2 , Al_2O_3 and SiO_2) of samples representative of three important soil types (Terra Roxa Estruturada-TE; Latossolo Vermelho-Escuro-LE; and Areia Quartzosa-AQ) were analysed. Endmember spectra for green vegetation (Vv), nonphotosynthetic vegetation (Vnfa), water (Ag), and three soils were selected from the inspection of scatter plots derived from principal components analysis of 142 AVIRIS bands. The first principal component was used in the evaluation of the discrimination between the soils and spectral-chemical composition relationships were obtained. The results indicate a close association between the overall reflectance, in the 400-2450 nm, as expressed by the first component, and the chemical composition of the soils. The best correlation results were obtained for Fe_2O_3 , TiO_2 , Al_2O_3 , but the relationships were affected in the transition from the red to the near-infrared interval by presence of nonsoil residues (e.g., senescent vegetation or litter) over the soil surfaces.

Keywords: hyperspectral remote sensing, soil, reflectance, AVIRIS, principal components analysis.

Introdução

Os recentes avanços na tecnologia dos detectores aplicados nos novos sensores remotos possibilitaram uma significativa melhora na resolução espectral, quando comparada com as do Landsat-7 e SPOT-4. Pode-se citar, por exemplo, o satélite Terra, como parte do programa EOS (Earth Observing System), lançado em dezembro de 1999. Este satélite é constituído de cinco instrumentos, dentre os quais o ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) com 14 bandas e o MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) com 36 bandas, posicionadas nas faixas espectrais do visível, infravermelho próximo e médio (400-2500 nm) e infravermelho termal (8000-15000 nm). O lançamento recente do Hyperspectral Imager (Earth Observing-1), com 220 bandas, constitui parte do programa de tecnologias revolucionárias proposto pela NASA para o próximo milênio. Para o ano 2002, está planejado o lançamento do primeiro satélite comercial de alta resolução espectral, o ARIES (Australian Resource Information and Environment Satellite), com 105 bandas posicionadas no intervalo entre 400 e 2500 nm.

Com o advento do Sensoriamento Remoto Hiperespectral ou Espectroscopia de Imageamento, para cada pixel representando diferentes tipos de alvos na cena (p. ex., solos, rochas, vegetação e água), pode-se extrair um espectro de reflectância diretamente da imagem em um nível de resolução espectral mais próximo do obtido em condições de laboratório (Green et al., 1998). Quanto maior o número de bandas, melhor é a reconstituição de bandas de absorção espectral que podem ser usadas para a identificação de alguns materiais na cena, incluindo a indicação, na imagem, da presença de minerais espectralmente dominantes nos espectros de solos. Embora a resposta espectral do solo seja influenciada por vários fatores atuando em conjunto (matéria orgânica, óxidos de ferro, fração de argila, umidade), a reflectância de certos minerais, em alguns intervalos espectrais, se sobrepõe à do solo, o que possibilita as suas identificações remotas através de dados de alta resolução espectral.

No Brasil, dados hiperespectrais foram obtidos pelo sensor hiperespectral AVIRIS no período de agosto a setembro de 1995 durante a missão *Smoke, Sulfate, Clouds And Radiation – Brazil* (SCAR-B). As imagens foram coletadas em 224 bandas espectrais estreitas (10 nm de largura) na faixa 400-2500 nm, com resolução espacial nominal de 20 metros. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é avaliar o potencial dos dados AVIRIS para discriminação de solos em uma área situada próxima à cidade de Campo Grande (MS).

Para a análise de dados hiperespectrais, como os do AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer), há uma dificuldade em se comparar um número elevado de bandas. Por isso, é necessário uma abordagem quantitativa que facilite a análise dos dados obtidos pelo sensor. A alta dimensionalidade do conjunto de dados, que no caso é uma imagem com 614 x 2048 *pixels*, sendo que cada pixel é composto por 224 bandas amostradas entre 400-2450 nm, resulta também numa grande quantidade de informação redundante. Desta forma, a pergunta seria "como eliminar essa redundância e tornar mais eficiente a análise dos espectros de reflectância" ? Neste sentido, o presente trabalho tem de forma mais específica os seguintes objetivos: **a)** avaliar, através de uma abordagem quantitativa baseada, principalmente, na aplicação estatística da técnica Componentes Principais sobre os dados AVIRIS na faixa entre 400 e 2450 nm, a discriminação dos tipos de solos; **b)** analisar as relações entre as curvas espectrais obtidas no ambiente de aeronave (AVIRIS), com as características físico-químicas de 18 amostras de solos coletadas na área de estudo.

Material e Métodos

A área de estudo está localizada próximo à cidade de Campo Grande (MS) (19° 53'S, 53° 45'W), tendo sido selecionada pela ausência de cobertura de nuvens e de fumaça na época da aquisição dos dados AVIRIS e por conter tipos distintos de solos.

As imagens do sensor AVIRIS foram adquiridas na estação seca (agosto de 1995) em 224 bandas estreitas (10 nm de largura), posicionadas na faixa espectral de 400 a 2500 nm, com resolução espacial de 20 x 20 metros. Os dados, originalmente fornecidos em valores de radiância, foram convertidos para valores de reflectância de superfície, através do uso de um método de transferência radiativa baseada no modelo MODTRAN (Green, 1991), onde os efeitos de espalhamento e absorção atmosférica de gases como H₂O, CO₂, O₃, O₂ e CH₄ foram minimizados.

Optou-se primeiramente pela aplicação da Análise por Componentes Principais (ACP). ACP é uma técnica comum usada para reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar os fatores responsáveis pela variabilidade espectral (Smith et al., 1985; Galvão et al., 1997), e que também tem sido útil para seleção de membros de referência. No presente trabalho, optou-se pelo uso de seis membros de referência: vegetação verde (Vv); vegetação não-fotossinteticamente ativa (Vnfa); água (W) e três tipos de solos, definidos com base na escolha de pixels extremos em um diagrama de espalhamento resultante da aplicação da ACP. Os solos incluem Terra Roxa Estruturada (TE), Latossolo Vermelho-Escuro (LE) e Areia Quartzosa (AQ). A escolha da água em lugar da sombra deveu-se à dificuldade de identificar pixels de alvos sombreados em função das características planas do relevo. A partir de então foram escolhidos alvos com resposta espectral contrastante (p. ex., alvos claros e escuros na imagem da primeira componente principal) e que representassem uma das três classes de solos, e que por sua vez tiveram os seus espectros de reflectância AVIRIS correspondentes recuperados e analisados. Com isso verificou-se a possibilidade de discriminação das diferentes classes de solos identificados na área de estudo na imagem da primeira componente principal. A idéia foi também identificar áreas homogêneas com diferentes solos expostos de onde os espectros de reflectância obtidos dos *pixels* da cena pudessem ser extraídos e correlacionados com os dados químicos obtidos a partir de 18 amostras de solos.

No trabalho de campo foram coletadas amostras de solos, que corresponderam a Terra Roxa Estruturada (TE), Latossolo Vermelho-Escuro (LE) e Areia Quartzosa (AQ). Muitos dos locais visitados para amostragem foram definidos a partir de análises prévias dos dados AVIRIS, especialmente pela inspeção do espectro de reflectância do *pixel*. Tomou-se o cuidado de coletar amostras em áreas que não pertencessem a transições entre uma classe e outra de solo; para isso considerou-se uma área homogênea mínima de aproximadamente 220 x 220 m² (11 x 11 *pixels*) em cada ponto amostrado, já que a precisão nas medidas pelo GPS é de ±100 m (±5 *pixels*). De um total de 88 amostras de solos coletadas apenas 18 foram selecionadas para o propósito das análises químicas para representar a variabilidade das características físico-químicas do conjunto total de amostras.

Para cada amostra foram determinados os teores de matéria orgânica, óxido de ferro (Fe₂O₃), óxido de titânio (TiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e de óxido de silício (SiO₂), de acordo com os procedimentos descritos em Camargo et al. (1986). A determinação de matéria orgânica (M.O.) foi feita de acordo com a metodologia descrita em Rajj e Quaggio (1983).

Finalmente, para estabelecer as relações entre dados espectrais e constituintes químicos dos solos, a análise de correlação foi aplicada com base nos espectros da imagem (AVIRIS) para os 18 *pixels* situados bem próximos dos locais de onde foram coletadas as amostras. Os cálculos foram feitos em intervalos de 20 nm na faixa espectral de 400-2450 nm. Diagramas de espalhamento foram gerados para explicitar estas relações. A escolha do melhor ajuste das curvas em relação aos diagramas de espalhamento, para um dado comprimento de onda, foi feita com o seguinte critério: o maior valor do coeficiente de correlação linear com o menor erro padrão. Para isso, considerou-se que os dados espectrais seguiam uma distribuição normal. Em ambas as análises (ACP e correlações), as bandas ao redor dos intervalos de forte absorção atmosférica (1400 e 1900 nm) não foram consideradas.

Resultados e Discussão

A **Figura 1** mostra os fatores de peso para os dois primeiros autovetores (E_1 e E_2) obtidos a partir da ACP de 142 bandas AVIRIS. A análise dos fatores de peso dos autovetores, em função do comprimento de onda, através do exame da magnitude e do sinal (valores positivos e negativos) fornece a indicação de como as características espectrais são responsáveis pela variância estatística mapeada em cada Componente Principal (CP). O primeiro autovetor E_1 associada à primeira Componente Principal (CP_1), descreve a maior parte da variabilidade dos dados e responde por 83,78% da variância total dos dados, e pode ser interpretada como uma medida da variação de albedo. O termo albedo será utilizado no presente trabalho para expressar a reflectância média no intervalo de 400 e 2450 nm. E_2 , responsável por 13,10% da variância, representa uma relação negativa de covariância entre as bandas do infravermelho próximo (fatores de peso positivos em torno de 1000 nm) e infravermelho médio (fatores de peso negativos em torno de 2000 nm). Na verdade, a curva de E_2 na **Figura 1** reproduz aproximadamente o espectro da vegetação verde. Desta forma a segunda Componente Principal (CP_2) é útil para diferenciar o alvo vegetação verde na cena.

A **Figura 2** mostra o diagrama de espalhamento entre os valores CP_2 e CP_1 onde estão posicionados e indicados os membros de referência para Vv, Vnfa, AQ, LE, TE e Ag. Os espectros de reflectância AVIRIS típicos destes membros de referência estão ilustrados nas **Figuras 3a e 3b**, e suas localizações espaciais estão indicadas na imagem CP_1 da **Figura 4a**. A vegetação verde e a vegetação não-fotossinteticamente ativa são, respectivamente, floresta ribeirinha e provavelmente uma cultura senescente de milho. O espectro da água é um pequeno açude raso. Em termos das variações em CP_1 , o albedo aumenta de W e Vv (baixos valores CP_1 na **Figura 2**; baixos valores de reflectância média na **Figura 3a**; e *pixels* escuros na **Figura 4a**) para Vnfa (altos valores CP_1 na **Figura 2**; altos valores de reflectância média na **Figura 3a** e *pixels* claros na **Figura 4a**). Por outro lado, na CP_2 , Vv e Vnfa apresentam-se com altos valores CP_2 na **Figura 2** e *pixels* claros na **Figura 4b**, quando comparados com outros membros de referência.

Em relação aos três tipos de solos encontrados na área de estudo, os seus espectros de reflectância são ilustrados na **Figura 3b**. Quando comparado com Areia Quartzosa, os solos Latossolo Vermelho-Escuro e Terra Roxa Estruturada possuem menores valores de reflectância (menores escores CP_1 na **Figura 4a**) em função de conterem maiores quantidades de matéria orgânica, ferro total (Fe_2O_3), TiO_2 (**Tabela 1**) e de minerais opacos (p. ex., magnetita e ilmenita). Estes constituintes tendem a reduzir a reflectância dos solos (Stoner e Baumgardner, 1981), o que fica bem evidente na **Figura 2** no eixo CP_1 . No espectro de TE da **Figura 3b**, uma fraca e ampla banda de absorção pode ser observada, na faixa entre 700 e 1000 nm, a qual é produzida pela interação da energia radiante com óxidos de ferro (Hunt, 1977). No espectro de LE, a principal banda de absorção observada está centrada em torno de 2200 nm, sendo produzida pela interação da energia radiante com minerais argilosos (Hunt e Salisbury, 1970). Apesar de exibir uma menor quantidade de minerais argilosos, o espectro de AQ também exibe esta feição.

A distribuição espectral dos coeficientes de correlação linear entre a reflectância AVIRIS e os constituintes químicos das 18 amostras de solos são mostradas na **Figura 5**. Os coeficientes de correlação para todos os seis constituintes químicos são significativos ao nível de 0,05, com

exceção dos resultados obtidos em 461 nm. Na **Figura 5**, todas as curvas apresentam coeficientes de correlação negativos, isto é, um incremento na quantidade dos constituintes químicos implica em um decréscimo na reflectância. Entretanto, os maiores coeficientes de correlação são obtidos para o TiO_2 seguido pelo Fe_2O_3 e Al_2O_3 , com os mais altos coeficientes de correlação ao redor de 1075, 2232 e 2210 nm, respectivamente. As formas das curvas são bem similares e estão associadas com a covariância positiva entre os constituintes dos solos.

Os exemplos das melhores correlações entre os constituintes dos solos e a reflectância são apresentados na **Figura 6**. É ilustrada a relação negativa entre os teores de M.O., TiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . As funções que melhor explicam a maior parte das covariações dos dados são não lineares, mostrando que nem sempre o ajuste linear é o melhor. Por exemplo, a **Figura 6d** mostra uma alta correlação positiva, $r=0,949$ com ajuste não linear entre o Fe_2O_3 e a reflectância em 2232 nm. Na curva mostrada na **Figura 5** para o mesmo constituinte e comprimento de onda foi obtido um valor $r=-0,8609$ a partir de um ajuste linear. Ainda pela **Figura 5**, os resultados mostram que as relações entre a reflectância dos *pixels* e os constituintes dos solos são em geral concordantes com as obtidas em experimentos de laboratório com amostras de superfície de solos tropicais. A exceção são os baixos valores dos coeficientes de correlação encontrados no visível para a relação entre a reflectância e M.O. De acordo com Coleman et al. (1991), as relações entre os constituintes dos solos e a reflectância são geograficamente dependentes e podem ou não ser aplicadas em outras áreas. Entretanto, estudos realizados em laboratório com solos tropicais tem mostrado que a M.O. é a principal componente responsável pela redução na reflectância entre 550-700 nm (Galvão e Vitorello, 1998). Outro importante aspecto analisado por Galvão et al. (1997) é que para os solos vermelhos escuros ricos em minerais opacos, como TE e LE, as variações no conteúdo da M.O. podem produzir pequenas mudanças espectrais na região do visível.

Uma provável causa desta perturbação nas relações entre os constituintes químicos dos solos e a reflectância na região do visível seria a presença de resíduos de Vv e/ou Vnfa na superfície dos solos, que influenciaria sua resposta espectral extraída da imagem AVIRIS em relação aos dados de laboratório e que estaria relacionada com as dissimilaridades entre os ambientes de aquisição dos dados (aeronave e laboratório).

Conclusões

1. A primeira componente principal, que expressa a reflectância média dos alvos (albedo), é útil na diferenciação dos solos tropicais. Solos de baixo albedo (p. ex., TE), mais ricos em matéria orgânica e óxidos de ferro, apresentam menores escores ou pixels mais escuros na imagem CP1 do que solos de maior albedo (p. ex., AQ), com uma menor quantidade desses constituintes;
2. As melhores correlações entre a reflectância dos pixels de solos na imagem AVIRIS e seus constituintes foram obtidas, respectivamente, para TiO_2 , ferro total, Al_2O_3 e matéria orgânica. Os bons resultados obtidos para os dois primeiros constituintes indicam que tais relações podem ser usadas para produzir mapas mostrando a distribuição espacial dos mesmos na cena para áreas de solo exposto ou sem fortes misturas com outros componentes de cena.

Referências

- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC**. Campinas, 1986, 94p. (IAC Boletim Técnico 106).
- COLEMAN, T.L.; AGBU, P.A.; MONTGOMERY, O.L.; GAO, T.; PRASAD, S. Spectral band selection for quantifying selected properties in highly weathered soils. **Soil Science**, v. 151; n. 5, p. 355-361, May 1991.
- GALVÃO, L.S.; VITORELLO, I.; FORMAGGIO, A.R. Relationships of spectral reflectance and color among near- and sub-surface horizons of tropical soil profiles. **Remote Sensing of Environment**, v.61, p.24-33, 1997.
- 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**, v.19, p.1969-1979, 1998.
- GREEN, R.O.; EASTWOOD, M.L.; SARTURE, C.M.; CHRIEN, T.G.; ARONSSON, M.; CHIPPENDALE, B.J.; FAUST, J.A.; PAVRI, B.E.; CHOVIT, C.J.; OLAH, M.R.; WILLIAMS, O. Imaging spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). **Remote Sensing of Environment**, v.65, p.227-248, 1998.
- GREEN, R.O. Retrieval of reflectance from AVIRIS-measured radiance using a radiative transfer code. In: AIRBORNE VISIBLE/INFRARED IMAGING SPECTROMETER (AVIRIS) WORKSHOP, 3., Pasadena. **Proceedings...** JPL Publication 91-28, Jet Propulsion Laboratory, p. 200-210, 1991
- HUNT, G.R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near-infrared. **Geophysics**, v.42, p.501-513, 1977.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I. silicate minerals. **Modern Geology**, v.1, p.283-300, 1970.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 40 p., 1983 (IAC Boletim Técnico 81).
- SMITH, M.O.; JOHNSON, P.E.; ADAMS, J.B. Quantitative determination of mineral types and abundances from reflectance spectra using principal components analysis. **Journal of Geophysical Research**, v.90, p.C797-C804, 1985.
- STONER, E.R.; BAUMGARDNER, M.F. Characteristic variations in reflectance of surface soils. **Soil Science Society American Journal**, v.45, p.1161-1165, 1981.

Tabela 1 - Valores médios e desvio-padrão (entre parênteses) das análises químicas e mineralógicas de amostras dos solos Terra Roxa Estruturada (TE), Latossolo Vermelho-Escuro (LE) e Areia Quartzosa (AQ). MO e Fe₂O₃ expressam, respectivamente, os conteúdos de matéria orgânica e de ferro total. N é o número de amostras usado nas determinações.

Solo	MO (g/kg)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	N
TE	25,63 (11,94)	20,31 (7,82)	12,32 (2,09)	20,72 (6,59)	2,06 (0,25)	8
LE	9,29 (7,16)	5,91 (3,17)	5,24 (3,43)	2,68 (1,14)	0,73 (0,20)	7
AQ	10,0 (3,61)	4,27 (1,50)	3,16 (2,03)	1,01 (0,53)	0,49 (0,10)	3

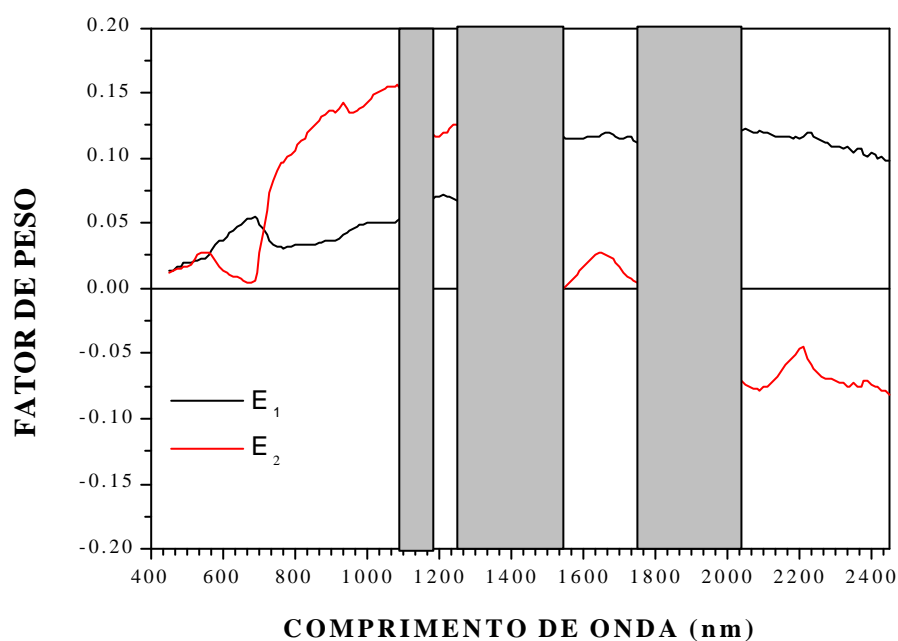


Fig.1- As duas primeiras curvas dos autovetores E₁ e E₂ obtidas a partir das análises das principais componentes. Eles foram obtidos a partir de 142 bandas selecionadas na imagem reflectância de superfície.

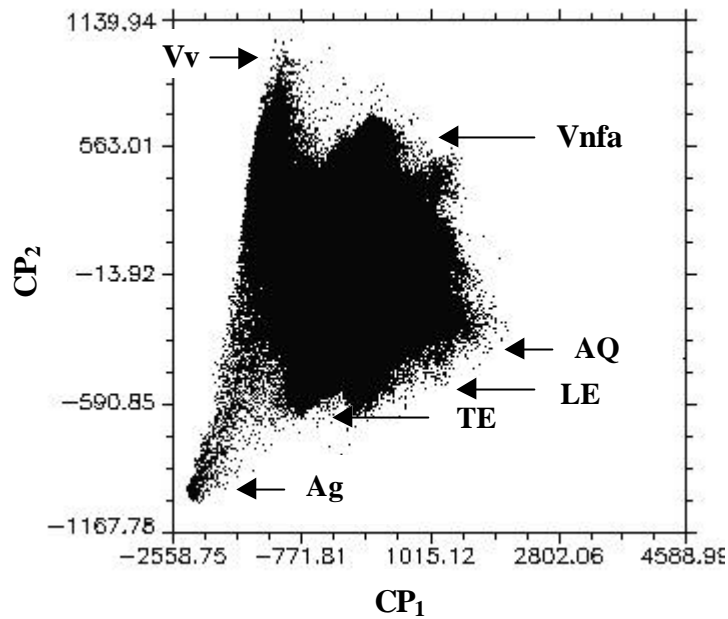


Fig. 2 - Diagrama de espalhamento dos valores CP_2 e CP_1 . A posição espectral dos membros de referência selecionados é mostrada: vegetação verde (Vv); vegetação não-fotossinteticamente ativa (Vnfa); TE= Latossolo Roxo; LE=Latossolo Vermelho Escuro; AQ= Areia Quartzosa e Ag= Água.

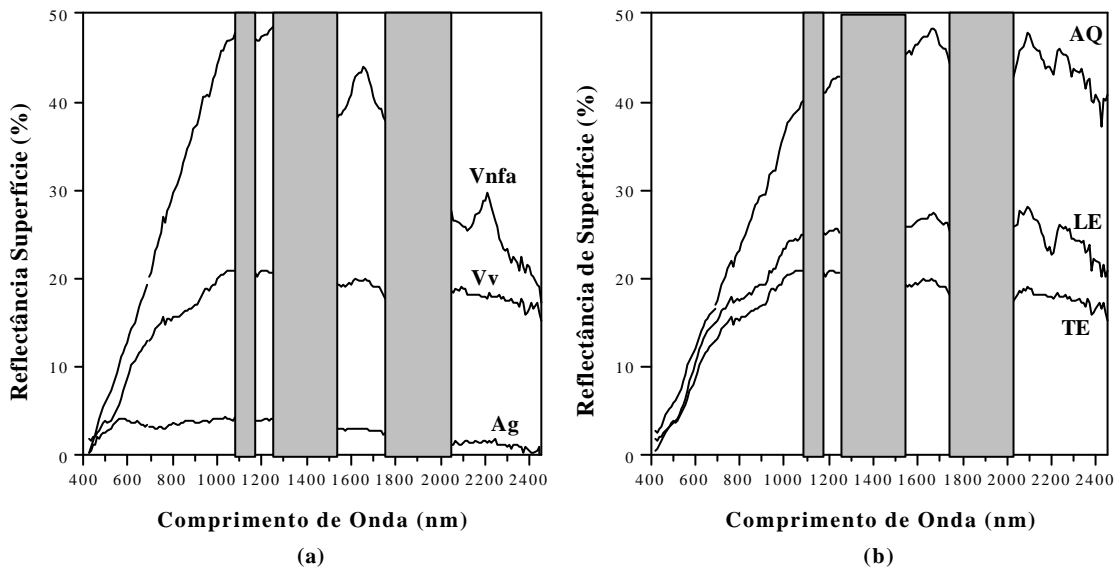


Fig. 3 - Espectros de reflectância AVIRIS dos membros indicados na Figura 2. A coluna em 1100 nm foi posicionada em função do ruído resultante do procedimento de correção atmosférica, enquanto as posicionadas em 1400 e 1900 nm indicam fortes intervalos de absorção atmosférica.

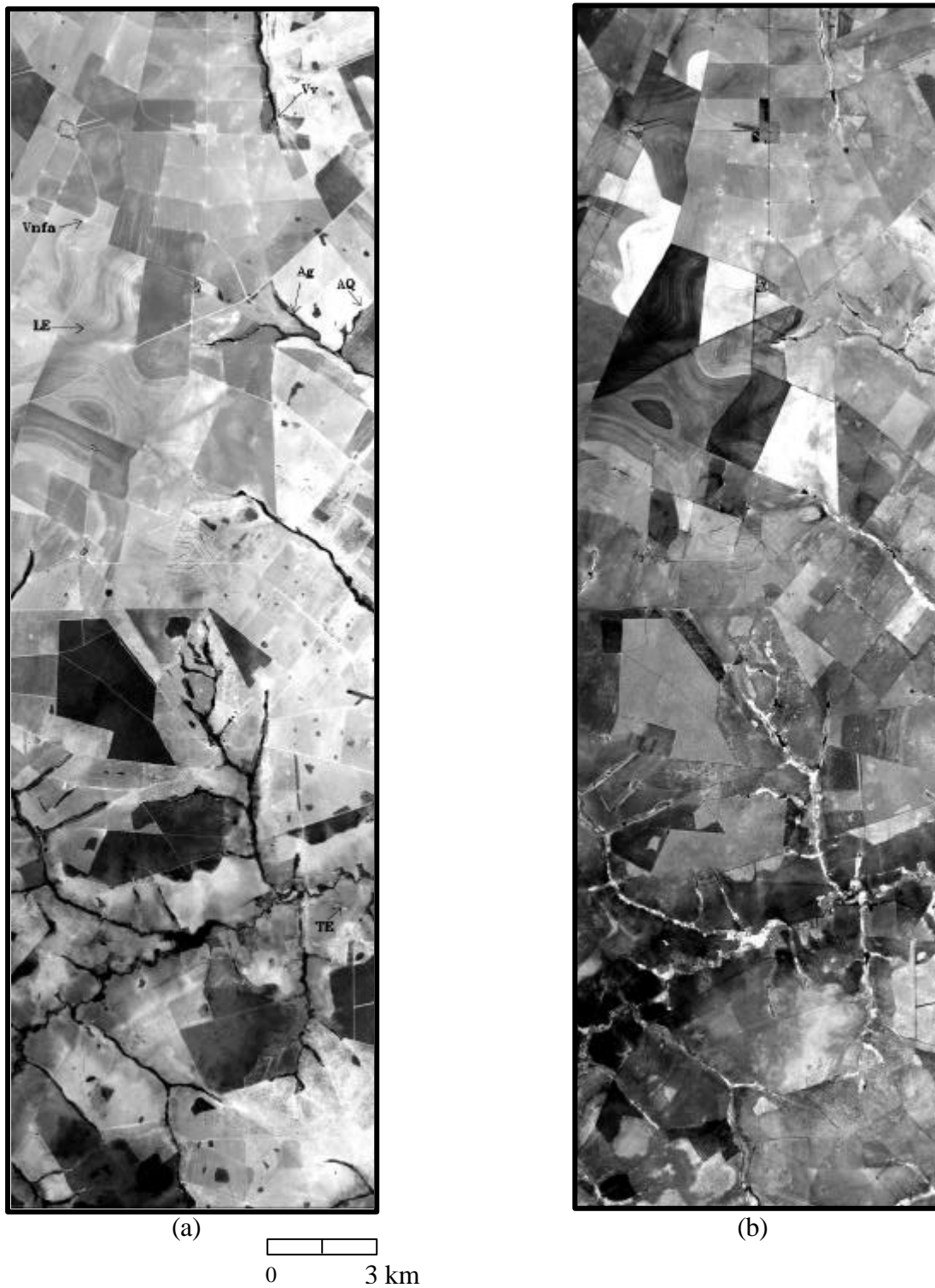


Fig. 4 – Imagens das duas primeiras componentes principais (CP_1 em (a) e CP_2 em (b)), obtidas a partir de 142 bandas do AVIRIS. A localização dos membros de referência na cena está indicada em a). Os espectros destes membros locais estão ilustrados na Figura 3.

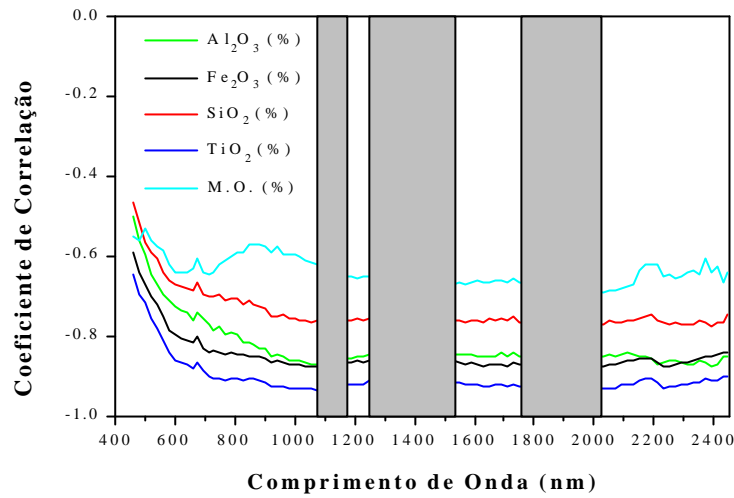


Fig. 5 – Correlação entre os dados espectrais obtidos pelo AVIRIS e os constituintes químicos de 18 amostras de solos.

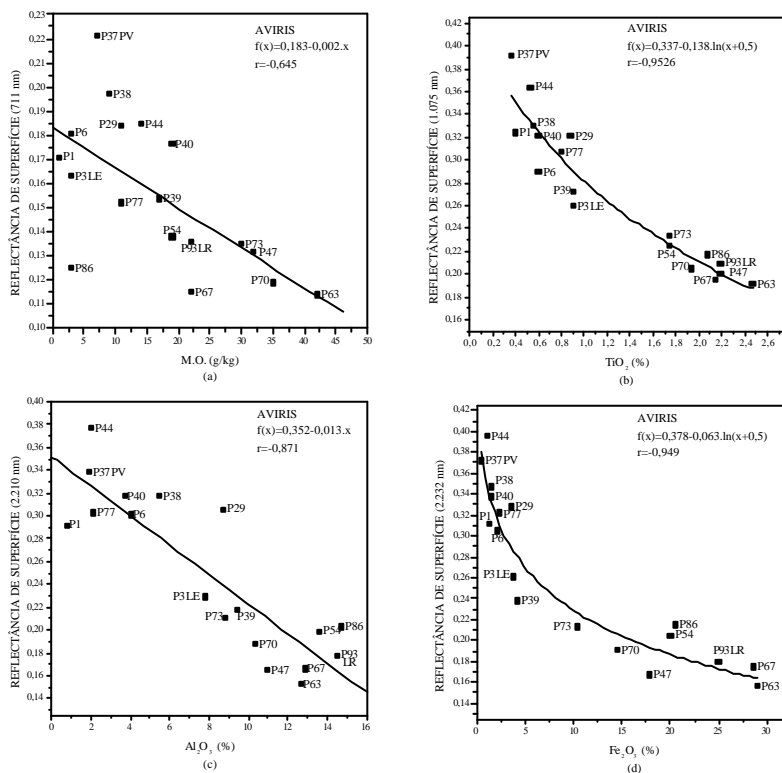


Fig. 6 - Diagramas de espalhamento para os valores de reflectância AVIRIS em 692 nm versus M.O. (g/kg) em (a), em 1075 nm versus TiO_2 (%) em (b), em 2210 nm versus Al_2O_3 (%) em (c), e em 2322 nm versus Fe_2O_3 (%) em (d).