

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-7249-TDI/693

**SENSORIAMENTO REMOTO HIPERESPECTRAL PARA A
CARACTERIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO MINERAL EM
SOLOS TROPICAIS**

Marco Antonio Pizarro

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. José Carlos Neves Epiphany e pelo Dr. Lênio Soares Galvão, aprovada em 21 de junho de 1998.

INPE
São José dos Campos
1999

528.711.7 : 549

PIZARRO, M. A.

Sensoriamento remoto hiperespectral para a caracterização e identificação mineral em solos tropicais / M. A.

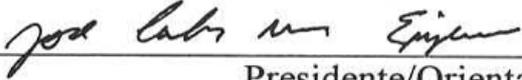
Pizarro – São José dos Campos: INPE, 1998.

194p. – (INPE-7249-TDI/693).

1.Espectrômetro de imageamento. 2.Sensoriamento remoto. 3.Espectrômetro imageador aerotransportado no visível e infravermelho (AVIRIS). 4.Solos. 5.Identificação mineral. 6.Reflectância. I.Título.

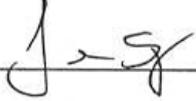
Aprovado pela Banca Examinadora em
cumprimento a requisito exigido para a
obtenção do Título de **Mestre em**
Sensoriamento Remoto.

Dr. José Carlos Neves Epiphânio



Presidente/Orientador

Dr. Lênio Soares Galvão



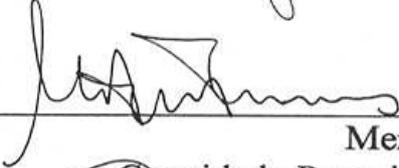
Orientador

Drª Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo



Membro da Banca

Dr. Mauro Antônio Homem Antunes



Membro da Banca
Convidado Pesquisador FAPESP

Dr. Luciano José de Oliveira Accioly



Membro da Banca
Convidado EMBRAPA/CNPS-Recife

Candidato: Marco Antônio Pizarro

À Lígia, esposa e amiga, pelo inestimável apoio, incentivo e paciência; à Raíssa pelos felizes dias de brincadeiras domésticas, imprescindíveis, ao longo destes anos; e aos meus pais, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. José Carlos Neves Epiphanyo, pela orientação, dedicação, empenho na resolução dos problemas defrontados e pela amizade demonstrada no transcorrer do trabalho.

Ao Dr. Lênio Soares Galvão pela orientação, experiência e pelas valiosas discussões durante a elaboração do trabalho.

Ao Dr. Mário Luiz Selingardi, chefe da Divisão de Eletrônica Aeroespacial (DEA) do INPE, por ter-me liberado das atividades da divisão e facilitado a aquisição de equipamentos e *softwares* para a realização deste trabalho.

Ao Eng. e M. Sc. Amauri Silva Montes, chefe do grupo de Eletro-óptica da DEA/INPE, pelo incentivo à realização deste trabalho.

Ao Dr. Henrique de Oliveira, pesquisador do Centro de Pesquisa Agropecuária do Oeste /EMBRAPA (Dourados/MS), pelo mapa de solo e dos perfis da região de Campo Grande/MS.

Ao Laboratório de Análises de Solos do Departamento de Ciência de Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – USP, pelas análises físico-químico-mineralógicas.

Ao Laboratório de Radiometria (LARAD) do INPE, pelas facilidades na aquisição dos dados espectrais.

Ao Laboratório de Tratamento de Imagens (LTID) do INPE, especialmente ao pessoal de apoio técnico na resolução de algumas questões técnicas.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelos recursos que forneceu para a execução das atividades.

Aos funcionários da biblioteca do INPE, pelo atendimento exemplar ao longo destes anos.

A todas as pessoas que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o uso dos dados gerados pelo espectrômetro imageador *Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer* (AVIRIS) durante a missão *Smoke, Sulfate, Clouds, And Radiation – Brazil* (SCAR-B), no período de agosto a setembro de 1995, para a caracterização espectral e identificação mineral em solos de uma área de estudo localizada próximo à cidade de Campo Grande (MS). As imagens foram convertidas de valores de radiância para reflectância de superfície, através de um método de correção atmosférica baseado no modelo MODTRAN. Para facilitar a análise das características espectrais da área de estudo e da discriminação dos principais tipos de solos presentes, a Análise por Componentes Principais (ACP) foi aplicada sobre as imagens *Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer* (AVIRIS) para reduzir a alta dimensionalidade de seu conjunto de bandas. As relações entre as curvas espectrais obtidas para 18 amostras de solos em laboratório pelo sensor *InfraRed Intelligent Spectroradiometer* (IRIS) e os espectros AVIRIS de *pixels* aproximadamente correspondentes aos locais de amostragem em campo foram estudadas. Para tal finalidade, a análise de correlação, a análise derivativa e o cálculo do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), a partir dos espectros dos *pixels* e das amostras de solo, foram sequencialmente aplicados. Finalmente, a técnica *Spectral Feature Fitting* (SFF) foi usada para a identificação na cena de alguns minerais do grupo dos óxidos de ferro (goetita e hematita) e do grupo das argilas (caulinita, montmorilonita e gibbsita). Os resultados obtidos indicaram que: (a) as classes de solo Podzólico Vermelho-Amarelo (PV), Latossolo Vermelho-Escuro (LE) e Latossolo Roxo (LR) podem ser discriminadas, principalmente, em função de seu albedo (primeira Componente Principal - CP₁). A variação na forma dos espectros, associada a CP₂ e CP₃, propicia a discriminação da PV em relação aos LR e LE; (b) as relações entre os espectros de laboratório (IRIS) e de aeronave (AVIRIS) refletem as diferenças inerentes aos dois ambientes de aquisição de dados. A contaminação de *pixels* por resíduos de vegetação fotossinteticamente ativa ou inativa afeta as correlações entre os dois conjuntos de dados, especialmente, na faixa entre 500 e 1.200 nm; (c) os solos da área de estudo são espectralmente dominados pela presença de hematita e caulinita, de acordo com os resultados obtidos com o uso da técnica SFF.

HYPERSPECTRAL REMOTE SENSING FOR MINERAL CHARACTERIZATION AND IDENTIFICATION IN TROPICAL SOILS

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the use of the data generated by the imaging spectrometer Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer (AVIRIS) during the mission Smoke, Sulfate, Clouds, And Radiation – Brazil (SCAR-B), in the period of August to September of 1995, for the spectral characterization and mineral identification in soils. The study area was near *Campo Grande* (MS) city, Brazil. The AVIRIS data were converted from radiance values to surface reflectance through a method of atmospheric correction based on the MODTRAN radiative transfer model. In order to make the spectral analysis of the soil characteristics and to discriminate the main types of soils present in the area, Principal Components Analysis (PCA) was applied on the AVIRIS data. PCA reduced the high dimensionality of AVIRIS data. AVIRIS spectral data were compared to laboratory IRIS (InfraRed Intelligent Spectoradiometer) data of 18 soil samples. Correlation analysis, derivative analysis and the calculation of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), were applied for both laboratory and AVIRIS data. Finally, the Spectral Feature Fitting (SFF) technique was used for the identification of some minerals in the AVIRIS scene. The main minerals studied were from the group of the iron oxides (hematite and goethite) and from the group of the clays (kaolinite, montmorillonite and gibbsite). The main results were: (a) the soil classes *Podzólico Vermelho-Amarelo* (PV, Arenica Abruptic Paleudult), *Latossolo Vermelho-Escuro* (LE, Typic Haplorthox) and *Latossolo Roxo* (LR, Typic Acrorthox) could be discriminated, mainly, in function of their albedo (first Principal Component - PC₁). The variation in the shape of the spectra, associated with PC₂ and PC₃, allowed the discrimination of PV in relation to LR and LE; (b) the relationships among the laboratory (IRIS) and field (AVIRIS) spectra reflected the inherent differences between both data sources mainly due to the influence of the atmosphere; c) the pixel contamination by residues of photosynthetic or non-photosynthetic vegetation affected the correlations between the two groups of data, especially in the 500-1,220 nm spectral region; (d) the soils in the studied area are spectrally dominated by the presence of hematite and kaolinite, according to the results obtained from the use of the SFF technique. The results showed the potential of imaging spectroscopy in characterizing the albedo variations, shapes of the spectra and mineral absorption. Thus, by using this approach, it was possible to discriminate different tropical soil classes and to identify surface materials on a pixel basis.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	27
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1 - Fator de reflectância	31
2.2 - Comportamento espectral dos solos	32
2.3 - Parâmetros do solo que influenciam a reflectância	37
2.3.1 - Óxidos de ferro	37
2.3.2 - Minerais da fração argila	39
2.3.3 - Material de origem	41
2.3.4 - Cobertura vegetal com e sem atividade fotossintética	42
2.3.5 - Influência da camada superficial	45
2.3.6 - Umidade do solo	45
2.3.7 - Textura e estrutura	46
2.3.8 - Matéria orgânica	47
2.4 - Sensor hiperespectral AVIRIS	48
2.4.1 - Sensoriamento remoto hiperespectral	48
2.4.2 - Histórico	50
2.4.3 - Concepção	51
2.4.4 - Aplicações	54
2.4.5 - Calibração do sensor AVIRIS	57
2.4.5.1 - Métodos de obtenção da imagem reflectância	59
2.4.6 - Métodos de análise dos dados AVIRIS	61
CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS	63
3.1 - Seleção da área de estudo	63
3.1.1 - Descrição geral da área de estudo	66
3.1.1.1 - Geologia	67
3.1.1.2 - Características climáticas	67
3.1.1.3 - Vegetação	68
3.1.1.4 - Tipos de solos	69
3.2 - Correção dos dados AVIRIS para os efeitos de absorção e espalhamento atmosféricos	73

3.3 - Caracterização da reflectância espectral da área de estudo através de análise por componentes principais dos dados AVIRIS	76
3.4 - Amostras de solos	78
3.4.1 - Seleção dos locais de amostragem	78
3.4.2 - Obtenção dos dados de reflectância espectral em laboratório	80
3.4.3 - Análises físico-químicas e mineralógicas	83
3.5 - Relações entre dados de reflectância do AVIRIS (aeronave) e do IRIS (laboratório), e características físico-químicas dos solos	84
3.5.1 - Análise adicional de dados	85
3.6 - Identificação mineral a partir dos dados AVIRIS através da técnica SFF	87
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	91
4.1 - Características da reflectância espectral da área de estudo através da análise por componentes principais	91
4.1.1 - Análise da primeira componente principal	93
4.1.2 - Análise da segunda componente principal	95
4.1.3 - Análise da terceira componente principal	99
4.1.4 - Diferenciação dos solos através das componentes principais	104
4.2 - Correlações entre características dos solos e dados espectrais de aeronave (AVIRIS) e de laboratório (IRIS)	108
4.2.1 - Relações entre constituintes físico-químicos	108
4.2.2 - Relações entre as reflectâncias obtidas pelos sensores IRIS e AVIRIS	110
4.2.2.1 - Comparação entre os espectros de reflectância para as três classes de solo ..	110
4.2.2.2 - Correlação entre os dados espectrais AVIRIS e IRIS	112
4.2.2.3 - Caracterização das diferenças espectrais entre dados AVIRIS e IRIS por análise derivativa	116
4.2.2.4 - Caracterização das diferenças espectrais entre dados AVIRIS e IRIS através do cálculo do NDVI	119
4.2.3 - Relações entre reflectâncias (IRIS e AVIRIS) e análises físicas	122
4.2.4 - Relações entre dados espectrais IRIS e AVIRIS e análises químicas	126
4.3 - Identificação mineral a partir dos dados AVIRIS através da técnica SFF	132
4.3.1 - Imagens pós-classificadas	139
4.3.2 - Feições de absorção espectral em dados IRIS e AVIRIS versus identificação mineral	142
4.3.2.1 - Grupo dos óxidos de ferro	142
4.3.2.2 - Grupo das argilas	144
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO	151
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157
APÊNDICE A - PARÂMETROS UTILIZADOS NO MODELO DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA MODTRAN 3 (Green et al., 1993)	179

APÊNDICE B - TABELA B1 - DADOS DE CALIBRAÇÃO ESPECTRAL DO SENSOR AVIRIS PARA A TEMPORADA REALIZADA EM 1995	187
APÊNDICE C - TABELA C1 - PONTOS IDENTIFICADOS E GEO-REFERENCIADOS VISITADOS DURANTE O TRABALHO DE CAMPO E PLOTADOS NA FIGURA 3.3	191
APÊNDICE D - TABELA D1 - COMPRIMENTOS DE ONDA UTILIZADOS NOS PROCESSAMENTOS ESTATÍSTICOS E NA ANÁLISE DERIVATIVA	193
APÊNDICE E - TABELA E1 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICO-MINERALÓGICAS	195

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Curvas típicas de reflectância de vegetação verde, solo seco e água limpa.	34
2.2 - Espectros de reflectância da caulinita, nontronita e illita	41
2.3 - Espectros de reflectância para diferentes estágios fisiológicos da folha da faia. Em (1) o espectro obtido é de uma folha verde escuro, em (2) de uma folha verde amarelada, em (3) de uma folha vermelho-alaranjada, em (4) de uma folha marrom, e em (5) de uma folha morta (seca).	43
2.4 - Reflectância espectral de materiais secos obtidos do pinheiro.	44
2.5 - Representação esquemática do sensoriamento remoto hiperespectral.....	48
2.6 - Efeito da variação da resolução espectral sobre o espectro de reflectância da gibbsita.	49
2.7 - Curva sinal/ruído do sensor AVIRIS para os anos de 1987, 1994 e 1997.....	51
2.8 - Representação esquemática do sistema de varredura óptica do AVIRIS. O sistema está conectado, através de cabos de fibras ópticas, a quatro grades espectrométricas, operando em diferentes regiões espectrais. Os detectores do arranjo linear do espectrômetro A são de Si (Silício), enquanto os dos espectrômetros B, C e D são de InSb (Antimoneto de Índio).....	52
2.9 - O processo de obtenção de imagens pelo AVIRIS é mostrado em (a). Em (b), é mostrado um espectro de radiância extraído a partir de um pixel na imagem AVIRIS.	53
3.1 - Metodologia adotada na execução do trabalho.	65
3.2 - Localização da área de estudo.....	66
3.3 - Composição colorida obtida da imagem reflectância de superfície com as bandas 195 (2.220 nm), 137 (1.651 nm) e 50 (826 nm) do sensor AVIRIS exibidas em vermelho, verde e azul, respectivamente. Os 18 pontos indicados são referentes às amostras submetidas para as análises físico-químico- mineralógicas.	79
3.4 - Configuração do sistema de aquisição de dados espectrais em laboratório.	82

3.5 - Ilustração das feições espectrais do mineral caulinita extraídas por técnicas automatizadas. (a) remoção do contínuo; (b) posição, profundidade, largura da banda de absorção; (c) tipos de simetria e assimetria. FWHM é definido como a diferença entre dois valores extremos da variável independente (comprimento de onda, neste caso) e tomada na metade do máximo valor (reflectância normalizada, neste caso).....	88
4.1 - Fatores de peso associados aos três primeiros autovetores (E_1 , E_2 e E_3) relativos às três primeiras Componentes Principais. Eles foram obtidos a partir de 142 bandas selecionadas na imagem reflectância de superfície. As faixas hachuradas indicam intervalos espectrais de forte absorção atmosférica, especialmente em torno de 1400 e 1900 nm, que não foram utilizados na presente análise.	91
4.2 - Porcentagem da variância total em função das Componentes Principais.	92
4.3 - Imagem da primeira componente principal (CP_1), obtida a partir de 142 bandas do AVIRIS. Os espectros extraídos da imagem reflectância de superfície para os <i>pixels</i> indicados pelas letras A, B e C são mostrados na Figura 4.4. Os pontos indicados por PV, LE e LR são os locais mais representativos das classes de solo Podzólico Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-Escuro e Latossolo Roxo, respectivamente, encontradas na linha de vôo. Os respectivos espectros destes três locais estão ilustrados na Figura 4.12.	94
4.4 - Espectros de reflectância extraídos da imagem AVIRIS mostrando o crescimento do albedo, de <i>pixels</i> escuros (espectro C) a <i>pixels</i> claros (espectro A), ao longo da imagem CP_1 (Figura 4.3). As faixas hachuradas indicam intervalos de absorção atmosférica não utilizados na presente análise.....	95
4.5 - Imagem da segunda componente principal (CP_2), obtida a partir de 142 bandas do AVIRIS. Os espectros extraídos da imagem AVIRIS para os <i>pixels</i> indicados pelas letras C e D são mostrados nas Figuras 4.7.....	96
4.6 - Diagrama de espalhamento dos escores CP_2 e CP_1 . V_v = <u>V</u> egetação <u>v</u> erde; V_{nfa} = <u>V</u> egetação <u>n</u> ão- <u>f</u> otossinteticamente <u>a</u> tiva; e S_{Exp} = <u>S</u> olo <u>E</u> xposto.	97
4.7 - Espectros da imagem AVIRIS de alvos com o mesmo albedo (escores CP_1 parecidos), mas com diferentes respostas na imagem CP_2 (<i>pixels</i> claros e escuros). Os alvos C e D estão indicados na Figura 4.5. As faixas hachuradas indicam intervalos de absorção atmosférica não utilizados na presente análise.....	98
4.8 - Imagem da terceira componente principal (CP_3), obtida a partir de 142 bandas do AVIRIS. Os espectros extraídos da imagem AVIRIS para os <i>pixels</i> indicados pelas letras E e F são mostrados na Figura 4.10.	100

- 4.9 - Diagrama de espalhamento dos escores CP_3 e CP_1 . $Vv =$ Vegetação verde; $Vnfa =$ Vegetação não-fotossinteticamente ativa; e $SExp =$ Solo Exposto. 101
- 4.10 - Espectros de reflectância AVIRIS de alvos com o mesmo albedo (escores CP_1 similares), mas com diferentes respostas (*pixels* claros e escuros) na imagem CP_3 . Os alvos estão identificados pelas letras E e F na Figura 4.8. As faixas hachuradas indicam intervalos de absorção atmosférica não utilizados na presente análise..... 101
- 4.11 - Composição colorida das três primeiras componentes principais representadas em azul (CP_1), vermelho (CP_2) e verde (CP_3). $Fr =$ Floresta ribeirinha (veg. fotos. ativa); $SExp =$ Solo Exposto; $VSeca =$ Vegetação Seca (veg. não-fotos. ativa); $VmAf =$ Vegetação com menor Atividade fotossintética; $VpAf =$ Vegetação com pouca Atividade fotossintética; $VpAf + SExp =$ Vegetação com pouca Atividade fotossintética mais Solo Exposto; $Vseca + SExp =$ Vegetação seca + Solo Exposto. A nomenclatura é discutida no texto. 103
- 4.12 - Espectros de reflectância AVIRIS para pixels representativos de Podzólico Vermelho-Amarelo (PV), Latossolo Vermelho-Escuro (LE) e Latossolo Roxo (LR). As curvas correspondem aos pontos P37 (PV), P3 (LE) e P93 (LR) indicados nas Figuras 3.3 e 4.3. As faixas hachuradas indicam intervalos de absorção atmosférica não utilizados na análise por componentes principais. 105
- 4.13 - Diagrama de espalhamento das relações entre os escores CP_2 e CP_1 (a), e entre CP_3 e CP_1 (b). As posições das amostras representativas das classes Latossolo Roxo (LR), Latossolo Vermelho-Escuro (LE) e Podzólico-Vermelho-Amarelo (PV) estão indicadas nos diagramas. Os diagramas foram obtidos para porções diferentes da imagem da área de estudo. 107
- 4.14 - Diagramas de espalhamento para as relações areia total versus argila total em (a), areia total versus F_2O_3 em (b), Fe_2O_3 versus Al_2O_3 em (c), e argila total versus M.O. em (d). Os diagramas foram obtidos a partir de 18 amostras. 109
- 4.15 - Espectros de reflectância para amostras representativas de três classes de solo, extraídos da imagem AVIRIS (1 x 1 pixel) em (a), e coletados em laboratório pelo espectrorradiômetro IRIS em (b). As faixas hachuradas indicam intervalos não utilizados na presente análise..... 111

4.16 - Correlação entre os valores de reflectância medidos com o IRIS e com o AVIRIS, determinados em intervalos de 20 nm. As correlações foram calculadas para 72 comprimentos de ondas, mantidas as respectivas larguras de bandas de cada espectrorradiômetro. Todos os coeficientes de correlação são significativos a 5%.....	113
4.17 - Diagramas de espalhamento para as relações entre dados espectrais AVIRIS e IRIS em 692 nm em (a), 2.171 nm em (b) e 2.210 nm (c). Os diagramas foram obtidos a partir de 18 amostras.....	114
4.18 - Espectros de reflectância para os pontos P44 e P29. Em (a) e (b), os espectros foram obtidos em laboratório (IRIS). Em (c) e (d), os espectros foram coletados pela aeronave (AVIRIS). Em todos os gráficos, indica-se onde ocorrem pontos de menor correlação, com exceção do indicado em $\lambda = 1.671$ nm.	115
4.19 - Derivadas de segunda ordem aplicadas nos espectros de laboratório (IRIS) e de campo (AVIRIS) para os pontos P44 (a) e P29 (b).	117
4.20 - Histograma dos dados de NDVI para 18 pontos analisados. Em (a) são plotados os valores de NDVI calculados a partir dos espectros obtidos pelo IRIS, cuja média é 0,133 e desvio padrão é 0,039; e (b) são plotados os resultados calculados a partir dos dados AVIRIS, cuja média é 0,179 e desvio padrão é 0,027.	120
4.21 - Curvas de correlação entre dados espectrais e variações no conteúdo de areia, silte e argila de 18 pontos em função do comprimento de onda, (a) refere-se aos dados de FRBD obtidos com o IRIS; e (b) dados de reflectância de superfície AVIRIS.....	123
4.22 - Diagramas de espalhamento para os dados de FRBD, coletado pelo IRIS, versus areia total (%) em (a), silte (%) em (b), e argila total (%) em (c).....	124
4.23 - Diagramas de espalhamento para o Fator de Reflectância Bidirecional (FRBD) obtido pelo IRIS em 2.293 nm versus areia total (%) em (a) e argila total (%) em (b). Em (c) e (d), são mostradas as relações da reflectância obtida pelo AVIRIS em 2.210 nm com os respectivos parâmetros.	125
4.24 - Correlação entre os dados espectrais obtidos pelo IRIS (a) e AVIRIS (b) e os constituintes químicos de 18 amostras de solos.	127

- 4.25 - Diagramas de espalhamento para o Fator de Reflectância Bidirecional (FRBD) obtido em laboratório pelo IRIS em 658 nm versus M.O. (g/kg) em (a), para FRBD em 2.071 nm versus TiO_2 (%) em (b), para FRBD em 2.210 nm versus Al_2O_3 (%) em (c), e para FRBD em 2.293 nm versus Fe_2O_3 (%) em (d). 129
- 4.26 - Diagramas de espalhamento para os valores de reflectância observados para o AVIRIS em 692 nm versus M.O. (g/kg) em (a), em 1.075 nm versus TiO_2 (%) em (b), e em 2.210 nm versus Al_2O_3 (%) em (c) e em 2.232 nm versus Fe_2O_3 (%) em (d). 131
- 4.27 - Espectros de reflectância normalizados com o uso do *continuum* removido dos minerais utilizados como referência pela técnica de mapeamento mineral SFF. (a) grupo dos óxidos de ferro (hematita e goetita); (b) grupo das argilas (caulinita, montmorilonita e gibbsita). 134
- 4.28 - Imagem obtida a partir da composição colorida entre as bandas 184 (2.111 nm), 191 (2.180 nm) e 196 (2.230 nm), respectivamente, em vermelho, verde e azul, resultante da remoção do *continuum* no intervalo de 2.101 nm a 2.240 nm. As duas figuras menores são de áreas que caracterizam as classes de solos Podzólico Vermelho-Amarelo e Latossolo Roxo. 135
- 4.29 - Imagens da razão escala/RMS para os minerais de referência hematita (a) e caulinita (b), obtidas a partir da aplicação da técnica Spectral Feature Fitting (SFF) na imagem AVIRIS. Quanto mais claros forem os pixels, maiores as probabilidades de identificação destes minerais na cena. Áreas representativas das classes de solos PV, LE e LR estão indicadas. 137
- 4.30 - Imagens pós-classificadas para hematita e goetita (a) e caulinita, montmorilonita e gibbsita (b), obtidas a partir das imagens da razão *escala*/RMS. Nelas estão indicadas as três principais classes de solos identificadas na área de estudo. 140
- 4.31 - Espectros dos minerais utilizados no mapeamento do grupo dos óxidos de ferro e extraídos da biblioteca espectral do JPL/ENVI (a), espectros obtidos pelo IRIS das amostras de solos (b) e espectros obtidos pelo AVIRIS para os mesmos locais de onde foram extraídas as amostras (c). Em todas as curvas foram mantidas as resoluções espectrais dos respectivos sensores. 143
- 4.32 - Reflectância e FRBD normalizados com o uso do *continuum*, no intervalo 600-1100 nm, para amostras representativas das três classes de solos. Em (a), os resultados são apresentados para o AVIRIS e em (b) para o IRIS. 144

- 4.33 - Espectros de referência dos minerais utilizados no mapeamento do grupo das argilas e extraídos da biblioteca espectral do JPL/ENVI (a), espectros obtidos pelo IRIS das amostras de solos (b) e espectros obtidos pelo AVIRIS para os mesmos locais de onde foram extraídas as amostras (c). Em todas as curvas foram mantidas as resoluções espectrais dos respectivos sensores..... 145
- 4.34 - Reflectância e FRBD normalizados com o uso do *continuum*, no intervalo 2.100-2.330 nm, para amostras representativas das três classes de solos. Em (a), os resultados são apresentados para o AVIRIS e em (b) para o IRIS..... 146
- 4.35 - Diagramas de espalhamento para a profundidade da feição de absorção da caulinita em 2.200 nm (AVIRIS) versus valores escala/RMS em (a) e versus caulinita (%) das amostras de solos em (b). Em (c), os resultados da relação entre a profundidade de absorção em 2.200 nm, calculada dos dados IRIS, versus caulinita (%) das 18 amostras de solo são apresentados..... 148

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Bandas de absorção de alguns minerais do grupo dos óxidos de ferro.....	37
2.2 - Bandas de absorção de alguns minerais do grupo das argilas	39
2.3 - Parâmetros do AVIRIS.....	54
3.1 - Características da linha de vôo	64
3.2 - Bandas excluídas após a aplicação do modelo de transferência radiativa	75
4.1 - Classes de solo identificadas para o subconjunto de 18 amostras selecionado para análises físico-químicas	104
4.2 - Resultados das análises químicas para amostras representativas dos solos estudados.....	105
4.3 - Matriz de correlação para os constituintes físico-químicos de 18 amostras de solos	108

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinos

$A(\lambda)$	- absorvância espectral (Equação 3.5)
$A''(\lambda)$	- derivada segunda da absorvância espectral (Equação 3.6)
$B_{i,1}$	- bandas dos dados da imagem reflectância de superfície da i-ésima linha (Equação 3.3), onde $1 \leq i \leq 224$
$CP_{i,1}$	- Componente Principal da i-ésima linha (Equação 3.3), onde $1 \leq i \leq 224$
$e_{i,j}$	- fator de peso da i-ésima linha e j-ésima coluna associado a banda da imagem reflectância de superfície $B_{i,1}$ do i-ésimo autovetor E_i (Equação 3.3), onde $1 \leq i \leq 224$ e $1 \leq j \leq 224$
$FCA(\lambda)$	- Fator de Calibração Absoluta espectral da placa <i>spectralon</i> $\cong 50\%$ (Equação 3.4);
$FRBD(\lambda)$	- Fator de Reflectância BiDirecional espectral (Equação 3.4)
$F_o(\lambda)$	- irradiância solar espectral fora da atmosfera (Equação 3.1), $\frac{W}{m^2 \cdot nm}$
$F_o \cdot \rho_a / \pi$	- radiância solar espectral (Equação 3.1), $\frac{W}{m^2 \cdot nm \cdot sr}$
$k(\lambda)$	- fator de correção espectral da placa (Equação 2.1)
$L_{alvo}(\lambda)$	- radiância espectral do alvo (Equação 2.1), $\frac{W}{m^2 \cdot nm \cdot sr}$
$L_{placa}(\lambda)$	- radiância espectral da placa <i>spectralon</i> (Equação 3.4) ou de uma placa com comportamento lambertiano (Equação 2.1), $\frac{W}{m^2 \cdot nm \cdot sr}$
$L_{solo}(\lambda)$	- radiância espectral do solo (Equação 3.4), $\frac{W}{m^2 \cdot nm \cdot sr}$
$L_T(\lambda)$	- radiância espectral total (Equação 3.1), $\frac{W}{m^2 \cdot nm \cdot sr}$;

Gregos

$\Delta\lambda$	- Largura de banda, nm
λ	- Comprimento de onda, nm
$\rho_g(\lambda)$	- reflectância espectral de superfície (Equação 3.1)
$\rho_a(\lambda)$	- reflectância espectral da atmosfera (Equação 3.1)
$\tau_d(\lambda)$	- transmitância espectral descendente até a superfície (Equação 3.1)

$\tau_u(\lambda)$ - transmitância espectral ascendente que retorna ao sensor
(Equação 3.1)

Índices inferiores

a	- atmosfera
d	- descendente
g	- superfície
i	- linha
j	- coluna
placa	- placa
solo	- solo
T	- Total
u	- ascendente

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACP	- Análise por Componentes Principais
AIS	- Airborne Imaging Spectrometer
AVIRIS	- Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer
CP	- Componente Principal
EL	- Empirical Line
ENVI	- ENvironment for Visualizing Images
FFC	- Flat Field Correction
FOV	- Field of View
FRBD	- Fator de Reflectância BiDirecional
FWHM	- Full Width Half Max
GER	- Geophysical Environmental Research Corp.
GERIS	- Geophysical and Environmental Research Imaging Spectrometer
GPS	- Global Positioning System
HRV	- High Resolution Visible
HYDICE	- HYperspectral Digital Imagery Collection Experiment
IFOV	- Instantaneous Field of View
IHS	- Intensity, Hue and Saturation
IRIS	- Infra-Red Intelligent Spectrometer
IVM	- InfraVermelho Médio
IVP	- InfraVermelho Próximo
LE	- Latossolo Vermelho-Escuro álico
LR	- Latossolo Roxo
M.O.	- Matéria Orgânica
MaxVer	- Método da Máxima Verossimilhança
MS	- Estado do Mato Grosso do Sul
NDVI	- Normalized Difference Vegetation Index
NIST	- National Institute of Standards and Technology
PV	- Podzólico Vermelho-Amarelo
REFLEC.	- média da reflectância obtida para um dado intervalo espectral
RGB	- Red, Green and Blue
SAM	- Spectral Angle Mapper
SCAR-B	- Smoke, Sulfate, Clouds And Radiation – Brazil
SExp	- Solo Exposto
SFF	- Spectral Feature Fitting
TM	- Thematic Mapper
VmAf	- Vegetação com menor Atividade fotossintética
Vnfa	- Vegetação não-fotossinteticamente ativa
VpAf	- Vegetação com pouca Atividade fotossintética
Vseca	- Vegetação Seca
VS	- ViSível
Vv	- Vegetação verde

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O Sensoriamento Remoto é uma importante ferramenta em estudos relacionados à agricultura e, em particular, na caracterização e mapeamento de solos. O monitoramento dos solos consiste em um grande desafio já que eles exibem uma contínua variação no tempo e no espaço. Este monitoramento pode auxiliar mais eficientemente na preparação de mapas de solos, na elaboração dos mapas de aptidão agrícola e no melhor uso das relações do potencial de produtividade do solo na produção de alimentos.

Os dados utilizados para extrair as informações de interesse em aplicações de sensoriamento remoto são normalmente provenientes de sensores multiespectrais como, por exemplo, do Landsat 5/*Thematic Mapper* (TM) ou do SPOT 3/*High Resolution Visible* (HRV). Estes sensores possuem resolução espectral limitada, entre três e sete bandas, o que impossibilita a extração de informações mais detalhadas sobre o 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 conhecido como Espectroscopia de Imageamento (Green et al., 1998). Na faixa da energia solar refletida, este tipo de imageamento pode ser realizado com mais de cem bandas por *pixel*, com larguras normalmente da ordem de 10 a 20 nm. Conseqüentemente, 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 por meio da Espectroscopia de Reflectância, tanto de campo como de laboratório. Isto só é possível com o desenvolvimento de técnicas (instrumentação de coleta e metodologia de análise) apropriadas ao grande volume de dados resultante. Para isso, tem-se buscado um melhor entendimento nas relações existentes entre as curvas espectrais e as características específicas dos solos que permitam sua separação e/ou caracterização. Parte dos estudos têm sido direcionada para o correlacionamento das particularidades das curvas espectrais com as características físico-químico-mineralógicas dos solos. Neste contexto, a utilização de espectrorradiômetros tem sido cada vez mais ampla. No trabalho realizado por Stoner e Baumgardner (1981) foram apresentados os fatores de reflectância bidirecional de amostras de cerca de 240 séries de solos dos Estados Unidos, além de alguns solos brasileiros, onde distinguiram-se cinco formas de curvas de reflectância baseadas nas formas propriamente ditas e nas bandas de absorção. Em Epiphany et al. (1992), foram analisadas 108 amostras de solos de 14 classes de solos brasileiros. Eles concluíram que além dos minerais, a textura e a estrutura, a matéria orgânica (M.O.) e a umidade foram fatores influentes nas propriedades espectrais dos solos obtidas em laboratório pelo espectrorradiômetro *InfraRed Intelligent Spectroradiometer* (IRIS).

Desde 1989, o imageamento hiperespectral em nível aerotransportado já é operacional através do espectrômetro imageador *Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer* (AVIRIS). Outro imageador com características semelhantes ao AVIRIS, operacional desde 1995, é o *HYperspectral Digital Imagery Collection Experiment* (HYDICE) (Resmini et al., 1997). Em breve, dados hiperespectrais também em nível orbital serão gerados (p. ex., sensor ARIES com 105 bandas entre 400 e 2.500 nm, resolução espacial de 30 m, e lançamento previsto para 2.000 ou 2.001) (CSIRO, 1997).

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 *Spectral Angle Mapper* (SAM) (Kruse et al., 1993a), a *Spectral Feature Fitting* (SFF) (Clark et al., 1990b), e a *Tetracorder*, previamente conhecida como *Tricorder* (Clark e 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, 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, o que compreende um amplo campo de pesquisa.

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) SCAR-B (1996). 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 e identificação mineral em uma área situada próxima à cidade de Campo Grande (MS).

Em função do exposto, a primeira constatação na interpretação dos dados AVIRIS é a dificuldade em se comparar um número elevado de bandas. Isto mostra que 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 383 e 2.508 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 2.450 nm, a discriminação dos tipos de solos;
- b) analisar as relações entre as curvas espectrais obtidas nos ambientes de laboratório (IRIS) e de aeronave (AVIRIS), e destes dois conjuntos de dados com as características físico-químicas de 18 amostras de solos coletadas na área de estudo;
- c) testar a utilização da técnica de classificação hiperespectral SFF para verificar a possibilidade de identificação na imagem de alguns minerais do grupo dos óxidos de ferro (hematita/goetita) e do grupo das argilas (caulinita/montmorilonita/gibbsita);

Normalmente os espectros obtidos em laboratório são utilizados para a montagem de bibliotecas espectrais. Entretanto, no presente trabalho, eles foram utilizados para avaliar a transição entre o ambiente de laboratório, onde a aquisição durante as aquisições dos dados são bem controladas, e o ambiente de aeronave, onde há influência de vários fatores, de difícil controle como será visto no Capítulo 4. A importância do estudo dessa transição é que ele pode ser útil não apenas na compreensão do processo de discriminação dos tipos de solos por ACP, como também na avaliação do desempenho da técnica SFF para identificação mineral na cena.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 - FATOR DE REFLECTÂNCIA

Para compreender os processos de reflexão da radiação eletromagnética pelos objetos terrestres é necessário analisar as causas e os efeitos envolvidos nesses fenômenos. Uma das maneiras para realizar esta análise é estudar o comportamento espectral dos alvos através da observação da reflectância espectral da energia eletromagnética.

A reflectância espectral dos solos pode ser definida como a razão entre o fluxo radiante espectral refletido pela superfície do solo e o fluxo radiante espectral refletido por um material de referência iluminado e visado sob as mesmas condições que a superfície do solo. Na prática, a superfície de referência é feita de uma placa plana recoberta com sulfato de bário (BaSO_4) ou óxido de magnésio (MgO) e calibrada por comparação com uma placa padrão de laboratório cujo espectro de reflectância é conhecido (Steffen et al., 1996). Mais recentemente, tem-se utilizado spectralon, um material composto à base de politetrafluoroetileno e por isso as placas são mais resistentes ao tempo, laváveis e de qualidade superior às obtidas com o sulfato de bário ou óxido de magnésio (Jackson et al., 1992).

Milton (1987) apresenta uma revisão sobre os diversos aspectos envolvidos na aquisição desses dados. Em linhas gerais, é impraticável, principalmente no ambiente de campo, fazer aquisição de reflectância em todas as possíveis posições fonte/sensor, já que tanto a irradiância quanto a radiância variam com os ângulos zenitais e azimutais para superfícies não-lambertianas. Por isso, normalmente determina-se o Fator de Reflectância BiDirecional (FRBD) (Nicodemus et al., 1977). Segundo Epiphany et al. (1992), para

fins de comparação de dados provenientes de origens diversas, é sempre conveniente a utilização do FRBD, que é o parâmetro radiométrico mais conhecido e empregado em estudos de comportamento espectral de solos (Bowers e Hanks, 1965; Montgomery, 1974; Stoner e Baumgardner, 1980). O FRBD depende das propriedades da amostra, da geometria de iluminação e de medição, e da faixa espectral utilizada. De acordo com Milton (1987), pode-se defini-lo como:

$$FRBD(I) = \frac{L_{alvo}(I)}{L_{placa}(I)} \times k(I) \quad (2.1)$$

onde,

$$L_{alvo}(\lambda) = \text{radiância espectral de um alvo em } \frac{W}{m^2 \cdot nm \cdot sr};$$

$$L_{placa}(\lambda) = \text{radiância espectral de uma placa com comportamento lambertiano em } \frac{W}{m^2 \cdot nm \cdot sr};$$

$k(\lambda)$ = fator de correção da placa;

λ = comprimento de onda.

O fator $k(\lambda)$ foi introduzido na equação 2.1, devido ao fato que superfícies lambertianas, ou seja, refletores perfeitamente difusos, não existem na prática. O termo bidirecional refere-se a dois ângulos envolvidos: um para a posição da fonte iluminante e outro para a posição do sensor (Steffen, 1995).

2.2 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DOS SOLOS

Os solos têm uma ampla ocorrência na superfície terrestre, e geralmente contribuem significativamente para o sinal eletromagnético refletido pela maioria dos alvos naturais terrestres. Assim, parte das pesquisas em sensoriamento remoto tem sido direcionada ao

entendimento e ao desenvolvimento de métodos para a análise da influência das características dos solos na resposta espectral dos alvos em geral (Formaggio et al., 1996). Os contrastes de reflectância espectral para os alvos naturais aparecem como diferenças tonais em imagens fotográficas e não-fotográficas e são importantes em todo o intervalo espectral da energia solar refletida (cerca de 250 a 3.000 nm) pela superfície do terreno.

Os principais constituintes mineralógicos dos solos de regiões tropicais são a caulinita, a gibbsita, o quartzo, a goetita e a hematita. Em quantidades pequenas, normalmente ocorrem os óxidos de titânio (anatásio e rutilo). Já a magnetita e a ilmenita encontram-se em quantidades maiores nos solos derivados de rochas básicas. Além dos minerais, a textura e a estrutura, o teor de matéria orgânica, a umidade, a cor, a capacidade de troca catiônica, o teor de óxidos de ferro e as condições de rugosidade da superfície são outros importantes fatores que influenciam o do comportamento espectral dos solos. As variações destes parâmetros em termos de concentrações relativas, dos arranjos e das inter-relações também são responsáveis pelas diversas maneiras de reflexão da energia solar pelos diferentes solos (Epiphanyo et al., 1992).

A superfície terrestre detectada pelos sensores remotos pode ser vista como uma paisagem composta principalmente pelos elementos água, vegetação e solos, cujas curvas de reflectância espectral podem ser observadas na Figura 2.1. Tanto a vegetação, como os solos e a água, possuem padrões próprios de resposta espectral, o que possibilita a obtenção de informações sobre os mesmos, através de sensores colocados em plataformas remotas.

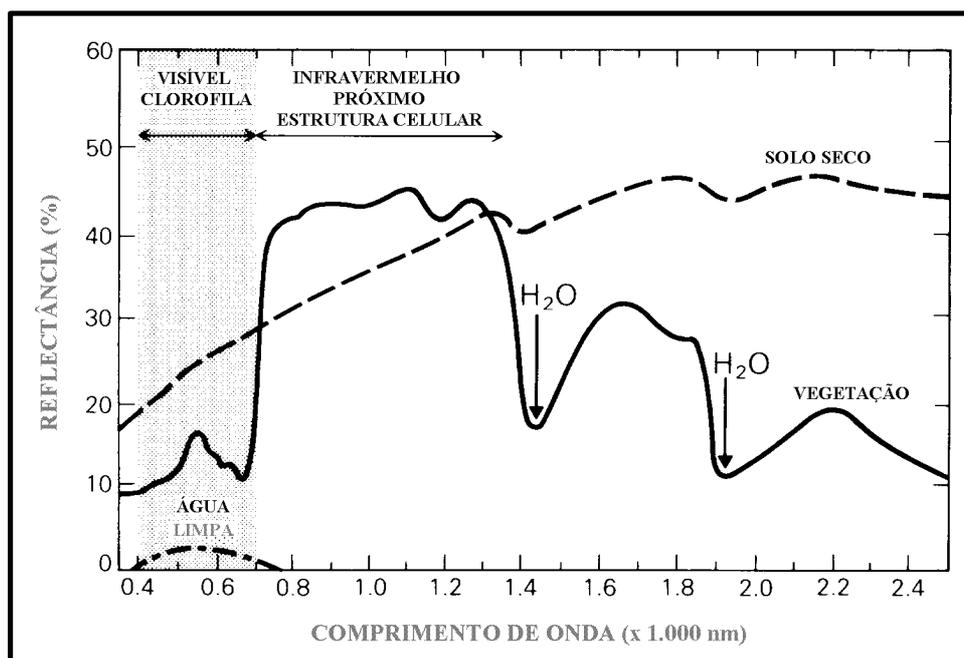


Fig. 2.1 - Curvas típicas de reflectância de vegetação verde, solo seco e água limpa.

FONTE: Adaptada de Drury (1993, p. 12).

No trabalho realizado por Stoner e Baumgardner (1980), um dos mais completos estudos sobre a reflectância de solos, são apresentados os fatores de reflectância bidirecional de amostras de cerca de 240 séries de solos dos Estados Unidos, além de alguns solos brasileiros. Essas curvas foram obtidas em laboratório, na faixa espectral de 500 a 2.300 nm, com resolução espectral de 10 nm. Os autores concluíram que o clima, o material de origem e a drenagem, junto com a matéria orgânica, a umidade, a textura, e o óxido de ferro, são importantes variáveis que explicam as diferenças na forma das curvas de reflectância dos solos. A influência de outras características dos solos sobre a sua reflectância espectral foram pesquisadas por Mathews et al. (1973), os quais relataram correlações entre a reflectância espectral de solos e o tipo de mineral de argila, os teores de matéria orgânica e dos óxidos de ferro livre, e a fração de silte.

Outro importante estudo sobre espectros de reflectância, para solos tropicais, foi feito por Epiphanyo et al. (1992), utilizando o espectrorradiômetro IRIS, para 109 amostras de solos coletadas no Estado de São Paulo. Dados espectrorradiométricos são

importantes não só para o conhecimento do comportamento espectral dos alvos, mas também por permitirem a organização de bibliotecas espectrais. Essas bibliotecas podem ser utilizadas como referência para interpretação dos dados obtidos por imageadores hiperespectrais.

O comportamento espectral de minerais que normalmente ocorrem nos solos tem sido discutido de forma indireta através de vários trabalhos. Hunt e Salisbury (1976a,b) e Hunt et al. (1974) descreveram as variações dos espectros dos minerais e rochas na faixa do visível e infravermelho (325-2.500 nm). Os resultados desses trabalhos indicaram que as informações mais importantes estão relacionadas com as bandas de absorção e o gradiente das curvas espectrais. Essas feições são causadas por processos vibracionais e eletrônicos devido às interações entre a radiação e as moléculas e entre a radiação e os átomos, respectivamente. Clark et al. (1990a) estudaram os espectros de reflectância dos minerais, na faixa entre 200 e 3.000 nm, os quais foram obtidos com o espectrorradiômetro Beckman 5270 para 3.000 amostras de várias partes dos Estados Unidos da América.

Outras fontes importantes de informação para a análise do comportamento espectral de alvos são as análises físico-químico-mineralógicas das amostras coletadas em campo, retiradas dos mesmos locais onde são feitas as medições espectrais de campo (Feldman e Taranik, 1986; Hook et al., 1992; Kruse, 1987; Dwyer et al., 1995). Essas análises suplementam as análises dos dados espectrais e confirmam a presença de minerais identificados nas curvas de reflectância, bem como auxiliam a delimitação de feições espectrais próprias de cada classe de solo.

De uma maneira geral, uma das grandes dificuldades em interpretar os resultados das curvas espectrais e correlacioná-los com as informações dos solos se deve à natureza bastante complexa das correlações entre as características dos solos e as reflectâncias. Os teores de umidade, a matéria orgânica, a textura, os óxidos de ferro e de alumínio, os

minerais de argila, e as condições de superfície do terreno ou da amostra a ser analisada, influenciam as curvas espectrais dos solos (Stoner e Baumgardner, 1980; Coleman et al., 1991; Epiphonio et al., 1992).

Schreier (1977) verificou, a partir de uma comparação entre as condições químicas dos solos e sua resposta espectral, que o carbono e o ferro foram os constituintes químicos mais significativamente correlacionados com a reflectância. Os valores negativos de correlação calculados vieram a confirmar o fato dos solos apresentarem menor reflectância com o aumento do teor destes constituintes.

Mustard e Pieters (1986) relataram os cuidados para realizar medições de campo. Inicialmente, deve-se escolher um sítio no qual haja conhecimento geológico prévio e onde se identifiquem os diferentes tipos de materiais da composição do solo. As curvas de fator de reflectância bidirecional, que caracterizam o comportamento espectral dos alvos, devem ser obtidas com um espectrorradiômetro portátil, em uma área homogênea e com topografia preferencialmente plana. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que há uma boa concordância entre os espectros obtidos pelo *Airborne Imaging Spectrometer* (AIS) em aeronave e os coletados pelo *InfraRed Intelligent Spectroradiometer* (IRIS) em laboratório.

Seguindo esta mesma linha de investigação, pode-se citar também o trabalho de Kruse et al. (1990), que analisaram os espectros de alunita, caulinita e hematita. Os espectros obtidos em campo, laboratório e pelo *Geophysical and Environmental Research Imaging Spectrometer* (GERIS), colocado a bordo de um avião a 6 km de altitude, mostraram boa concordância entre si quanto às bandas de absorção.

2.3 – PARÂMETROS DO SOLO QUE INFLUENCIAM A REFLECTÂNCIA

2.3.1 – ÓXIDOS DE FERRO

A Tabela 2.1 indica as principais feições de absorção que ocorrem nos espectros dos minerais mais importantes do grupo dos óxidos de ferro e os agentes responsáveis por tais feições. As feições de absorção associadas com os óxidos de ferro são provocadas por transições eletrônicas, onde os elétrons em torno de um átomo passam a adotar uma nova configuração eletrônica, em função de uma grande quantidade de energia presente. Estas feições são observadas predominantemente na região do ultravioleta e do visível até aproximadamente 1.200 nm.

TABELA 2.1 - BANDAS DE ABSORÇÃO DE ALGUNS MINERAIS DO GRUPO DOS ÓXIDOS DE FERRO

MINERAIS	PRINCIPAIS FEIÇÕES ESPECTRAIS (nm)	AGENTE PROVOCADOR DE ABSORÇÃO
Hematita (Fe_2O_3)	885, 650, 530 e 445	transições eletrônicas das formas trivalentes de ferro (Fe^{3+})
Goetita ($\text{FeO}(\text{OH})$)	917, 650, 480 e 435	transições eletrônicas das formas trivalentes (Fe^{3+})
Magnetita (Fe_3O_4)	mineral tipicamente opaco, praticamente sem eventos ou feições espectrais no visível, no infravermelho próximo e no infravermelho médio, causados por bandas de condução dos óxidos de ferro e de titânio que se estendem através do espectro.	transferências de cargas $\text{Fe}^{2+} \Rightarrow \text{Fe}^{3+}$; $\text{Fe}^{3+} \Rightarrow \text{O}$; $\text{Fe}^{2+} \Rightarrow \text{O}$ e às transições intra-íons Fe^{2+} ; Fe^{3+}
Ilmenita (FeTiO_3)	mesma situação anterior	transferência de cargas $\text{Fe}^{2+} \Rightarrow \text{O}$; $\text{Ti}^{4+} \Rightarrow \text{O}$ e $\text{Fe}^{2+} \Rightarrow \text{Ti}^{4+}$ e às transições intra-iônicas Fe^{2+}

FONTE: Adaptada de Hunt et al. (1973, p. 99); Clark et al. (1990a, p. 12.653-12.680), Epiphany et al. (1992, p. 35-41).

Segundo Drury (1993), o ferro é o mais abundante entre os metais de transição, que incluem cobre, níquel, cromo, cobalto, manganês, vanádio e titânio, e por isso seus

efeitos sobre os espectros de reflectância, na região do visível, são os mais marcantes. A transição espectral mais frequentemente observada ocorre entre o ferro e o oxigênio (migração de elétrons do ferro para o oxigênio). Ela é caracterizada por um pronunciado decréscimo da reflectância na região do visível, na direção do comprimento de onda do azul (Hunt, 1980). Stoner et al. (1980) observaram que a banda de absorção em 700 e 900 nm é resultante da presença de ferro férrico. Hunt et al. (1971) observaram que a maioria das feições eletrônicas bem delineadas de óxidos de ferro em minerais e rochas pode ser atribuída a transições eletrônicas nos cátions de ferro.

Stoner e Baumgardner (1980) analisaram amostras de solos sesquioxídicos, provenientes de regiões intensamente intemperizadas como as dos trópicos, e concluíram que os seus espectros de reflectância são dominados por feições devidas do ferro férrico. Os minerais hematita, limonita e goetita apresentavam bandas de absorção bem definidas próximo de 900 nm. Quando ocorreu magnetita notaram-se baixas reflectâncias no ViSível (VS = 400 a 700 nm) e ausência de feições de absorção no InfraVermelho Próximo (IVP = 700 a 1.000 nm) e Médio (IVM = 1.000 a 2.500 nm), em função de bandas de condução dos óxidos de ferro e de titânio, que se estenderam através do espectro. Bigham et al. (1978) observaram que o tipo e quantidade relativa de óxidos de ferro imprimem a cor vermelha e amarela dos solos ricos em argilas sesquioxídicas. Observou-se que predominantemente solos amarelos ricos em goetita adsorviam mais fosfatos por unidade de peso que solos similares vermelhos ricos em hematita.

Nas relações entre reflectância espectral e composição dos solos, Karmanov (1970) notou que a intensidade de reflectância dos hidróxidos de ferro, contendo pouca água e tendo cor marrom-avermelhada-escura, aumentou mais fortemente no intervalo de 554 a 596 nm. Por outro lado, a intensidade de reflectância dos óxidos de ferro hidratados aumentou mais fortemente no intervalo de 500 a 540 nm.

2.3.2 – MINERAIS DA FRAÇÃO ARGILA

Entre os componentes importantes dos solos estão também os minerais da fração argila, sendo que os principais estão listados na Tabela 2.2. Considerando que muitos solos se diferenciam pela composição da fração argila, e que esta tem estruturas características, com conseqüente influência no comportamento espectral dos solos, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos para estudar a influência espectral deste constituinte.

TABELA 2.2 - BANDAS DE ABSORÇÃO DE ALGUNS MINERAIS DO GRUPO DAS ARGILAS

MINERAIS	PRINCIPAIS FEIÇÕES ESPECTRAIS (nm)	AGENTE PROVOCADOR DE ABSORÇÃO
Caulinita ($\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$)	2.700, 2.730, 2.755, 2.200 e 1.400	transições vibrações das hidroxilas (OH) da rede cristalina
Gibbsita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)	2.975, 2.960, 2.917, 2.842, 2.765, 2.260; 1.900, 1.400 e 1.550	transições vibrações dos grupos de hidroxilas (OH) da rede cristalina
Montmorilonita Fórmula geral: $(1/2\text{Ca}, \text{Na})_{0,7}(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_4(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_2$ $(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	2.200, 1.900 e 1.450	transições vibrações dos grupos de hidroxilas (OH) da rede cristalina

FONTE: Adaptada de Hunt et al. (1973, p. 99); Clark et al. (1990a, p. 12.653-12.680), Epiphany et al. (1992, p. 35-41).

Como se pode observar pela Tabela 2.2, todos os minerais apresentam como agente provocador as transições vibracionais das hidroxilas, que resultam da interação entre a energia de radiação eletromagnética e as moléculas, ou das oscilações dos átomos e, também, de seu centro de equilíbrio. As evidências para tais transições podem ser observadas no IVP e IVM. Deste modo, transições vibracionais necessitam de uma quantidade menor de energia que a necessária nas transições eletrônicas, embora as feições espectrais sejam muitas vezes mais intensas do que as observadas nas eletrônicas. Dentre os grupos moleculares, são poucos os que originam feições de absorção

vibacionais no infravermelho. Dentre eles, a hidroxila, Al-OH e Mg-OH, a água, os carbonatos e alguns sulfatos são os principais responsáveis por quase todas as feições espectrais dos materiais geológicos no intervalo de 1.200-3.000 nm. Em particular, para os Latossolos, os eventos espectrais ligados às hidroxilas são particularmente importantes, pois os radicais OH⁻ participam na rede cristalina da caulinita e da gibbsita, dois componentes maiores destes solos.

Mathews et al. (1973) relataram que o tipo de mineral de argila influencia a forma e a intensidade da curva de reflectância em toda a faixa estudada de 500 a 2.600 nm. Eles obtiveram diferentes curvas espectrais para a caulinita, nontronita e illita, conforme ilustrado na Figura 2.2. Segundo estes autores, a baixa reflectância em 1.400 e 1.900 nm refere-se à forte influência de água adsorvida. O mesmo resultado foi observado por Lindberg e Snyder (1972), que observaram uma redução na reflectância da montmorilonita e nontronita com conseqüente bandas de absorção, principalmente como resultado de água adsorvida nesses minerais. Hunt e Salisbury (1970) observaram bandas moleculares de água muito fortes em 1.400 e 1.900 nm causadas pela água retida típica das montmorilonitas.

Stoner e Baumgardner (1980) mostraram que nos espectros dos argilo-minerais dos grupos montmorilonita e caulinita, as principais feições de absorção devem-se à presença de água. A ocorrência de fortes feições de absorção em 1.400 e 2.200 nm, devidas à hidroxila, são típicas da reflectância da caulinita.

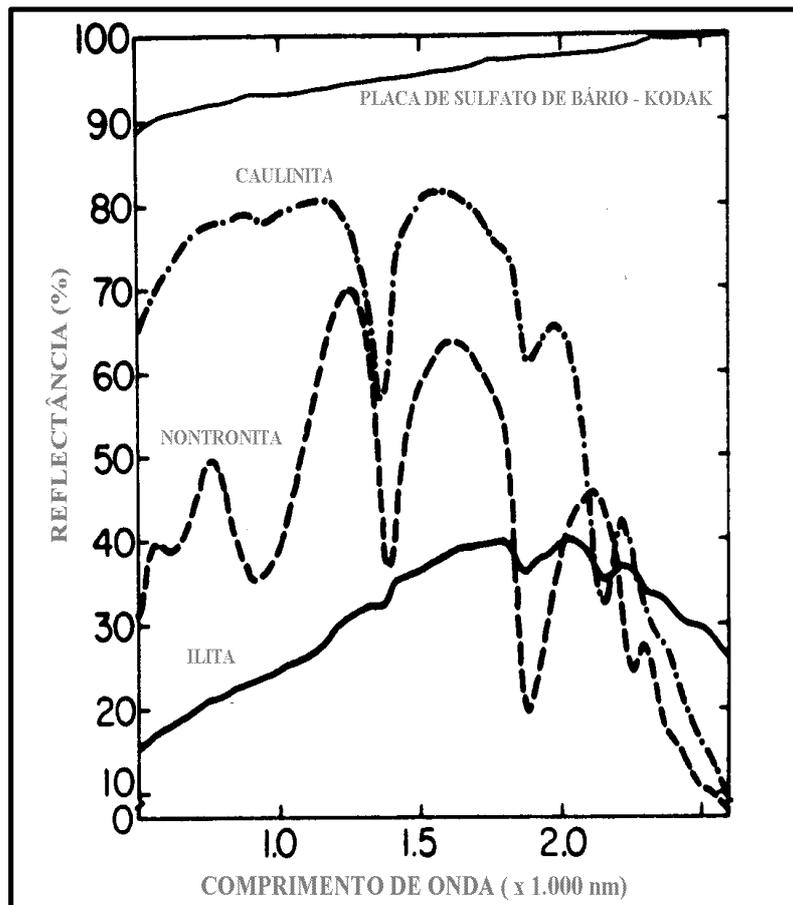


Fig. 2.2 – Espectros de reflectância da caulinita, nontronita e ilita
 FONTE: Adaptada de Mathews et al. (1973, p. 422).

2.3.3 – MATERIAL DE ORIGEM

Mathews et al. (1973) foram um dos primeiros a demonstrar a importância do material de origem sobre a reflectância do solo. Os espectros de reflectância possibilitaram a discriminação entre solos desenvolvidos de calcários, folhelhos e arenitos, mostrando feições características em todos os comprimentos de onda.

Hunt et al. (1974) observaram que a intensidade geral da reflectância de rochas ígneas diminui das rochas ácidas para as intermediárias e destas para as básicas, com as litologias ultrabásicas sempre mostrando uma banda de ferro bem definida próximo a 1.000 nm. Esses resultados sugerem que áreas de locais geográficos de material de origem similar devem ser estudadas separadamente quando se objetiva relacionar reflectância a outros parâmetros do solo.

Schreier (1977) notou que o material de origem do solo afetava todo o espectro óptico de reflectância dos solos desenvolvidos de materiais deltaicos, orgânicos e aluviões marinhos.

2.3.4 – COBERTURA VEGETAL COM E SEM ATIVIDADE FOTOSINTÉTICA

A presença de vegetação verde ou de resíduos não fotossinteticamente ativos pode ser facilmente alterada pelo tempo (variação do clima e/ou sazonalidade) e pela lavoura (preparação do terreno para plantio). As mudanças nestas condições afetam a resposta espectral dos solos. A Figura 2.3 mostra as diferenças espectrais obtidas de folha de faia desde a vegetação fotossinteticamente ativa (vegetação verde) até vegetação não-fotossinteticamente ativa (vegetação seca). Na Figura 2.3, percebe-se muito bem as diferenças no comportamento devido ao estado fisiológico nas faixas do VS e IVP e no começo do IVM, especialmente pelo forte decaimento do conteúdo da clorofila (remoção da absorção na borda do vermelho).

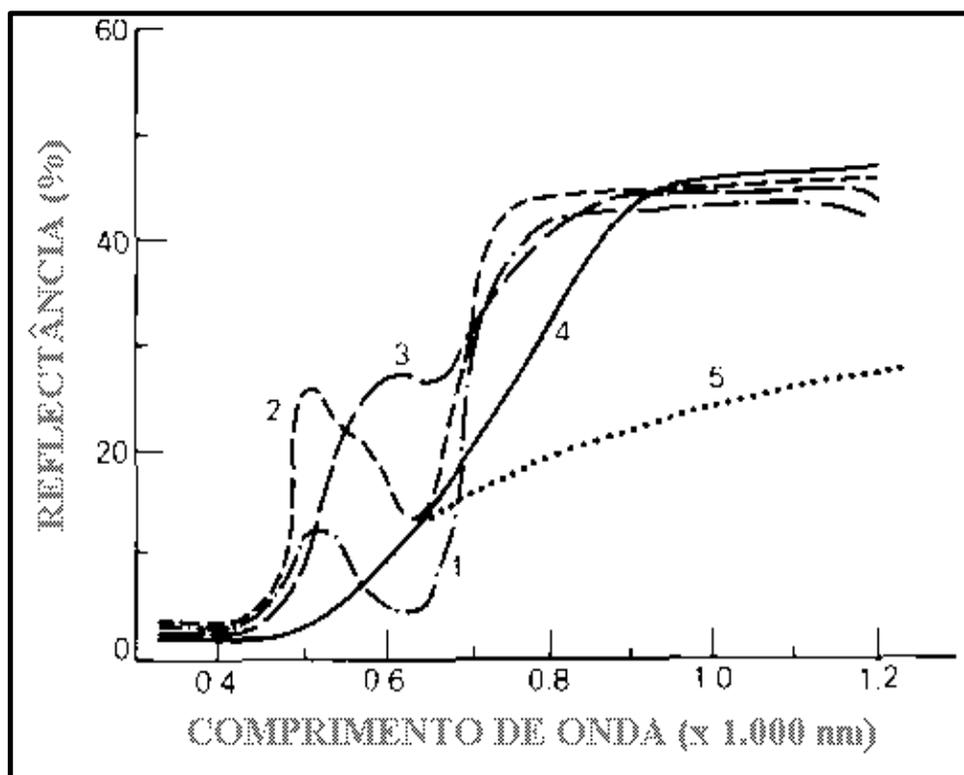


Fig. 2.3 - Espectros de reflectância para diferentes estágios fisiológicos da folha da faia. Em (1) o espectro obtido é de uma folha verde escuro, em (2) de uma folha verde amarelada, em (3) de uma folha vermelho-alaranjada, em (4) de uma folha marrom, e em (5) de uma folha morta (seca).

FONTE: Adaptada de Drury (1993, p. 13).

A Figura 2.4 mostra espectros de laboratório, coletados com o espectrofotômetro UV-5240 (Beckman), para materiais extraídos do pinheiro. Nestes espectros, as feições de absorção provocadas pela lignina e celulose dominam entre 1.000 e 2.500 nm. As feições provocadas pela lignina são melhor definidas nas curvas da folha escura e da casca cinza (Elvidge, 1990).

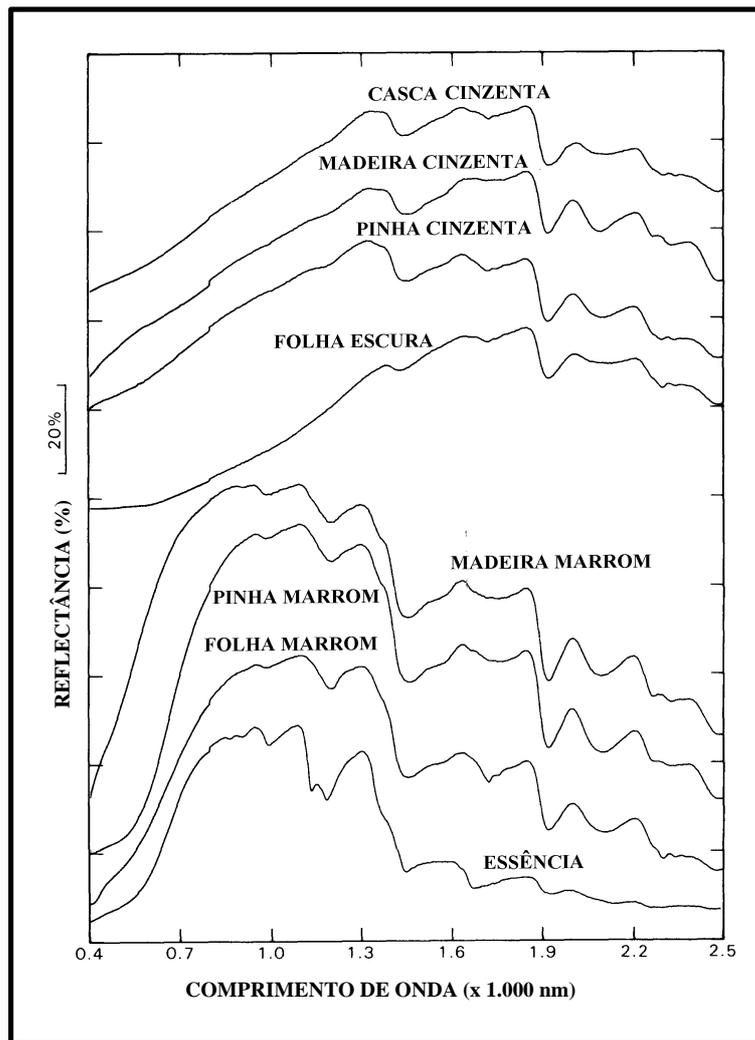


Fig. 2.4 – Reflectância espectral de materiais secos obtidos do pinheiro.

FONTE: Adaptada de Elvidge (1990, p. 1.789).

Com o advento do sensoriamento remoto hiperespectral abriu-se a possibilidade de obter espectros na faixa de 400 a 2.500 nm do espectro óptico, o que era possível somente por espectrorradiômetros de laboratório/campo (Elvidge, 1988a; LaCapra et al., 1996; Martin e Aber, 1997). Nesta direção, os trabalhos de Elvidge e Mouat (1989) e Elvidge (1990) mostraram ser possível detectar traços de vegetação fotossinteticamente ativa com coberturas menores do que 10% utilizando a borda do vermelho através de dados hiperespectrais adquiridos pelo sensor AVIRIS.

Elvidge (1988b, 1990) destacou que, através dos dados hiperespectrais, é possível detectar a presença das feições de absorção provocadas por outros constituintes químicos da vegetação não-fotossinteticamente ativa - lignina e celulose, que estão associados ao dossel ou à palha vegetal presente sobre o solo (*litter*).

2.3.5 – INFLUÊNCIA DA CAMADA SUPERFICIAL

A curva espectral de um solo também pode ser influenciada pela forma de sua superfície. Isso foi observado por Cipra et al. (1971), que demonstraram que a superfície de um solo na forma de torrões apresenta uma diminuição da reflectância em relação à superfície sem torrões em forma de crosta, na faixa de 430 a 730 nm. Em outro estudo, solos argilosos cultivados, que apresentavam agregados de alguns centímetros de tamanho, mostraram fortes diferenças de reflectância em função do ângulo de elevação solar (Coulson e Reynolds, 1971). Crown e Pawluk (1974) observaram que solos recém cultivados, além de seu maior teor de umidade superficial que solos não remexidos, freqüentemente mostram uma geometria aleatória das superfícies refletoras cuja reflectância geral pode variar com o ângulo de iluminação.

2.3.6 - UMIDADE DO SOLO

Em relação à influência da umidade do solo na reflectância, diversos trabalhos têm sido publicados. Entre eles, citam-se os de Bowers e Hanks (1965) e Montgomery (1974), indicando que o aumento da umidade provoca a diminuição na reflectância dos solos, mantendo-se, porém, a forma geral das suas curvas espectrais. Para Bowers e Hanks (1965), a faixa mais sensível para analisar a umidade em solos é a de 1.900 nm e para Coleman e Montgomery (1987), o intervalo de 2.080 a 2.500 nm foi o mais importante na diferenciação de Alfissóis e Vertissóis.

Myers e Allen (1968) observaram que para um aumento no teor de umidade do solo, mantendo-se os demais fatores constantes, há um correspondente decréscimo na reflectância espectral dos solos em todos os comprimentos de onda. Este mesmo resultado foi obtido por Hoffer e Johannsen (1969).

2.3.7 – TEXTURA E ESTRUTURA

De acordo com Epiphanyo et al. (1992), a reflectância, assim como outras propriedades importantes do solo, é influenciada não somente pela composição química dos constituintes do solo, como também pelo tamanho e arranjo das partículas em relação ao ar e à água do solo, ou seja, pela textura e a estrutura do solo. A granulometria refere-se à distribuição de tamanhos de partículas minerais do solo. O arranjo físico e a agregação destas partículas proporcionam ao solo uma estrutura. A textura e a estrutura determinam a quantidade de espaços porosos disponíveis num solo para serem ocupados por água e por ar, que por sua vez influenciarão a reflectância.

Com relação ao tamanho de partículas, Bowers e Hanks (1965) observaram que à medida em que diminuiu o tamanho das partículas, aumentou a reflectância para a caulinita pura em frações de tamanho variando de 0,022 a 2,68 mm em diâmetro (classes de silte grosseiro a areia grossa). Estes autores observaram um aumento exponencial na reflectância para todos os comprimentos de onda entre 400 e 1.000 nm com a diminuição do tamanho da partícula. Os aumentos mais notáveis na reflectância ocorreram para tamanhos de partículas menores que 0,4 mm de diâmetro (classes de tamanho de partículas equivalentes a areia média e fina, aproximadamente). Partículas ou agregados maiores que 2-3 mm de diâmetro teriam pouca influência na absorção adicional da energia solar.

Montgomery (1974) mostrou que o teor de silte foi o parâmetro isolado mais significativo na explicação de variações espectrais em solos, o que poderia ser atribuído ao tamanho das partículas de silte em relação aos comprimentos de onda refletivos.

2.3.8 - MATÉRIA ORGÂNICA

A matéria orgânica tem um efeito importante nas características espectrais dos solos. Observa-se, em geral, que à medida em que o teor de matéria orgânica aumenta, a reflectância do solo decresce no intervalo de comprimentos de onda de 400 a 2.500 nm (Hoffer e Johannsen, 1969). Além de promover alteração na coloração dos solos, a matéria orgânica também está relacionada com a capacidade de troca catiônica, estrutura e capacidade de retenção de água. Assim, muitos pesquisadores têm estudado os seus efeitos no caráter espectral dos solos, entre eles Baumgardner et al. (1969) e Al-Abbas et al. (1972).

Baumgardner et al. (1969) mostraram que em quantidades superiores a 2%, a matéria orgânica pode provocar um efeito de mascaramento na contribuição que os outros constituintes dão para a característica espectral do solo, na região refletida do espectro óptico. Al-Abbas et al. (1972) sugeriram que os efeitos de diminuição de reflectância do solos pelo aumento do teor de matéria orgânica poderiam estar associados também ao teor de argila, uma vez que ambos os constituintes normalmente apresentam uma boa correlação positiva entre si.

A faixa de 400 a 2.500 nm, estudada por Henderson et al. (1992), foi usada para prever teores de matéria orgânica em solos, porém não a sua composição. Esses autores concluíram que as reflectâncias nas bandas entre 425 e 695 nm foram as melhores correlacionadas com os teores de matéria orgânica de solos originados de mesmo material de origem. Por outro lado, Mathews et al. (1973) observaram que a matéria orgânica correlacionou-se mais fortemente com a reflectância no intervalo de 500 a

1.200 nm. Estes mesmos autores observaram que após a destruição da matéria orgânica num solo argilo-siltoso com 12,8% de matéria orgânica, a reflectância cresceu acentuadamente de 400 a 1.300 nm e apresentou ligeira queda de 1.500 a 2.400 nm.

2.4 – SENSOR HIPERESPECTRAL AVIRIS

2.4.1 - SENSORIAMENTO REMOTO HIPERESPECTRAL

O conceito de sensoriamento remoto hiperespectral está ilustrado nas Figuras 2.5 e 2.6, que mostram a transição do sensoriamento remoto multiespectral para o hiperespectral. Numa mesma área, várias imagens (dezenas a centenas) podem ser obtidas simultaneamente, o que possibilita a extração de um espectro de reflectância, praticamente contínuo para cada *pixel* da cena.

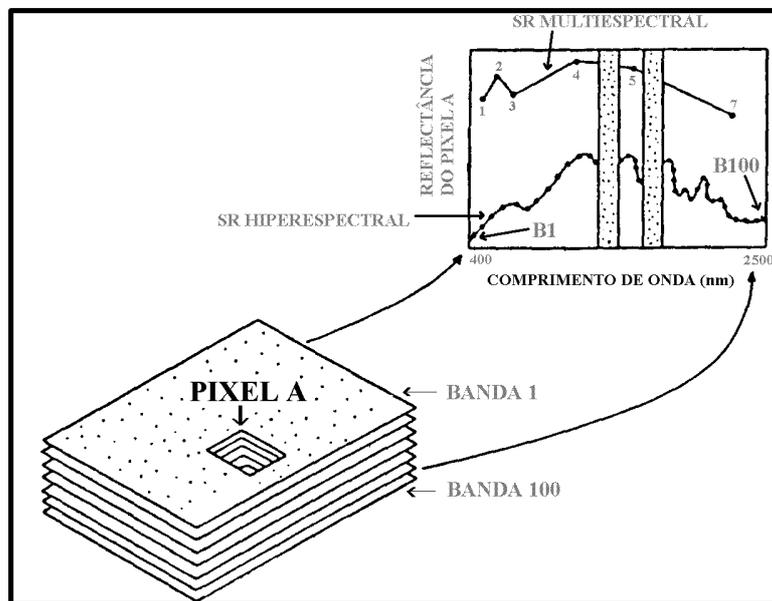


Fig. 2.5 - Representação esquemática do sensoriamento remoto hiperespectral.

FONTE: Galvão (1994, p. 6).

Pela Figura 2.5, pode-se observar que o espectro obtido através do sensoriamento remoto multiespectral (TM, p. ex.) não é capaz de reconstituir adequadamente as bandas de absorção presentes no alvo imageado, limitando as possibilidades de identificação do material. Conforme ilustrado na Figura 2.5, pela abordagem hiperespectral e considerando a existência de um pixel A, os dados de reflectância deste pixel, obtidos em cada um dos 100 canais hipotéticos, poderiam ser utilizados para reconstituir seu espectro de forma praticamente contínua. À medida em que a resolução espectral melhora (Figura 2.6) fica mais fácil identificar as bandas de absorção mineral estreitas, que podem indicar a presença de certos materiais na cena.

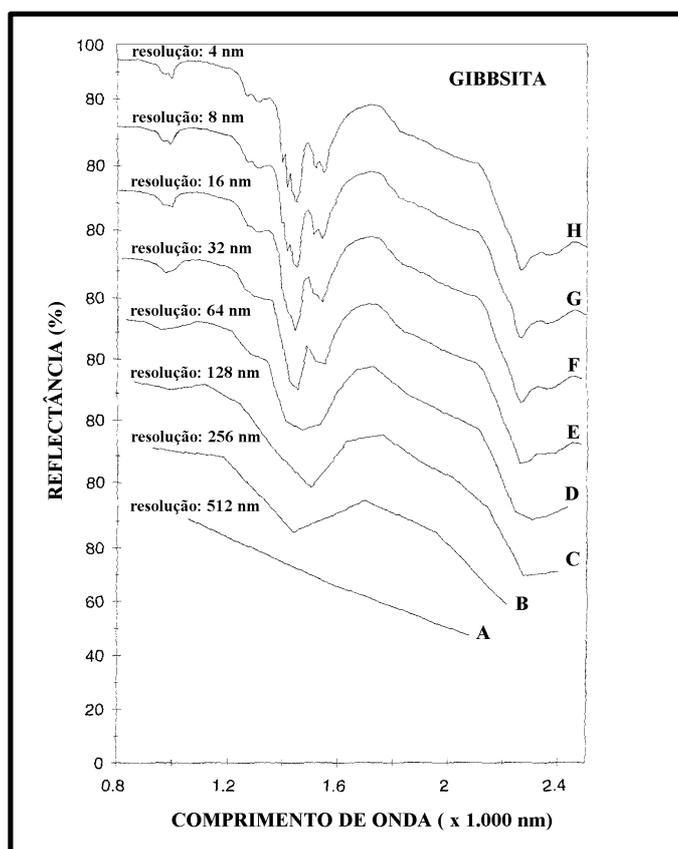


Fig. 2.6 - Efeito da variação da resolução espectral sobre o espectro de reflectância da gibbsita.

FONTE: Adaptada de Cloutis (1996, p. 2223).

Na Figura 2.6, tomando como exemplo a gibbsita na região de 800 a 2.400 nm, a resposta espectral deste mineral nos canais 5 (1.550 a 1.750 nm; $\Delta\lambda= 200$ nm) e 7 (2.080 a 2.350 nm; $\Delta\lambda= 270$ nm) do sensor TM corresponderia a uma resolução espectral situada entre as curvas B e C. Por outro lado, a resposta espectral deste mineral detectada pelo AVIRIS corresponderia a uma resolução espectral situada entre as curvas F e G. Isto mostra como é possível, pelo sensor hiperespectral, reconstituir importantes bandas de absorção que normalmente aparecem nos espectros de diversos alvos, e que não podem ser detectadas por sensores com bandas mais largas, como as presentes nos imageadores colocados a bordo dos satélites Landsat ou SPOT. Deve ser salientado que não é possível através da espectroscopia de imageamento reconstituir a feição de absorção em torno de 1.400 nm mostrada na Figura 2.6, por causa da alta concentração de vapor de água presente na atmosfera (vide Tabela 3.2).

2.4.2 - HISTÓRICO

O sensor AVIRIS é o resultado de um projeto proposto à NASA em 1983, por pesquisadores do JPL, que tornou-se operacional em 1989. A sua concepção, na época, visou preparar a comunidade científica para a utilização de imagens geradas por sensores de alta resolução espectral, bem como incorporá-las aos futuros programas orbitais de sensoriamento remoto. O AVIRIS pode ser utilizado para as mais variadas aplicações, incluindo a possibilidade de simulação de bandas para definição das faixas espectrais de operação de sensores de programas espaciais em desenvolvimento.

De 1989 até o presente, diversas melhorias têm sido incorporadas ao sensor. Entre elas, pode-se citar o aperfeiçoamento do sistema de calibração absoluta que fica no sub-sistema de calibração interno ao AVIRIS (Chrien et al., 1993), do sistema de controle de temperatura dos espectrômetros para manter o alinhamento óptico (Porter et al., 1990), e o aumento da relação sinal/ruído da ordem de duas vezes entre as configurações dos

detetores e multiplexadores de sinal utilizadas no sensor AVIRIS entre os anos de 1993 (Vane e Goetz, 1993) e de 1995 (Green et al., 1998) (Figura 2.7).

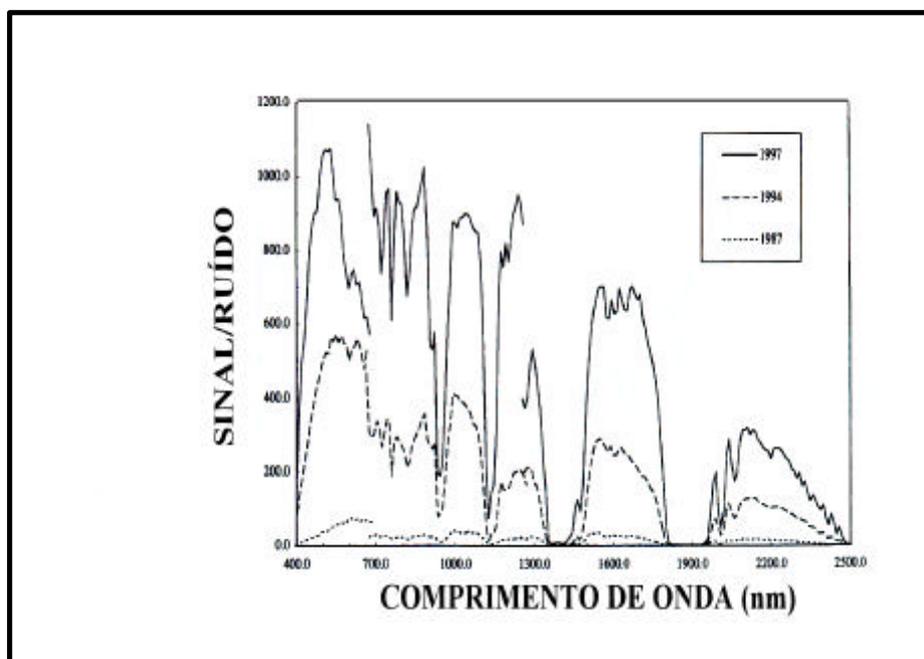


Fig. 2.7 – Curva sinal/ruído do sensor AVIRIS para os anos de 1987, 1994 e 1997.

FONTE: Adaptada de Green et al. (1998, p. 235).

2.4.3 – CONCEPÇÃO

O Sensor AVIRIS é composto, essencialmente, por um grupo de quatro espectrômetros (vide Figura 2.8) que observam a superfície através de um varredor, enquanto se desloca sobre o terreno, a bordo de uma aeronave ER-2.

A cada momento, os espectrômetros recebem o fluxo de radiação de um ponto no solo com um *Instantaneous Field of View* (IFOV) de 1 mrad, a uma altitude de 20 km, equivalente a uma área nominal de 20 x 20 m². Este mesmo *pixel* é detectado simultaneamente em 224 bandas espectrais (Figura 2.9a).

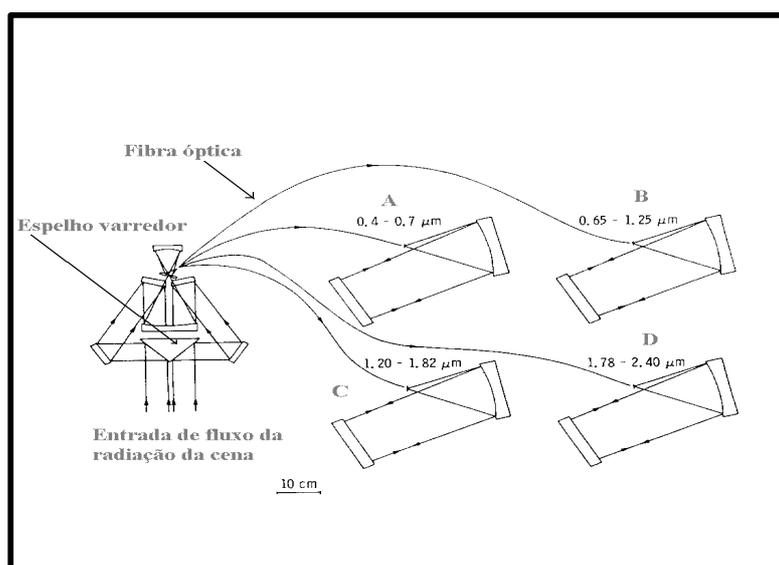


Fig. 2.8 - Representação esquemática do sistema de varredura óptica do AVIRIS. O sistema está conectado, através de cabos de fibras ópticas, a quatro grades espectrométricas, operando em diferentes regiões espectrais. Os detectores do arranjo linear do espectrômetro A são de Si (Silício), enquanto os dos espectrômetros B, C e D são de InSb (Antimoneto de Índio).

FONTE: Adaptada de Vane e Goetz (1993, p. 130).

A imagem é construída a partir do movimento do varredor, o qual define uma linha de imageamento de 614 *pixels* de largura (aproximadamente 11km) perpendicularmente à direção de voo e pelo movimento da aeronave que define a extensão da imagem (variando de 10 a 100 km), considerando a altura de voo padrão de 20 km e o campo de visada de 30 graus. Os dados coletados são armazenados em uma unidade de fita magnética para posterior análise. A geometria desses dados registrados forma um cubo, no qual dois eixos representam as dimensões espaciais e o terceiro eixo representa a dimensão espectral, como ilustrado na Figuras 2.9a e através do respectivo espectro de um *pixel* imageado (Figura 2.9b).

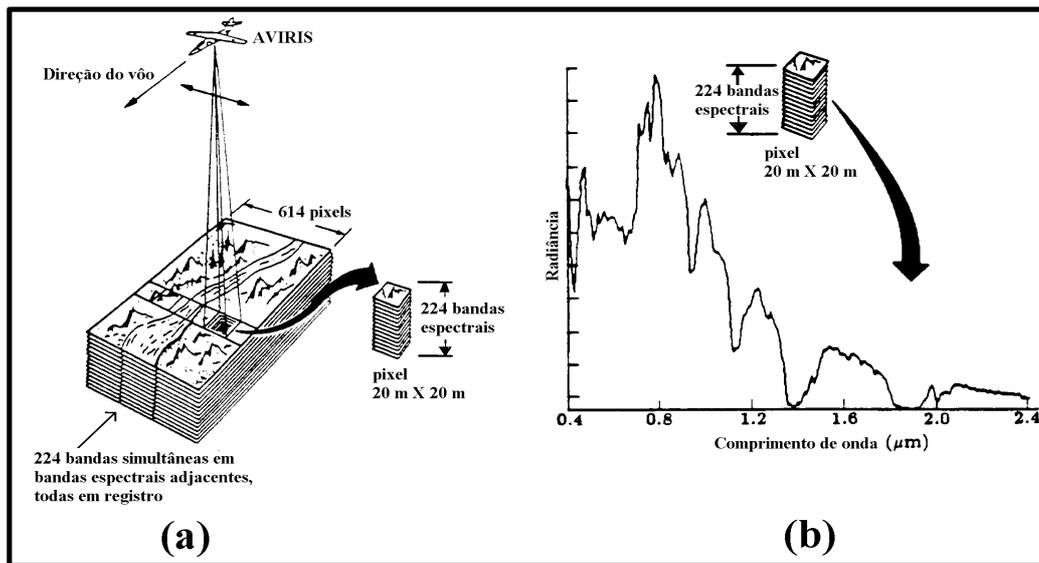


Fig. 2.9 - O processo de obtenção de imagens pelo AVIRIS é mostrado em (a). Em (b), é mostrado um espectro de radiância extraído a partir de um pixel na imagem AVIRIS.

FONTE: Adaptada de Gao e Goetz (1990, p.138).

Os dados espectrais portam informações correspondentes à composição da superfície e à composição da atmosfera. Pelo processamento computacional dos dados é possível produzir uma imagem de qualquer uma das 224 bandas espectrais ou o espectro correspondente a qualquer um dos *pixels* de uma cena, ou ainda, produzir uma imagem a partir de *pixels* que correspondem a um espectro pré-selecionado (Porter e Enmark, 1987). A Tabela 2.3 mostra os principais parâmetros do sensor imageador AVIRIS.

TABELA 2.3 - PARÂMETROS DO AVIRIS

PARÂMETROS DA MISSÃO	Aeronave - ER-2 Altitude de voo: 20 km Velocidade no solo: 740 km/h
PARÂMETROS GEOMÉTRICOS	Largura da Faixa: 11 km Comprimento da Faixa: até 100km IFOV: 1 mrad FOV: 30 graus
PARÂMETROS ESPECTRAIS	Cobertura Espectral: 400 a 2450 nm Intervalo de amostragem: 10 nm Precisão de calibração: <1nm
DETECTORES DO ESPECTRÔMETRO - A	Tipo: Arranjo linear Número de elementos: 32 Comprimento de onda: 410 a 700 nm Material – Silício Tempo de integração: 87 µseg Área ativa do detetor: 200 x 200 µm
DETECTORES DO ESPECTRÔMETRO - B	Tipo: Arranjo linear Número de elementos: 64 Comprimento de onda: 680 a 1270 nm Material: Antimoneto de índio Tempo de integração: 87 µseg Área ativa do detetor: 200 x 200 µm
DETECTORES DO ESPECTRÔMETRO - C	Tipo: Arranjo linear Número de elementos: 64 Comprimento de onda: 1250 a 1860 Material: Antimoneto de índio Tempo de integração: 87 µseg Área ativa do detetor: 200 x 200 µm
DETECTORES DO ESPECTRÔMETRO - D	Tipo: Arranjo linear Número de elementos: 64 Comprimento de onda: 1840 a 2450 Material: Antimoneto de índio Tempo de integração: 87 µseg Área ativa do detetor: 200 x 200 µm
PROCESSAMENTO DOS DADOS	Conversor A/D: 12 bits Taxa de leitura de dados do detetor: 1,37µseg/elemento espectral Pixels/varredura: 614 Taxa de dados: 20,4 Mbits/seg Taxa espectral: 7.300 espectros/seg
VARREDURA	Velocidade: 12 varreduras/s

FONTE: Adaptada de Porter e Enmark (1987, p. 10-12) e Green et al. (1998, p. 229).

2.4.4 - APLICAÇÕES

Desde quando se tornou operacional, o AVIRIS tem sido utilizado em várias campanhas para coleta de dados, visando atender aos interesses da comunidade científica, conforme demonstrado pelo número crescente de trabalhos publicados nos últimos anos. De uma

maneira geral, os trabalhos podem ser agrupados nas seguintes áreas: geologia, botânica, correção e ciência da atmosfera, e água. A seguir são apresentados alguns trabalhos em função da área de aplicação.

a) - geologia e solos

Nas investigações em geologia e solos, os dados AVIRIS têm sido aplicados na obtenção de mapas de distribuição de minerais com feições de absorção diagnósticas, através do uso de técnicas de classificação hiperespectral ou de modelos de misturas espectrais. Como exemplo, Kruse et al. (1993a) fizeram uma análise integrada dos dados AVIRIS com medidas espectrais de campo e mapas geológicos convencionais para quantificar a distribuição espacial de assembléias minerais espectralmente distintas nas imagens da região do Death Valley, Califórnia. Ainda em geologia, classes de minerais com feições de absorção bem definidas e associadas com alterações hidrotermais foram investigadas por Sommer et al. (1993) e Boardman e Huntington (1996).

Em relação aos solos, o AVIRIS tem sido usado para elaboração de mapas com a sua distribuição espacial e a relação entre seqüências de solos e outros materiais da superfície (Palacios-Orueta e Ustin, 1996). Vane e Goetz (1993) relataram a importância dos sensores de alta resolução espectral para discriminar diferenças sutis na composição dos solos e mapeamentos de outros tipos de coberturas. Esta importância está muito bem demonstrada no trabalho de Mustard (1993). Este autor examinou o espectro de três tipos de solos e concluiu que as variações na quantidade de ferro férrico e ferroso e de compostos orgânicos foram responsáveis pelas diferenças espectrais dos solos pesquisados através do modelo de mistura espectral linear.

b) – botânica

Em botânica, esses dados oferecem condições de realizar o mapeamento da vegetação com melhor discriminação das espécies usando bandas estreitas posicionadas na faixa espectral de 1.200 a 1.500 nm em vez de bandas amplas posicionadas no intervalo de 400 a 2.500 nm, a exemplo do sensor TM (Goetz et al., 1985).

Na avaliação da distribuição, fisiologia e produtividade da vegetação, Gamon et al. (1993) utilizaram modelos de mistura espectral e o índice *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), calculados a partir dos dados AVIRIS, em uma área de preservação ambiental, na Califórnia. Os principais tipos de vegetação foram identificados e uma forte correlação entre NDVI e parâmetros do dossel (índice de área foliar, biomassa, clorofila, nitrogênio, dióxido de carbono) foi obtida.

Roberts et al. (1997) propuseram a utilização da banda de absorção associada ao conteúdo de água das folhas, que ocorre no espectro da vegetação em torno de 960 nm, para estimativas dos parâmetros do dossel. Esta feição de absorção só pode ser reconstituída por sensores de alta resolução espectral como o AVIRIS.

d) - água

Novo et al. (1995) examinaram a relação existente entre a concentração de clorofila *a* em Mono Lake, Estados Unidos, e os espectros de reflectância desta área extraídos a partir de imagens AVIRIS. Os resultados dessa relação foram utilizados para a produção de um mapa mostrando a distribuição de clorofila na superfície do lago.

e) - ciência da atmosfera

De acordo com Vane e Goetz (1993), a absorção atmosférica e o espalhamento têm um efeito intenso sobre o sinal registrado por sensores aerotransportados ou em plataformas orbitais, que operam na faixa espectral refletida do espectro eletromagnético. Nos sensores multiespectrais, para se reduzir os fortes efeitos de absorção atmosférica, a coleta de dados tem sido feita nas denominadas janelas atmosféricas. Um dos aspectos importantes do imageamento hiperespectral é que ele fornece informações sobre o vapor de água e outros gases necessários para estimar a reflectância de superfície.

Gao et al. (1991) analisaram a necessidade de realizar uma correção nas imagens AVIRIS tanto do espalhamento quanto da absorção atmosférica. Para isso, os autores propuseram um novo método para recompor a reflectância de superfície, o qual integra os valores do vapor d'água *pixel* por *pixel*, originado das feições em 940 e 1.140 nm, e não necessita de medidas de campo. O espectro de transmissão na faixa de 400 a 2.500 nm foi calculado, onde foram levados em consideração o vapor d'água, dióxido de carbono (CO₂), oxigênio (O₂) e o metano (CH₄). Desta forma, após a correção atmosférica, foi possível identificar muitos minerais com feições de absorção próximas a 2.200 nm presentes nas curvas de reflectância.

2.4.5 - CALIBRAÇÃO DO SENSOR AVIRIS

Para seu pleno uso, os dados AVIRIS precisam ser calibrados espectral, radiométrica e espacialmente. Em geral, segue-se a ordem: obtenção dos parâmetros físicos envolvidos na medição da radiância; comparação dos dados adquiridos de diferentes regiões e em diferentes tempos; comparação e análise do espectro AVIRIS com os dados adquiridos por outros instrumentos; e comparação e análise dos dados com os resultados de modelos computacionais.

O AVIRIS é espectral, radiométrica e espacialmente calibrado em laboratório antes e depois de cada temporada de vôo (Chrien et al., 1990; 1995; Green et al., 1998). Uma vez integrado ao avião ER-2, ocorre a validação da calibração no início, meio e fim da temporada de vôo. Antes e depois de cada linha de vôo são feitas aquisições de medidas obtidas pelo calibrador a bordo.

Em laboratório, o AVIRIS é espectralmente calibrado através de um monocromador, que cobre todo o espectro solar refletido. O monocromador é calibrado por lâmpadas de baixa pressão de mercúrio e crip-ton. As linhas de emissão desses elementos são usadas como padrões de calibração espectral do AVIRIS. Na seqüência da calibração uma lâmpada de quartzo é colocada na entrada da fenda do monocromador, de tal forma que a luz com a largura espectral de 1 nm passa do monocromador para o colimador e chega na entrada da ótica do AVIRIS. O monocromador é automaticamente varrido, através de cada grade em intervalo espectral de 0,5 nm, e simultaneamente os sinais do AVIRIS são registrados. A calibração na entrada do monocromador e os sinais da medidas do AVIRIS são analisados através de programas para determinar as posições espectrais, as funções de resposta e as incertezas nos 224 canais espectrais do AVIRIS. Todo este procedimento é realizado em 48 horas para os 224 canais, o que anteriormente levava mais de duas semanas (Green et al., 1998).

Em relação à calibração radiométrica, é empregada uma lâmpada de halogênio de 1.000 W, com irradiância conhecida e calibrada pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST). A lâmpada é alimentada por uma fonte regulada com corrente e tensão conhecidas. Um novo esquema foi implementado para calibrar o AVIRIS a partir do padrão radiométrico. A lâmpada é instalada em um suporte e fica a uma certa distância conhecida deste padrão, permitindo a variação na posição da iluminação sobre uma placa padrão, mantendo-se sempre dentro do campo de visada do AVIRIS e em vários campos de visada instantâneos (IFOV). A vantagem deste esquema é de não necessitar de espectrômetros ou radiômetros adicionais e de uma fonte radiométrica

secundária. Desta forma, a radiância que chega na visada do AVIRIS é proveniente da lâmpada padrão que é refletida pela placa padrão. O uso deste método requer cuidados adicionais na construção do *baffling* (bloqueador) para eliminar/atenuar a luz espalhada no caminho entre a placa e a óptica do AVIRIS, bem como conhecer muito bem as propriedades da reflectância bidirecional da placa padrão. A razão da radiância conhecida da placa incidente no AVIRIS e os valores digitais fornecidos pelo AVIRIS são usados para calcular os coeficientes de calibração radiométricos.

A calibração espacial do AVIRIS é medida periodicamente no laboratório e de maneira análoga à calibração espectral (Chrien and Green, 1993). Uma lâmpada de halogênio é usada para iluminar uma fenda estreita, e a iluminação varre através do foco de um colimador várias vezes e em toda a entrada da óptica do AVIRIS. O sinal medido pelo AVIRIS ao varrer a fenda é usado para determinar a função de resposta espacial. A calibração espacial é importante para as investigações da dimensionalidade dos alvos com dimensões próximas ou abaixo da resolução espacial do AVIRIS.

2.4.5.1 – MÉTODOS DE OBTENÇÃO DA IMAGEM REFLECTÂNCIA

Pode-se citar alguns trabalhos nos quais é discutida a importância da conversão dos valores de radiância do AVIRIS para valores de reflectância de superfície. Dwyer et al. (1995) trataram da determinação quantitativa das características físico-químico-mineralógicas dos materiais da superfície de uma região de Drum Mountains, Utah. Para esta região, foram utilizados dois métodos de conversão radiométrica. O primeiro método, chamado de regressão linear (*Empirical Line* (EL)), requer medidas de laboratório ou de campo para uma região espectralmente e espacialmente homogênea. A reflectância é obtida através de regressão linear entre a reflectância de laboratório ou campo e as radiâncias correspondentes na imagem. O outro método utilizado foi o modelo de transferência radiativa para remoção da atmosfera (ATREM), que utiliza as bandas de absorção situadas em 940 e 1.100 nm para o cálculo do vapor d'água, a curva

de irradiância solar e o espectro de transmitância de vários gases atmosféricos, não tendo necessidade de medições espectrais de campo ou de laboratório. Os resultados mostraram que tanto a técnica EL como a técnica ATREM produzem espectros similares aos obtidos no laboratório ou no campo, para amostras representativas do mesmo *pixel*. De acordo com Dwyer et al. (1995), a técnica EL, que requer como pré-requisito medidas radiométricas de superfície para a conversão, oferece maior operacionalidade para a investigação sobre os dados obtidos pelo espectrorradiômetro. Esta facilidade pode ser mais interessante nas investigações científicas.

Roberts et al. (1986) aplicaram a técnica *Flat Field Correction* (FFC) para calibrar os dados obtidos pelo imageador *Airborne Imaging Spectrometer* (AIS), antecessor do AVIRIS. Este método consiste na seleção de uma área de fácil localização na imagem, que possua resposta espectral elevada e uniforme no intervalo de 400-2.500 nm. O espectro de radiância de cada *pixel* é então dividido pelo espectro de radiância média desta área, que serve como referência para a obtenção da reflectância aparente.

Kruse e Clark (1986) descobriram que as feições de absorção estreitas centradas em aproximadamente 2.170 e 2.200 nm não são causadas pela mineralogia da superfície, mas, provavelmente, por vapor d'água. A indicação da causa pelo vapor d'água se deve à publicação dos dados espectrais relativos à transmissão atmosférica obtidos pelo modelo Lowtran-5. Outro resultado importante foi a de que sem a correção e o conhecimento detalhado dos efeitos da atmosfera, não é possível ter precisão no mapeamento da mineralogia da superfície, particularmente em condições de baixa concentração mineral.

Os aerossóis e o vapor d'água, parâmetros de entrada nos modelos de transferência radiativa para a correção atmosférica Lowtran-7 e 5S, foram estudados no trabalho de Leprieur et al. (1995). Eles avaliaram suas influências na recomposição espectral dos valores de reflectância dos dados AVIRIS, para a região de Camargue, França, contendo

os alvos alfafa, girassol e trigo. Os autores concluíram que o Lowtran-7 produz melhores resultados no ajuste das curvas quando comparado com as medidas obtidas no solo, principalmente, pelo fato de que a altura do sensor pode ser ajustada neste algoritmo. Entretanto, foram observadas discrepâncias em 940 e 1.130 nm, que foram parcialmente explicadas pelas variações espaciais do vapor d'água entre os sítios, e pela variação na calibração do sensor. As pequenas aproximações em cada um dos parâmetros, aliadas às incertezas nas condições iniciais da atmosfera, também produziram significativas variações na recomposição da reflectância.

Segundo Clark et al. (1995), o método de correção atmosférica adaptado por Green (1991) e baseado no modelo de transferência radiativa MODTRAN tende a produzir melhores resultados que o ATREM. A fundamentação teórica do MODTRAN é mais elaborada, resultando em um algoritmo mais preciso para estimar a coluna de vapor d'água, pressão, profundidade óptica dos aerossóis e da radiação medida pelo AVIRIS.

2.4.6 - MÉTODOS DE ANÁLISE DOS DADOS AVIRIS

Para a análise de imagens hiperespectrais há várias técnicas que podem ser aplicadas. Além das tradicionais técnicas de processamento de dados obtidos por sensores multiespectrais (p. ex., Componentes Principais, Transformações IHS e RGB, Adição e Razão de Bandas, MaxVer), as imagens hiperespectrais requerem algoritmos adicionais que explorem, de forma mais eficiente e precisa, o potencial destes dados para identificar e mapear os diversos materiais. Entre estas novas técnicas de processamento que incorporam a visão hiperespectral citam-se a *Spectral Angle Mapper* (SAM) (Kruse et al., 1993b), a Tetracorder (Clark e Swayze, 1995; Clark et al., 1991) e a *Spectral Feature Fitting* (SFF) (Clark et al., 1990b).

Antes da utilização das técnicas Tetracorder e SFF, há necessidade de normalizar os dados através do uso da função matemática conhecida por *continuum* (Clark e Roush,

1984). A remoção das feições de absorção do espectro pela técnica do *continuum* consiste em normalizar o espectro de reflectância em relação a uma linha de base, para então poder realizar as comparações das feições individuais de absorção presentes nas curvas de reflectância. Em outras palavras, após a remoção do *continuum*, pode-se aplicar métodos computacionais especializados para identificar um alvo por meio da comparação das bandas de absorção presentes em seu espectro com as feições que ocorrem nos espectros de materiais de referência contidos nas denominadas bibliotecas espectrais (Dwyer et al., 1995; Kruse et al., 1993a; Cloutis, 1996). O software de processamento de imagens *ENvironment for Visualizing Images* (ENVI) contém o algoritmo necessário para a remoção do *continuum* (ENVI, 1997). Detalhes sobre este procedimento e sobre o uso da técnica SFF serão introduzidos no próximo capítulo.

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo descreve o procedimento de trabalho adotado para alcançar os objetivos definidos no Capítulo 1. Aspectos metodológicos mais detalhados serão introduzidos concomitantemente à discussão no capítulo seguinte. A Figura 3.1 sintetiza os passos adotados na execução da metodologia empregada no trabalho.

3.1 - SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

No período de agosto a setembro de 1995, o INPE participou da missão SCAR-B, em conjunto com o *Jet Propulsion Laboratory* (JPL). Nesta missão foi utilizado o sensor aerotransportado AVIRIS pertencente ao JPL, onde foram realizados 10 sobrevôos em várias áreas do País, incluindo o norte de Brasília, Cuiabá, Pantanal Mato-grossense, Campo Grande, Porto Nacional, Alta Floresta, Marabá, Vilhena e Ji-Paraná (SCAR-B, 1996). Com esta missão, pela primeira vez, o Brasil participou da nova concepção de aquisição de dados denominada Sensoriamento Remoto Hiperespectral ou Espectroscopia de Imageamento. O AVIRIS adquiriu imagens no intervalo de 383 a 2.508 nm em 224 bandas de 10 nm de largura, distribuídas em intervalos regulares de 10 nm, e com resolução espacial nominal de 20 metros.

Para a seleção da área de estudo, o conjunto área/imagem escolhido deveria atender 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 de no mínimo 10 a 11 *pixels*, aproximadamente, o que corresponde a uma área entre 200 x 200 m² e 220 x 220 m² na superfície, respectivamente; apresentar solos expostos; e estar em local de fácil acesso.

Através das imagens do TM, em composição colorida, azul para a banda 3 (0,63 a 0,69 μm), verde para a banda 4 (0,76 a 0,90 μm) e vermelho para a banda 5 (1,55 a 1,75 μm), na escala de 1:250.000, e dos *quicklooks* disponíveis das imagens AVIRIS (banda 31 = 682 nm), foi possível avaliar quais das imagens AVIRIS atenderiam aos requisitos descritos. As imagens TM contribuíram para a obtenção de informações sobre solos, relevo do terreno, cobertura vegetal, localização, e identificação da linha de vôo do AVIRIS. As imagens AVIRIS contribuíram para as informações sobre cobertura de nuvens, exposição de solo, relevo do terreno, e falhas na aquisição de dados. A Tabela 3.1 fornece as características da linha de vôo escolhida, como o dia, horário, latitude e longitude iniciais e finais do vôo e a hora de imageamento.

TABELA 3.1 - CARACTERÍSTICAS DA LINHA DE VÔO

VÔO	20-08-95	Ângulo de Elevação Solar Médio: 56,61°
CORRIDA	1	
LINHA	4257	
NOME DO SÍTIO	CAMPO GRANDE	
LATITUDE	INÍCIO: S19:54:21	FIM: S19:54:40
LONGITUDE	INÍCIO: W53:24:55	FIM: W53:59:52
HORÁRIO GMT	INÍCIO: 14:39:52	FIM: 14:44:42

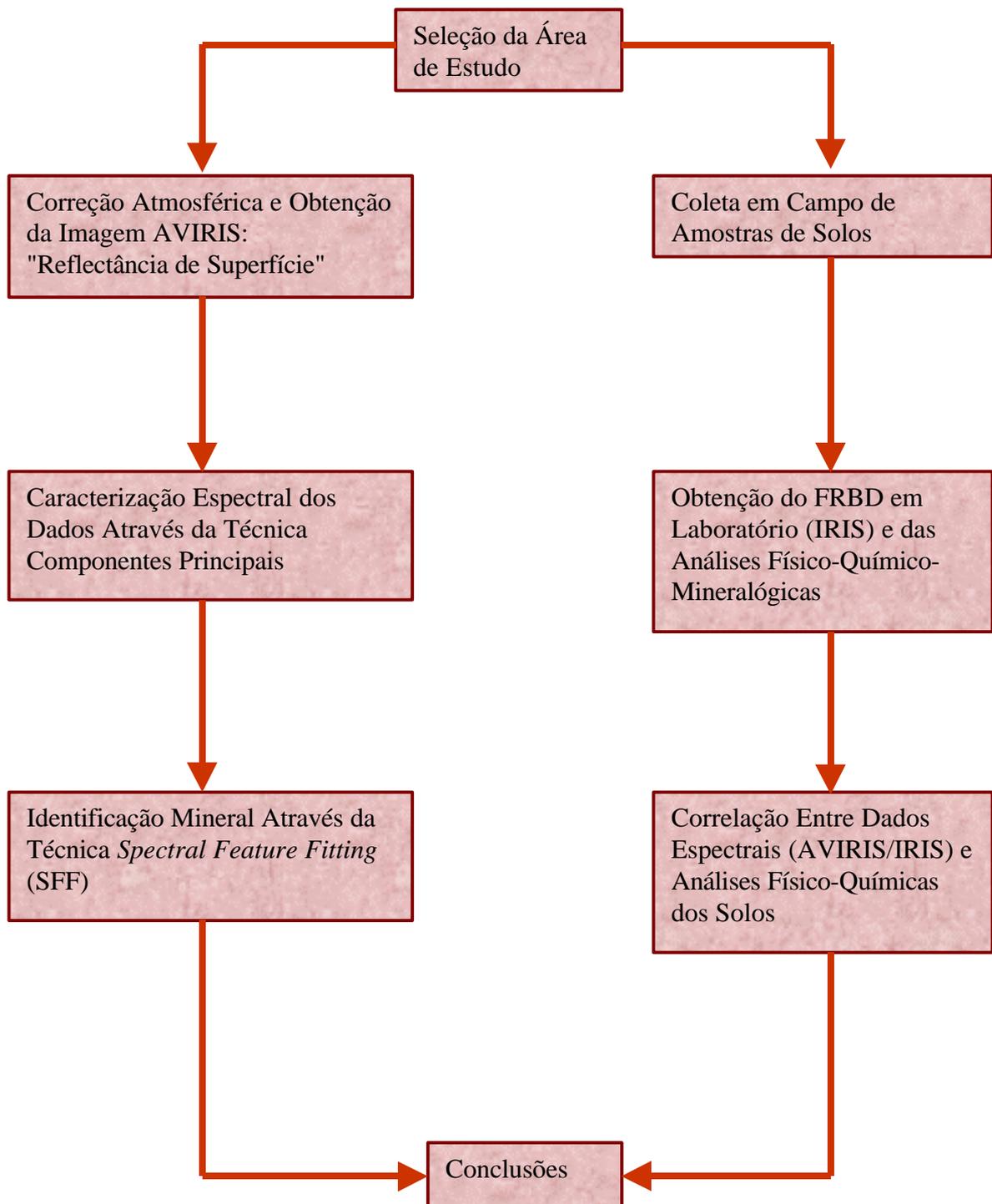


Fig. 3.1 - Metodologia adotada na execução do trabalho.

hidrográficas dos rios Pardo e Verde, ambos pertencentes à porção oeste da Bacia Sedimentar do Paraná. A topografia da região tem relevo suave a ondulado, com uma variação máxima de aproximadamente 188 m (FIBGE/SEPLAN/BR, 1978).

3.1.1.1 – GEOLOGIA

De acordo com o mapa geológico e geomorfológico Projeto RADAMBRASIL (1983), escala 1:1.000.000, a região de estudo localiza-se em três tipos de formação, a saber: Santo Anastácio; Caiuá do Grupo Bauru; e Serra Geral do Grupo São Bento, pertencentes ao Planalto Setentrional da Bacia do Paraná. Para o Grupo Bauru predominam as formas conservadas, pediplanadas nos topos, esculpidas em rochas, enquanto para o Grupo Serra Geral ocorrem formas amplas e dissecadas em interflúvios tabulares ao longo dos vales, onde o processo erosivo fluvial expôs os basaltos.

3.1.1.2 - CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

Nesta região, o tipo climático é caracterizado como Mesoxeroquimênico Modificado "Tropical Brando de Transição". A temperatura média anual oscila entre 19 °C e 28 °C , com as máximas ocorrendo no período compreendido entre os meses de outubro e março e as mínimas entre os meses de maio e julho. O período seco estende-se de 4 a 5 meses (maio à setembro), quando as precipitações pluviométricas são praticamente nulas. A conseqüente deficiência de água disponível às plantas nesse período relativamente prolongado confere um grau moderado a forte para esse fator.

A água não se acumula nessas áreas em nenhuma época do ano, em razão da granulometria, com altos teores de areia, alta permeabilidade e porosidade, lençol freático muito profundo e ausência de camada sub-superficial pouco permeável no solo. A precipitação anual é regular, entre 1.200 e 1.500 mm, sendo novembro, dezembro, janeiro e fevereiro os meses mais chuvosos (FIBGE/SEPLAN/MS, 1988). A umidade relativa do ar é variável entre 55% e 80%, registrando-se valores mínimos no trimestre

junho-julho-agosto e máximos no período compreendido entre os meses de dezembro e fevereiro.

3.1.1.3 - VEGETAÇÃO

Segundo FIPLAN/MS (1989b), a região citada tem uma cobertura natural com predominância de savana (cerrado). É uma denominação utilizada para as várias formações de estrutura predominantemente campestre intercalada por pequenas plantas lenhosas até arbóreas e em geral serpenteadas por floresta-de-galeria. Fisionomicamente, foi subdividida em quatro formações num gradiente que vai do campo limpo (Savana Gramíneo-Lenhosa), passando pelo campo sujo ou cerradinho (Savana Parque), pelo campo cerrado propriamente dito (Savana Arbórea Aberta) até o cerradão (Savana Arbórea Densa) de porte quase florestal. A região também tem extensas áreas cobertas por pastagem com a gramínea braquiária, capim colômbio e capim brizanta.

Devido ao desmatamento para implantação de pastagens, a região está sujeita a um processo acelerado de erosão superficial, principalmente nos lugares situados nas vertentes de forte declive e vales. Outro fator pós-desmatamento é a instabilidade crescente em função da diversificação dos tipos de ocupação, por vezes inadequados, face à baixa potencialidade natural das terras. A persistência de usos inadequados, como a lavoura, pode levar à desertificação. As areias transportadas das partes mais altas das paisagens, nesse caso, normalmente se acumulam nas baixadas, formando concentrações de areias lavadas que, nas estradas não cascalhadas, dificultam o tráfego de veículos; podem, também, numa situação mais grave, causar o assoreamento de pequenas drenagens, inclusive de nascentes.

3.1.1.4 - TIPOS DE SOLOS

Através do mapa exploratório de solos (Projeto RADAMBRASIL, 1987), escala 1:250.000, foram identificadas quatro classes de solos ao longo do mosaico, designadas pelas seguintes siglas:

AQa13: Areias Quartzosas álicas A moderado relevo suave ondulado + Podzólico Vermelho – Amarelo álico A moderado Tb textura arenosa/média;

AQa6: Areias Quartzosas álicas A moderado relevo suave ondulado e plano + Latossolo Vermelho_Escuro álico A moderado textura média;

LEa11: Latossolo Vermelho-Escuro álico A moderado textura média relevo plano e suave ondulado + Areais Quartzosas álicas A moderado;

LRd3: Latossolo Roxo distrófico A moderado textura argilosa relevo suave ondulado e plano + Terra Roxa Estruturada eutrófica A moderado textura argilosa.

A descrição geral destes solos, de acordo com FIPLAN/MS (1989a) é feita a seguir.

a) Latossolo Vermelho-Escuro (LEa)

São solos minerais, não hidromórficos, altamente intemperizados, caracterizados por apresentarem um horizonte B latossólico. Em geral, são profundos a muito profundos, bem drenados a acentuadamente drenados, friáveis e bastante porosos. As principais características para a identificação destes solos no campo são a estrutura fracamente desenvolvida, o que lhe confere um aspecto maciço, a pequena variação textural em profundidade e a coloração vermelho-escura.

Apresentam seqüência de horizontes A, B e C. O horizonte A é do tipo moderado, geralmente, com transição difusa ou gradual para o horizonte B. Este apresenta teor de óxido de ferro (Fe_2O_3) entre 9 e 18% para textura argilosa e relação Al_2O_3/Fe_2O_3 inferior

a 3,13% para textura média. O caráter álico é caracterizado pela saturação em bases inferior a 50% e em alumínio superior a 50%.

Estes solos são desenvolvidos a partir dos mais diversos materiais originários, como os sedimentos do Terciário-Quaternário e das Formações Aquidauana, Botucatu, Bauru, Ponta Grossa e Furnas, o que possibilita a ocorrência destes solos com texturas variáveis.

Esta classe de solo apresenta posição no relevo e propriedades físicas favoráveis à utilização agrícola, mas seu pleno uso está condicionado às correções das deficiências de elementos nutritivos. Atualmente, são muito utilizados para a pecuária, onde se aproveitam as espécies nativas das regiões de savana, ou introduzem-se outras espécies, como braquiária, principalmente quando possuem textura média. Nos "chapadões", onde predominam as texturas argilosa e muito argilosa, são usados com o emprego de técnicas modernas para o plantio de culturas anuais de soja e arroz, com resultados bastante satisfatórios.

b) Latossolo Roxo Distrófico (LRd3)

São solos minerais, não hidromórficos, caracterizados por apresentarem horizonte B latossólico com teores de Fe_2O_3 superior a 18%. São profundos a muito profundos, acentuadamente drenados, friáveis, muito porosos e permeáveis, com baixa susceptibilidade à erosão, em função do alto grau de floculação e estabilidade dos agregados. Apresentam pequena diferenciação entre os horizontes, estrutura fraca muito pequena a pequena, granular, com aspecto maciço. As suas partículas são fortemente atraídas pelo imã, característica importante na identificação desses solos no campo.

Quando derivados do basalto apresentam-se argilosos a muito argilosos, com teores de argila variando de 38 a 74%, podendo mostrar o caráter distrófico ou eutrófico. Os

latossolos roxos desenvolvidos de material não basáltico são argilosos e distróficos, com características físicas semelhantes aos originados do basalto.

Apresentam boas propriedades físicas, sem impedimentos ao desenvolvimento das raízes e ao manejo, permitindo o emprego de qualquer implemento agrícola, sendo encontrados sempre em relevo plano e suave ondulado. A correção da deficiência nutritiva torna estes solos amplamente favoráveis ao uso agropecuário.

c) Terra Roxa Estruturada eutrófica (TRE)

São solos minerais, argilosos, profundos, bem drenados, com argila de atividade baixa, apresentando seqüência de horizonte A moderado, B textural e C, e pequena diferenciação entre os sub-horizontes. Como características principais destacam-se a cerosidade abundante e forte, a baixa relação textural, a estrutura bem desenvolvida e os teores de Fe_2O_3 superiores a 15%.

Originam-se da decomposição do basalto da Formação Serra Geral. A presença de nutrientes em quantidades elevadas e a quase total ausência do alumínio permitem sua utilização com as mais variadas culturas, desde hortaliças até culturas perenes, desde que obedecidas as exigências climáticas. Possuem ótimas condições físicas, sem impedimentos para o desenvolvimento das raízes e ocorrem em relevo suave ondulado, favorável à mecanização.

d) Podzólicos Vermelho - Amarelo álico (PVa)

Esses solos possuem muitas características semelhantes ao Podzólicos Vermelho – Amarelo eutróficos, diferindo quanto à saturação de bases, que é inferior a 50% e algumas características morfológicas.

O horizonte A é do tipo moderado e está sobrejacente a um horizonte B textural; possui estrutura fraca a moderada em blocos angulares e subangulares e com cerosidade pouco comum. Nos solos desenvolvidos a partir de sedimentos do quaternário, a cerosidade está ausente e, neste caso, são identificados em campo pela alta relação textural.

Ocorrem perfis com cascalho, concreções, caracteres abrupto e plíntico, em função principalmente do material originário e do seu posicionamento fisiográfico. Os solos álicos, que têm menor ocorrência, relacionam-se às rochas das Formações Aquidauana e Palermo. Em geral, são solos de baixa fertilidade natural, com boa aptidão ao uso agrícola, desde que corrigidos em relação à falta de nutrientes e, em alguns casos, à acidez nociva.

e) Areias Quartzosas álicas (AQa)

São solos pouco desenvolvidos, profundos a muito profundos, excessivamente drenados, com seqüência de horizontes A moderado e C, e textura nas classes areia a areia franca.

Os baixos valores de soma de bases, aliados à saturação com alumínio trocável elevada e agravados pela intensa lixiviação, baixa capacidade de retenção de umidade e alta suscetibilidade à erosão, tornam desaconselhável sua utilização agrícola, já que, para tal, requerem grande investimento de capital. Como alternativa, destacam-se os aproveitamentos das espécies nativas da vegetação de savana como pastagem natural. A implantação de pastagem com braquiária tem demonstrado bons rendimentos nos três primeiros anos, em média, decaindo consideravelmente após este período.

3.2 - CORREÇÃO DOS DADOS AVIRIS PARA OS EFEITOS DE ABSORÇÃO E ESPALHAMENTO ATMOSFÉRICOS

Os dados coletados pelo sensor AVIRIS utilizados no presente trabalho foram corrigidos para os efeitos de absorção e espalhamento atmosféricos por um método de transferência radiativa baseado no modelo MODTRAN (Green, 1991; Green et al., 1993). Segundo Crósta (1997), com este método é possível calcular os valores de reflectância de superfície, a partir dos dados de radiância total medidos pelo AVIRIS no topo da atmosfera. Esses valores são funções 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. As equações 3.1 e 3.2 mostram as expressões matemáticas que possibilitam a obtenção da reflectância de superfície:

$$L_T(\lambda) = \frac{F_o(\lambda) \cdot r_a(\lambda)}{\rho} + \frac{F_o(\lambda) \cdot t_d(\lambda) \cdot r_g(\lambda) \cdot t_u(\lambda)}{\rho} \quad (W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1} \cdot sr^{-1}) \quad (3.1)$$

onde,

$L_T(\lambda)$ = radiância espectral total;

$F_o(\lambda) \cdot r_a(\lambda) / \rho$ = radiância espectral solar ($W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1} \cdot sr^{-1}$);

$t_d(\lambda)$ = transmitância espectral descendente até a superfície;

$t_u(\lambda)$ = transmitância espectral ascendente que retorna ao sensor;

$r_g(\lambda)$ = reflectância espectral de superfície;

$F_o(\lambda)$ = irradiância solar espectral fora da atmosfera ($W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1} \cdot sr^{-1}$);

$\rho_a(\lambda)$ = reflectância espectral da atmosfera;

Extraindo r_g da equação acima, tem-se:

$$r_g(\lambda) = [L_T(\lambda) - F_o(\lambda) \cdot r_a(\lambda) / p] / [F_o(\lambda) \cdot t_d(\lambda) \cdot t_u(\lambda) / p]. \quad (3.2)$$

Os parâmetros atmosféricos que mais afetam a resposta espectral de uma dada superfície são o vapor d'água (H₂O), os aerossóis, a mistura de gases (O₂, CO₂, CH₄) e o ozônio. A água, na forma de vapor, é geralmente o parâmetro de maior influência, sendo responsável por fortes bandas de absorção atmosférica em torno de 940, 1.140, 1.400 e 1.900 nm. O método utilizado torna possível a determinação precisa da água, em relação aos seus componentes sólido, líquido e vapor, do espalhamento molecular e dos gases, e a estimativa dos aerossóis. O modelo não é preciso o suficiente para a obtenção de estimativas em ambientes saturados em aerossóis, isto é, excesso de fumaça e/ou nuvens, neblina, poeira, etc.

O método é composto por quatro programas, que são aplicados à imagem composta por valores de radiância. Os programas operam de forma sequencial, isto é, o resultado gerado por um programa serve de entrada para o próximo. Estes programas, do MODTRAN, são os seguintes: h2olut0, que é executado 12 vezes para 12 diferentes quantidades de vapor de água; h2osp10, utilizado para corrigir as mudanças nas posições das bandas do AVIRIS, usando os 12 diferentes valores de vapor de água e interpolando-os através de uma função *spline*; vlsfit0, que calcula as imagens de água nas formas sólida, líquida e vapor; rf10, que produz a conversão da imagem radiância para a imagem reflectância de superfície. O apêndice A fornece os parâmetros que foram utilizados nas correções para efeitos de absorção e espalhamento atmosféricos.

A correção atmosférica foi aplicada para cada uma das sub-cenas e sempre foi tomado o cuidado em avaliar os espectros, de maneira qualitativa, após cada aplicação do método de transferência radiativa. Para isso foram avaliadas principalmente as feições de

absorção provocadas por vapor de água situadas em 940 e 1.140 nm, onde as transmitâncias são mais sensíveis às mudanças na quantidade de vapor d'água (Johnson, et al., 1994; Gao e Goetz, 1990), embora o modelo só avalie a banda de 940 nm para efeitos atmosféricos. Se as profundidades dessas bandas de absorção fossem reduzidas com o processamento, haveria uma indicação que os dados AVIRIS estariam sendo adequadamente corrigidos para os efeitos atmosféricos. Depois disso, as sub-cenas foram mosaicadas utilizando o software ENVI (1997). O mosaico constitui a área de estudo e compreende um retângulo com aproximadamente 11 x 44 km². Após o levantamento dos espectros de reflectância em alguns pontos da área, verificou-se que do total de 224 bandas do AVIRIS somente 142 poderiam ser utilizadas nos processamentos dos dados. A Tabela 3.2 fornece as faixas e os motivos pelos quais 82 bandas foram excluídas. O apêndice B fornece os dados de calibração espectral do sensor AVIRIS para a temporada de 1995.

TABELA 3.2 - BANDAS EXCLUÍDAS APÓS A APLICAÇÃO DO MODELO DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA

BANDAS EXCLUÍDAS¹	FAIXA ESPECTRAL(nm)	FATOR DE EXCLUSÃO
1 a 7	383 a 441	não possui dados
33 a 35	663 a 682	erros de calibração
78 a 85	1.095 a 1.162	ruído associado à estimativa do vapor d'água
95 a 124	1.258 a 1521	forte absorção pelo vapor d'água
148 a 175	1.706 a 2.020	forte absorção pelo vapor d'água
219 a 224	2459 a 2508	presença de ruído

(1)Total de 82 bandas excluídas.

3.3 - CARACTERIZAÇÃO DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DA ÁREA DE ESTUDO ATRAVÉS DE ANÁLISE POR COMPONENTES PRINCIPAIS DOS DADOS AVIRIS

Vários estudos têm utilizado Análise por Componentes Pincipais (ACP) em análise espectral para reduzir a dimensionalidade dos dados e facilitar a interpretação de um número elevado de espectros (Smith et al., 1985; Galvão et al., 1997; Galvão e Vitorello, 1998), e para aplicações envolvendo dados adquiridos por sensores com alta resolução espectral (Lee et al., 1990; Hurcom et al., 1994; Palacios-Orueta e Ustin, 1996; Galvão et al., 1999).

No presente trabalho, a ACP foi usada para analisar as variações espectrais presentes na área de estudo a partir dos dados AVIRIS. A técnica está disponível no ENVI (1997) e é baseada no algoritmo descrito em Richards (1986). Ela tem como principal vantagem maximizar a discriminação espectral dos alvos e reduzir a dimensionalidade dos dados, através da geração de um número menor de componentes principais, em relação ao número de bandas originais, que represente a maior parte do conteúdo original de informação. Quase todas as aplicações envolvendo Componentes Pincipais (CPs) culminam com a obtenção dos denominados *escores*, uma maneira de projetar as observações originais sobre os eixos CPs (Davis, 1973). No presente trabalho, estes *escores* são valores calculados a partir da combinação linear e aditiva entre os fatores de peso de cada autovetor e as bandas originais da imagem reflectância de superfície, e devem ser vistos da seguinte forma (Richards, 1986):

$$\begin{bmatrix} CP_{1,1} \\ CP_{2,1} \\ CP_{3,1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ CP_{224,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{1,1} & e_{1,2} & e_{1,3} & \dots & e_{1,224} \\ e_{2,1} & e_{2,2} & e_{2,3} & \dots & e_{2,224} \\ e_{3,1} & e_{3,2} & e_{3,3} & \dots & e_{3,224} \\ \cdot & & & & \\ e_{224,1} & e_{224,2} & e_{224,3} & \dots & e_{224,224} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{1,1} \\ B_{2,1} \\ B_{3,1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ B_{224,1} \end{bmatrix} : \quad (3.3)$$

onde,

$CP_{1,1}, CP_{2,1}, CP_{3,1}, \dots$ e $CP_{224,1}$ = escores das componentes principais;

$e_{1,1}, e_{1,2}, e_{1,3}, \dots$ e $e_{1,224}$ = fatores de peso associados as bandas $B_{1,1}, B_{2,1}, B_{3,1}, \dots, B_{224,1}$ do primeiro autovetor (E_1);

$e_{2,1}, e_{2,2}, e_{2,3}, \dots$ e $e_{2,224}$ = fatores de peso associados as bandas $B_{1,1}, B_{2,1}, B_{3,1}, \dots, B_{224,1}$ do segundo autovetor (E_2);

$e_{3,1}, e_{3,2}, e_{3,3}, \dots$ e $e_{3,224}$ = fatores de peso associados as bandas $B_{1,1}, B_{2,1}, B_{3,1}, \dots, B_{224,1}$ do terceiro autovetor (E_3);

$e_{224,1}, e_{224,2}, e_{224,3}, \dots$ e $e_{224,224}$ = fatores de peso associados as bandas $B_{1,1}, B_{2,1}, B_{3,1}, \dots, B_{224,1}$ do ducentésimo vigésimo quarto autovetor (E_{224});

$B_{1,1}, B_{2,1}, B_{3,1}, \dots$ e $B_{224,1}$ = bandas dos dados da imagem reflectância de superfície.

A solução da equação 3.3 fornece os valores dos escores $CP_{1,1}, CP_{2,1}, CP_{3,1}, \dots$ e $CP_{224,1}$ para um determinado *pixel*. Considerando que os valores dos fatores de peso de um autovetor são constantes, a variação dos escores ao longo de $CP_{1,1}, CP_{2,1}, CP_{3,1}, \dots$ e $CP_{224,1}$ se darão em função dos diferentes valores de $B_{1,1}, B_{2,1}, B_{3,1}, \dots$ e $B_{224,1}$.

Na presente investigação, os autovetores foram plotados em função do comprimento de onda para avaliar o conteúdo de informação expresso por cada CP, especialmente para as CPs responsáveis pela maior parte da variância dos dados, e para ter uma idéia da contribuição das diferentes bandas espectrais na geração de cada imagem transformada. Com este mesmo propósito, diagramas de espalhamento bidimensionais para as imagens CPs foram obtidos e alvos com resposta espectral contrastante (p. ex., alvos claros e escuros nas imagens CPs) tiveram os seus espectros de reflectância AVIRIS correspondentes recuperados e analisados. Usando essa mesma estratégia, a possibilidade de discriminação das diferentes classes de solo identificadas na área de estudo em cada imagem componente foi discutida.

3.4 - AMOSTRAS DE SOLOS

3.4.1 - SELEÇÃO DOS LOCAIS DE AMOSTRAGEM

Inicialmente, foi gerada uma composição colorida da área de estudo (Figura 3.3) obtida com as bandas 195 (2.220 nm), 137 (1.651 nm) e 50 (826 nm) do AVIRIS em vermelho, verde e azul, respectivamente, a partir da imagem reflectância de superfície. Tal conjunto de bandas equivale aproximadamente aos centros das bandas 7, 5 e 4 do Landsat 5/TM. 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 (platô do infravermelho) em relação às demais bandas. A vegetação com pouca atividade fotossintética ocorre em tonalidades amareladas, enquanto áreas com predomínio de solos são expressas por cores mais avermelhadas. Obviamente, a diferença temporal entre a aquisição dos dados AVIRIS (Agosto de 1995) e as atividades de campo (Agosto de 1997) limitou uma análise mais profunda do comportamento espectral dos alvos na cena.

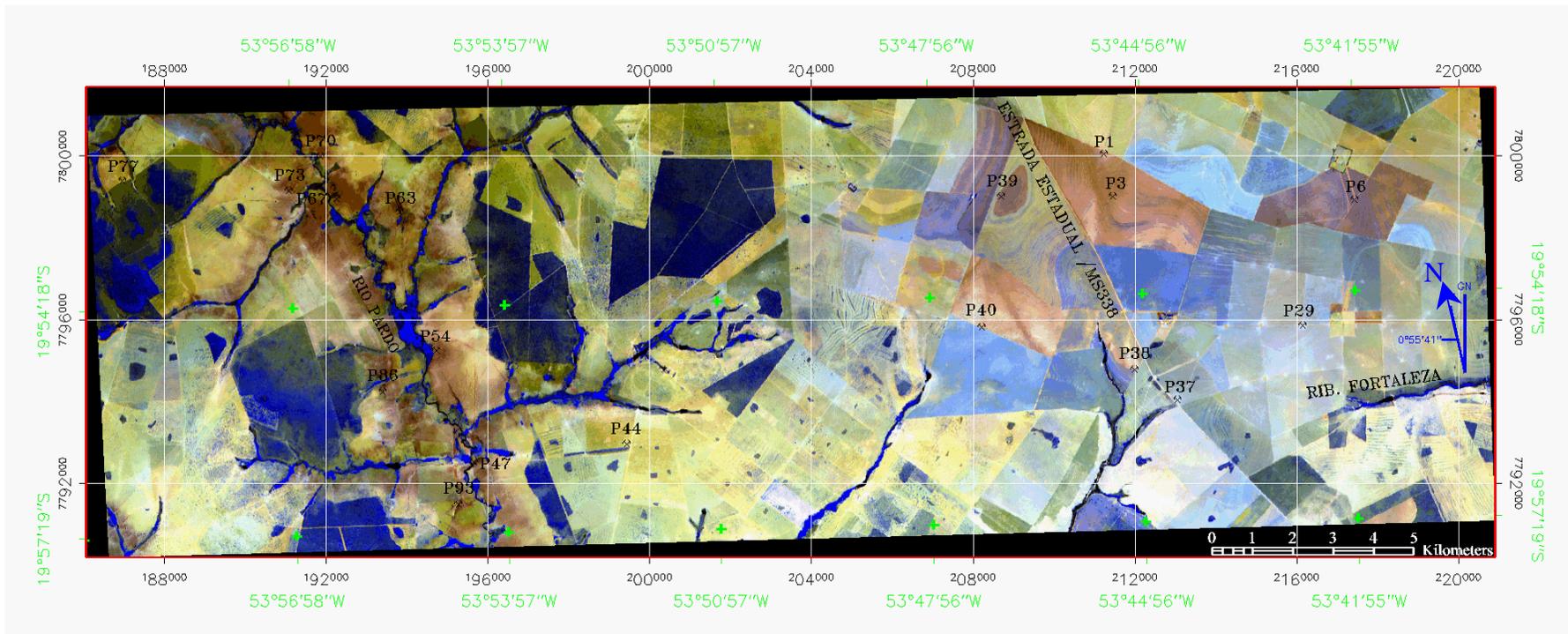


Fig. 3.3 - Composição colorida obtida da imagem reflectância de superfície com as bandas 195 (2.220 nm), 137 (1.651 nm) e 50 (826 nm) do sensor AVIRIS exibidas em vermelho, verde e azul, respectivamente. Os 18 pontos indicados são referentes às amostras submetidas para as análises físico-químico-mineralógicas.

A utilização de uma composição colorida com as bandas 3 (R), 4 (G) e 5 (B) do Landsat 5/TM, abrangendo uma área maior do que a coberta pela imagem AVIRIS, facilitou não apenas a identificação da linha de vôo, no sentido Camapuã a Ribas de Rio Pardo, como também o acesso à área de estudo, principalmente através da estrada estadual/MS 338 em leito natural (cascalho) (Figura 3.3). Outros acessórios, como a carta topográfica na escala de 1:100.000 (FIBGE/SEPLAN/BR, 1978) e o equipamento GPS (Global Positioning System), foram úteis na localização dos talhões a serem visitados, cuja seleção foi feita principalmente com base na composição colorida da imagem AVIRIS (Figura 3.3) e nos mapas mineralógicos gerados pela técnica SFF.

Objetivando obter informações dos talhões pertencentes à linha de vôo, foram coletadas 88 amostras de solo, extraídas da camada superficial (0 a 20 cm da superfície) e de locais distintos. 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 $220 \times 220 \text{ m}^2$ ($11 \times 11 \text{ pixels}$) em cada ponto amostrado, já que a precisão nas medidas pelo GPS é de $\pm 100 \text{ m}$ ($\pm 5 \text{ pixels}$) (Garmin, 1996).

3.4.2 - OBTENÇÃO DOS DADOS DE REFLECTÂNCIA ESPECTRAL EM LABORATÓRIO

As amostras utilizadas foram desterradas e passadas por uma peneira de 2 mm e secas em estufa a $60 \text{ }^\circ\text{C}$, por um período de 48 horas. Isto se fez necessário para padronizar a condição de umidade. Após o preparo, as amostras foram acondicionadas em placas de petri com diâmetro de 9 cm, formando uma camada de terra de 1,5 cm de espessura eliminando, assim, as possíveis interferências do fundo da placa durante a medição da radiância espectral.

O sistema sensor utilizado para medição de radiância em laboratório foi o *Dual Field of View Mark IV Infra-Red Intelligent Spectroradiometer* (IRIS), fabricado pela GER-

Geophysical Environmental Research Corp (GER, 1990). Todas as suas operações, como medições, digitalização, armazenamento dos dados, e monitoramento do nível de sinal, foram realizadas por um microcomputador.

O IRIS cobre a faixa espectral de 300 a 3.000 nm numa varredura contínua, durante a qual dois espectros podem ser adquiridos, um em cada *Field of View* (FOV). A resolução espectral é de 2 nm entre 400 e 1.000 nm e de 4 nm na região entre 1.000 e 3.000 nm. Portanto, a faixa espectral de aquisição e a resolução espectral têm especificações melhores do que as do AVIRIS (10 nm). Desta forma, o equipamento IRIS atende aos requisitos para propiciar uma análise preliminar das relações existentes entre dados de reflectância de solos coletados em laboratório (IRIS) e em aeronave (AVIRIS).

O esquema de obtenção das radiâncias utilizando o espectrorradiômetro IRIS numa configuração de laboratório está ilustrado na Figura 3.4. A cabeça sensora está conectada ao sistema eletrônico de processamento de sinal que, por sua vez, está conectado a um microcomputador no qual está implementado o software "Master" (GER, 1990), que gerencia todas as operações do equipamento. A cabeça sensora foi posicionada verticalmente a cerca de 29 cm de distância da amostra, definindo uma área amostrada retangular de aproximadamente 2,5 cm x 1 cm. A fonte de iluminação, uma lâmpada halógena de iodeto de tungstênio de 600 W de potência, com feixe não colimado para o plano visado, foi posicionada a cerca de 67 cm do alvo e com um ângulo zenital de 17° (Figura 3.4).

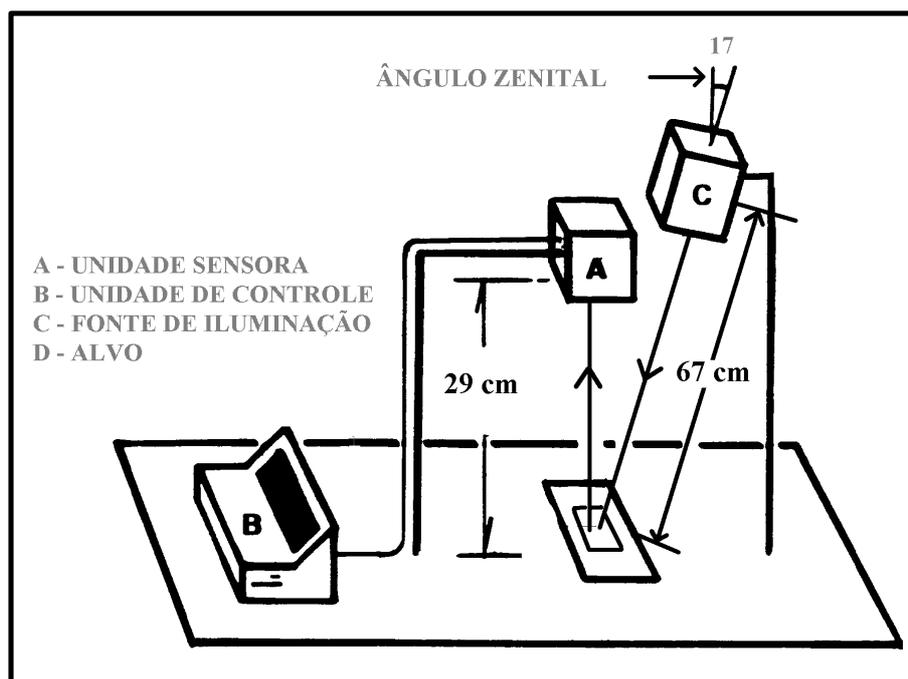


Fig. 3.4 - Configuração do sistema de aquisição de dados espectrais em laboratório.

FONTE: Adaptada de Epiphany et al. (1992, p. 43).

Foi utilizado como padrão de referência absoluta uma placa de spectralon cinza ($\cong 50\%$ de reflectância), calibrada segundo padrão internacional (Labsphere, 1991). Os dados espectrais desta placa foram armazenados pelo computador para subsequente determinação do fator de reflectância dos alvos. Posteriormente, as amostras de solo foram colocadas uma a uma, sob a cabeça sensora, como mostra a geometria da Figura 3.4. Devido ao grande número de amostras foram necessários vários dias de medições, ao longo dos quais as condições do laboratório poderiam ser modificadas. Portanto, para todo início de sessão foram tomadas medidas da placa de spectralon, garantindo que a geometria de aquisição fosse a mesma durante as medidas. A varredura espectral restringiu-se à faixa de 400 a 2.450 nm, evitando a faixa altamente susceptível a ruídos localizada entre 300 e 400 nm.

A razão entre a radiância espectral refletida pela superfície de uma amostra de solo e a radiância espectral refletida pela placa de referência, como mostra a equação 3.4, sob as mesmas condições de iluminação e geometria de aquisição, forneceu o Fator de Reflectância BiDirecional espectral [FRBD(λ)]:

$$FRBD(I) = \frac{L_{solo}(I)}{L_{placa}(I)} \times FCA(I): \quad (3.4)$$

onde,

$L_{solo}(\lambda)$ = radiância espectral do solo;

$L_{placa}(\lambda)$ = radiância espectral da placa *spectralon* $\cong 50\%$;

$FCA(\lambda)$ = Fator de Calibração Absoluta espectral da placa *spectralon* $\cong 50\%$ fornecido pelo fabricante e interpolado para os comprimentos de onda do IRIS. $FCA(\lambda)$ é equivalente ao $k(\lambda)$ da equação 2.1.

λ = comprimento de onda.

Os FRBDs(λ), calculados através da equação 3.4, passaram por filtro objetivando à diminuição dos ruídos nas curvas espectrais para facilitar a interpretação dos espectros.

3.4.3 - ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E MINERALÓGICAS

Para as análises físico-químico-mineralógicas, foram selecionadas 18 amostras que foram enviadas ao laboratório do Departamento de Ciência do Solo/ESALQ/USP. Foram determinados os teores de matéria orgânica, óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de titânio (TiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e de óxido de silício (SiO_2). Na análise física, foram determinados os teores de areia total, silte e argila total. Pela caracterização mineralógica foram determinadas as composições qualitativas dos minerais (difração de raios-x) e as composições quantitativas das frações argila e silte (método térmico diferencial). Os minerais 2:1 foram estimados pela diferença de 100% [Minerais 2:1=

100-(caulinita+gibbsita)] (Demattê, 1995). Nos minerais 2:1 estão incluídos: montmorilonita, vermiculita, micas e material amorfo de sílica e alumina.

A escolha das 18 amostras, de um total de 88 pontos visitados durante o trabalho de campo, foi baseada principalmente na análise dos resultados obtidos para identificação mineral com o uso da técnica SFF e também a partir da análise dos espectros de reflectância AVIRIS. Os espectros foram extraídos da imagem AVIRIS para *pixels* (um a dois no máximo) aproximadamente correspondentes às coordenadas geográficas obtidas pelo GPS ou aos locais de amostragem de campo. Os 18 pontos selecionados na imagem compreenderam espectros de reflectância de solos expostos, ou seja, com feições espectrais bem definidas oriundas de seus constituintes minerais, e sem indicadores claros da presença da banda de absorção de clorofila em torno de 680 nm ou das feições de lignina-celulose em torno de 2.100 e 2.300 nm. Quando detectadas nos espectros de solos, estas feições indicam componentes mistos de solo e resíduos de vegetação verde ou não-fotossinteticamente ativa. De acordo com Elvidge (1988b, 1990), feições de lignina e celulose mais bem reconstituídas quando a vegetação contém pouca água líquida no seu interior. A localização dos 18 pontos na imagem AVIRIS está indicada na Figura 3.3. No apêndice C, estes pontos estão relacionados com os respectivos nomes (alfanumérico) e as posições georreferenciadas em coordenadas planas.

3.5 - RELAÇÕES ENTRE DADOS DE REFLECTÂNCIA DO AVIRIS (AERONAVE) E DO IRIS (LABORATÓRIO), E CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DOS SOLOS

Para estabelecer as relações entre dados espectrais e constituintes dos solos, a análise de correlação foi aplicada com base nos espectros de laboratório (IRIS) e da imagem (AVIRIS) para os 18 pontos previamente selecionados. Primeiro foram analisadas as relações dos constituintes físico-químico dos solos entre si. Depois, foram calculados os

coeficientes de correlação entre as reflectâncias obtidas pelo IRIS e pelo AVIRIS, entre os constituintes físico-químicos e as reflectâncias obtidas pelo IRIS, e entre os constituintes físico-químico e as reflectâncias extraídas da imagem AVIRIS. Diagramas de espalhamento foram gerados para descrever estas relações. Nestas análises foram desprezadas as faixas espectrais que estão indicadas na Tabela 3.2, para ambos os sensores. 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.

Antes da determinação da matriz de correlação, através do *software* de estatística SPSS (1993), os valores de reflectância foram extraídos dos espectros AVIRIS e IRIS em intervalos de 20 nm na faixa espectral 400-2.450 nm, totalizando 72 comprimentos de onda. O apêndice D mostra os valores de comprimentos de onda utilizados nos processamentos estatísticos.

3.5.1 – ANÁLISE ADICIONAL DE DADOS

Adicionalmente foram realizados dois cálculos, que vieram a ajudar na compreensão das mudanças introduzidas no comportamento espectral dos solos, durante a transição do ambiente de laboratório (dados IRIS) para o de aeronave (dados AVIRIS), e consolidar a interpretação dos resultados obtidos pela análise de correlação.

O primeiro cálculo foi baseado no trabalho de Ben-Dor et al. (1997), onde os autores analisam as variações nos espectros causados pelas alterações provenientes da degradação bioquímica da matéria orgânica ao longo do tempo. Segundo estes autores, algumas alterações nos espectros só foram possíveis de serem analisadas após o cálculo da derivada segunda.

No presente trabalho, a derivada segunda foi aplicada sobre todos os 18 espectros dos *pixels*/amostras. A partir das curvas de derivada segunda e em conjunto com os diagramas de espalhamento entre os dados de reflectância AVIRIS x IRIS obtidos para os coeficientes de menor correlação escolhem-se dois pontos mais dispersos em relação ao ajuste da reta. Através deste procedimento, foi possível otimizar a identificação das feições de absorção estreitas e pouco profundas nas curvas espectroscópicas de diferentes procedências, e efetivamente monitorar as feições de absorção introduzidas pelas mudanças no ambiente de aquisição de dados (laboratório (IRIS) versus aeronave (AVIRIS)). Antes de aplicar a derivada segunda, algumas manipulações nos dados espectrais foram feitas. Inicialmente foi necessária a conversão dos dados de reflectância em "absorção aparente" $[A(\lambda)]$ conforme definido por Ben-Dor et al. (1997), através da expressão:

$$A(I) = \log\left[\frac{1}{REFLECTÂNCIA(I)} \right] \quad (3.5)$$

A obtenção da derivada segunda a partir de $A(\lambda)$ foi feita a partir de:

$$A''(I) = \frac{d^2}{dI^2} \left\{ \log\left[1/REFLECTÂNCIA(I)\right] \right\} \quad (3.6)$$

Com as curvas da derivada segunda dos espectros IRIS e AVIRIS plotadas em um mesmo gráfico, foi possível monitorar as diferenças e as posições espectrais das feições de absorção entre os dois ambientes de aquisição de dados. Para este cálculo, os valores de reflectância para cada espectro foram também extraídos em intervalos de 20 nm, aproximadamente, como no item 3.5. Em todos os passos da aplicação deste procedimento foi utilizado o software Microcal Origin (1997).

O segundo cálculo envolveu a obtenção do NDVI a partir dos 18 espectros de solos AVIRIS e IRIS. O objetivo deste cálculo foi diagnosticar as possíveis influências espectrais de resíduos da vegetação nos dados AVIRIS, ou para os *pixels* considerados como solos expostos na imagem reflectância de superfície. Para isso foi tomado como

referência o NDVI obtido a partir dos dados espectrais das amostras de solo em laboratório, desprovidos de resíduos de vegetação. Deste modo, verificou-se o efeito da transição entre as aquisições de dados de laboratório e aeronave. Seguindo procedimento similar ao descrito por Price (1993), que calculou o NDVI a partir de 564 espectros de solos Americanos e Brasileiros publicados por Stoner et al. (1980), a determinação deste índice foi feita no presente trabalho simulando-se os intervalos espectrais correspondentes às bandas do vermelho e do infravermelho próximo do sensor TM/Landsat 5. Desta forma, a equação utilizada para a obtenção do NDVI foi:

$$\text{NDVI} = (\text{REFLEC}_{\text{TM4}} - \text{REFLEC}_{\text{TM3}}) / (\text{REFLEC}_{\text{TM4}} + \text{REFLEC}_{\text{TM3}}) \quad (3.7)$$

onde,

$\text{REFLEC}_{\text{TM3}}$ = média da reflectância obtida para o intervalo 630-690 nm (vermelho);

$\text{REFLEC}_{\text{TM4}}$ = média da reflectância obtida para o intervalo 760-900 nm

(infravermelho próximo);

3.6 – IDENTIFICAÇÃO MINERAL A PARTIR DOS DADOS AVIRIS ATRAVÉS DA TÉCNICA SFF

Para a identificação de um material específico através das características das bandas de absorção (posição do comprimento de onda, profundidade, largura da banda e assimetria do formato da banda), empregou-se a técnica de processamento SFF (Spectral Feature Fitting) (Clark et al., 1990b). Este método baseia-se na comparação da similaridade espectral entre o espectro do alvo não conhecido (AVIRIS) e o(s) espectro(s) de referência. O uso da técnica pressupõe que os dados de reflectância, tanto na imagem quanto no banco de dados de referência (biblioteca espectral), sejam normalizados através da utilização de um *continuum* espectral (Figura 3.5), 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.

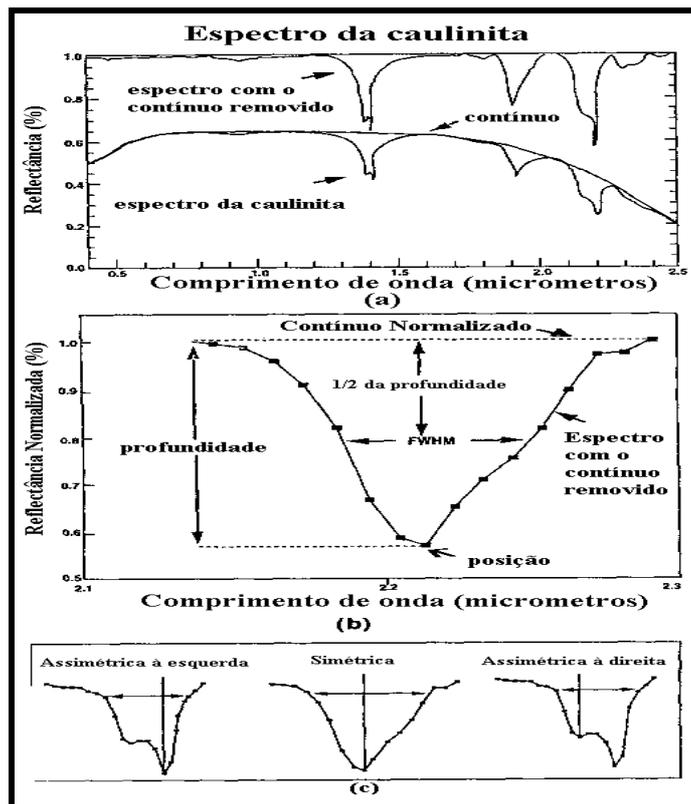


Fig. 3.5 - Ilustração das feições espectrais do mineral caulinita extraídas por técnicas automatizadas. (a) remoção do contínuo; (b) posição, profundidade, largura da banda de absorção; (c) tipos de simetria e assimetria. FWHM é definido como a diferença entre dois valores extremos da variável independente (comprimento de onda, neste caso) e tomada na metade do máximo valor (reflectância normalizada, neste caso).

FONTE: Adaptada de Dwyer et al. (1995, p. 1250).

No presente estudo, a técnica SFF foi aplicada em duas etapas. Na primeira, a imagem foi testada para classificação em relação à presença dos minerais hematita e goetita. O intervalo espectral utilizado para a normalização da imagem através do *continuum* e a classificação propriamente dita foi o de 749-1.100 nm, faixa espectral de domínio dos óxidos de ferro. Na segunda etapa, os minerais caulinita, gibbsita e montmorilonita foram considerados na análise, selecionando-se o intervalo 2.100-2.330 nm, em que normalmente aparecem as bandas de absorção dos argilo-minerais. Em ambas as etapas, os espectros de referência dos minerais citados acima foram extraídos da biblioteca espectral do Jet Propulsion Laboratory (ENVI, 1997). Segundo Resende et al. (1988), estes minerais são os mais representativos dos quatro tipos de solos mais comuns encontrados na área de estudo e descritos no item 3.1.1.4. Os resultados da identificação mineral, através do uso da técnica SFF, foram comparados com as análises mineralógicas feitas nas amostras de solos coletadas em campo.

O resultado final do processo é a obtenção de duas imagens para cada material de referência testado. A primeira é 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, ou seja, áreas de maior similaridade espectral. A segunda 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, em que áreas com *pixels* claros indicam razões com valores altos e representam uma maior probabilidade destes *pixels* conterem o material testado para classificação.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - CARACTERÍSTICAS DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DA ÁREA DE ESTUDO ATRAVÉS DA ANÁLISE POR COMPONENTES PRINCIPAIS

A Figura 4.1 mostra os fatores de peso para os três primeiros autovetores (E_1 , E_2 e E_3) obtidos a partir das 142 bandas selecionadas na imagem reflectância de superfície, conforme descrito no item 3.2, em função do comprimento de onda.

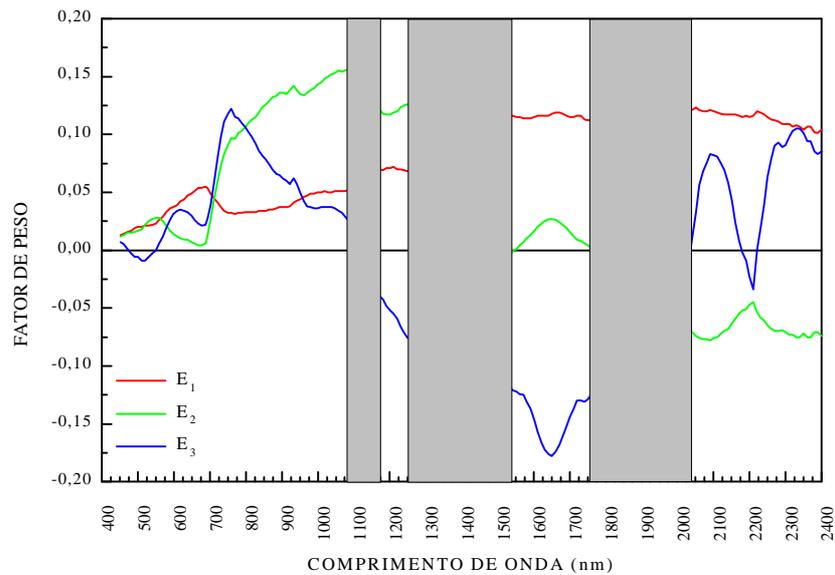


Fig. 4.1 – Fatores de peso associados aos três primeiros autovetores (E_1 , E_2 e E_3) relativos às três primeiras Componentes Principais. Eles foram obtidos a partir de 142 bandas selecionadas na imagem reflectância de superfície. As faixas hachuradas indicam intervalos espectrais de forte absorção atmosférica, especialmente em torno de 1400 e 1900 nm, que não foram utilizados na presente análise.

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). A primeira Componente Principal (CP₁), que descreve a maior parte da variabilidade dos dados, pode ser interpretada como uma medida da variação de albedo. Entretanto, para CP₂ e CP₃, há uma mistura de valores positivos e negativos, causada pelas diferenças espectrais entre as bandas para cada tipo de alvo. Essas diferenças, por sua vez, são funções das propriedades da vegetação e do solo, bem como da combinação entre eles, como será visto mais adiante. Como pode ser observado na Figura 4.2, a CP₁ responde por 83,78% da variância total dos dados, enquanto CP₂ e CP₃ são responsáveis, respectivamente, por 13,10% e 1,92% dessa variância. O termo albedo será utilizado no presente trabalho para expressar a reflectância média no intervalo de 400 e 2.450 nm.

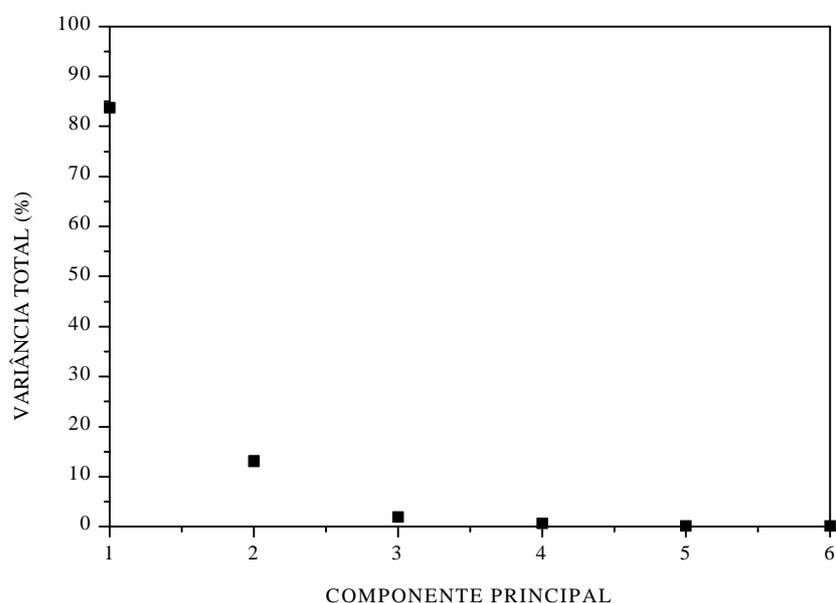


Fig. 4.2 – Porcentagem da variância total em função das Componentes Principais.

4.1.1 - ANÁLISE DA PRIMEIRA COMPONENTE PRINCIPAL

A Figura 4.3 ilustra a imagem que representa os dados da CP_1 , ou seja, que é formada pela combinação aditiva e linear entre as bandas originais (142 bandas) e os fatores de peso do autovetor E_1 . Na Figura 4.1, o autovetor E_1 apresenta um incremento gradual para os fatores de peso ao longo da faixa de 400 a 2.400 nm, onde se observa um acentuamento no gradiente de 600 a 700 nm e outro mais acentuado entre 1.076 e 1.541 nm. Os fatores de peso positivos expressam uma relação direta entre a reflectância de superfície e os *escores* CP_1 , onde os valores tendem a ser mais altos na direção do IVM, indicando uma relação de covariância positiva entre as 142 bandas utilizadas. Em outras palavras, a imagem apresentada na Figura 4.3 pode ser interpretada como uma medida da variação de albedo, como é ilustrado pelos espectros das áreas A, B e C, mostrados na Figura 4.4, extraídos dos dados originais, com o posicionamento indicado na imagem CP_1 (Figura 4.3). O albedo aumenta do espectro C (*pixels* escuros na Figura 4.3) para o A (*pixels* claros na Figura 4.3). A curva C representa um típico alvo de vegetação verde (vegetação fotossinteticamente ativa), enquanto que a curva B é de um alvo dominado por solo exposto. Finalmente, o espectro da área A é de um alvo com vegetação não-fotossinteticamente ativa, em função da ausência do pico de reflectância na faixa espectral do verde, ao redor de 550 nm, e da presença das feições de lignina-celulose em torno de 2.100 e 2.300 nm.

Em geral, na imagem CP_1 , o que aparece em *pixels* claros são áreas dominadas por vegetação não-fotossinteticamente ativa e solos expostos, e mistura de ambos. As áreas com *pixels* com nível de cinza intermediários são dominadas por solos expostos e vegetação fotossinteticamente ativa com diferentes estágios de desenvolvimento (por exemplo, plantações de capim braquiária). Finalmente, as áreas com *pixels* escuros são provenientes de vegetação verde (áreas de floresta ribeirinha, de campo cerrado e cerrado).



Fig. 4.3 - Imagem da primeira componente principal (CP_1), obtida a partir de 142 bandas do AVIRIS. Os espectros extraídos da imagem reflectância de superfície para os *pixels* indicados pelas letras A, B e C são mostrados na Figura 4.4. Os pontos indicados por PV, LE e LR são os locais mais representativos das classes de solo Podzólico Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-Escuro e Latossolo Roxo, respectivamente, encontradas na linha de voo. Os respectivos espectros destes três locais estão ilustrados na Figura 4.12.

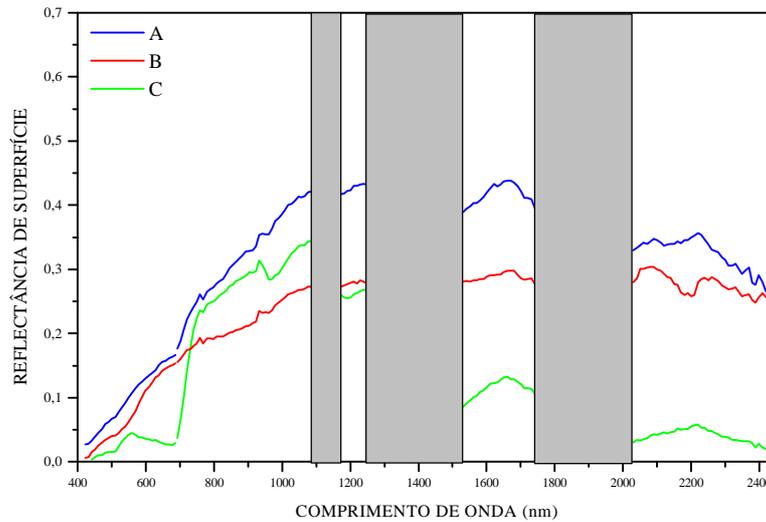


Fig. 4.4 – Espectros de reflectância extraídos da imagem AVIRIS mostrando o crescimento do albedo, de *pixels* escuros (espectro C) a *pixels* claros (espectro A), ao longo da imagem CP₁ (Figura 4.3). As faixas hachuradas indicam intervalos de absorção atmosférica não utilizados na presente análise.

4.1.2 - ANÁLISE DA SEGUNDA COMPONENTE PRINCIPAL

Como pode ser observado pela Figura 4.1, a variação dos fatores de peso de E_2 em função do comprimento de onda tem relação próxima com a variação espectral da vegetação. Observe que a curva do autovetor E_2 expressa feições da vegetação como o pico da reflectância do verde e a banda de absorção no vermelho, respectivamente ao redor de 550 nm e 677 nm, o platô do IVP, e a banda de absorção em 960 nm devido ao conteúdo de água das folhas. Na verdade, a imagem CP₂ mostrada na Figura 4.5 expressa um efeito de inversão espectral, ou seja, uma relação negativa de covariância entre os dados do VS até o começo do IVP (fatores de peso positivos para E_2) e o final do IVM (fatores de peso negativos para E_2).



Fig. 4.5 - Imagem da segunda componente principal (CP_2), obtida a partir de 142 bandas do AVIRIS. Os espectros extraídos da imagem AVIRIS para os *pixels* indicados pelas letras C e D são mostrados nas Figuras 4.7.

Com base nos fatores de peso do autovetor E_2 na Figura 4.1, é possível verificar qual banda ou intervalo espectral que mais contribui para explicar CP_2 . Por exemplo, a maior contribuição positiva do fator de peso E_2 se dá em torno de 1.080 nm, enquanto a maior contribuição negativa ocorre em torno de 2.091 nm.

A Figura 4.6 ilustra o diagrama de espalhamento entre os escores CP_2 e CP_1 . Este diagrama pode ser usado para investigar a localização nas imagens CP_1 ou CP_2 , e por consequência na imagem reflectância de superfície através dos espectros AVIRIS correspondentes, dos *pixels* puros e dos contaminados pelos vários tipos de alvos. Na Figura 4.6, os alvos correspondentes à Vegetação verde (Vv) possuem altos escores CP_2 (*pixels* claros na Figura 4.5), enquanto que os alvos relacionados com Solo Exposto (SExp) e Vegetação não-fotossinteticamente ativa (Vnfa) possuem baixos valores CP_2 (*pixels* escuros). Observe que os alvos indicados pelas setas no diagrama de espalhamento possuem valores CP_1 aproximadamente iguais, ou seja, mesmo albedo.

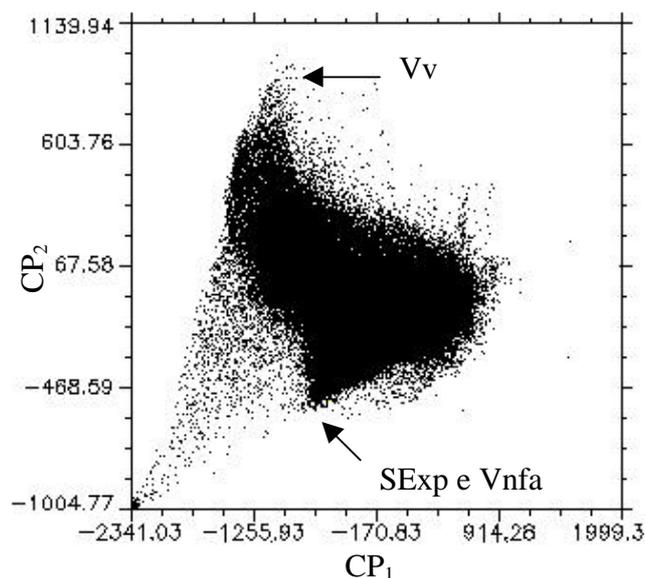


Fig. 4.6 - Diagrama de espalhamento dos escores CP_2 e CP_1 . Vv = Vegetação verde; Vnfa = Vegetação não-fotossinteticamente ativa; e SExp = Solo Exposto.

Para melhor compreender o significado da imagem CP₂, foram selecionados alvos que possuem *escores* CP₁ parecidos (pixels claros na imagem da Figura 4.3), mas *escores* CP₂ distintos (pixels claros e escuros na imagem da Figura 4.5). Os alvos C e D, indicados na imagem CP₂ da Figura 4.5, são compostos, respectivamente, por vegetação verde da floresta ribeirinha e por vegetação não-fotossinteticamente ativa (vegetação seca) do capim braquiária ou brizanta. Suas curvas de reflectância estão plotadas na Figura 4.7, onde se observa o efeito de inversão espectral anteriormente mencionado. Em outras palavras, em relação ao espectro D, a curva de reflectância do alvo C (vegetação verde) apresenta maiores valores de reflectância no início do infravermelho (750-1.100 nm), e menores valores no restante desta faixa espectral, especialmente em torno de 2200 nm.

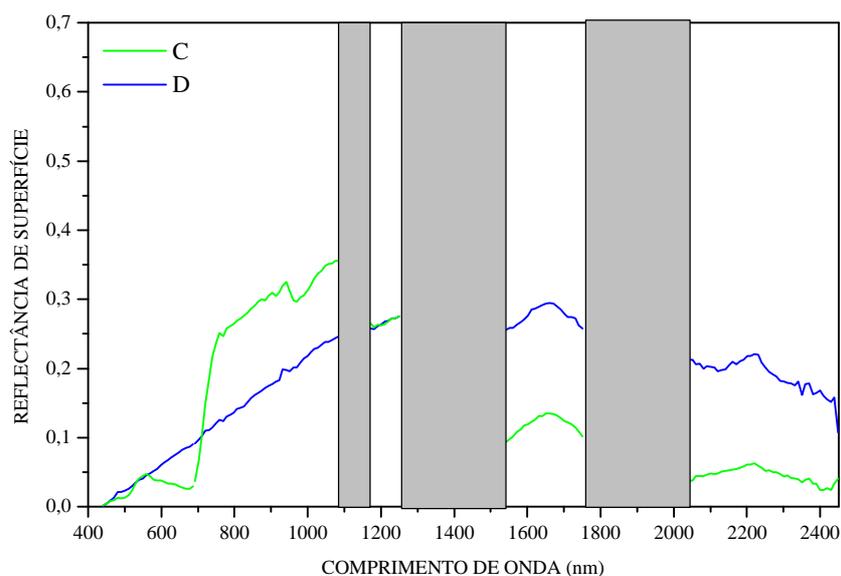


Fig. 4.7 - Espectros da imagem AVIRIS de alvos com o mesmo albedo (*escores* CP₁ parecidos), mas com diferentes respostas na imagem CP₂ (*pixels* claros e escuros). Os alvos C e D estão indicados na Figura 4.5. As faixas hachuradas indicam intervalos de absorção atmosférica não utilizados na presente análise.

Desta forma, a imagem CP_2 possibilita a separação de áreas de vegetação verde da mata de galeria, da floresta ribeirinha ou de culturas emergentes (*pixels* claros na Figura 4.5) das áreas dominadas por solo exposto ou vegetação não-fotossinteticamente ativa (vegetação seca) (*pixels* escuros na Figura 4.5). Observe que não é fácil discriminar estes dois últimos alvos na imagem CP_2 , pois os valores dos seus escores são similares (pouco contraste) (Figura 4.6).

4.1.3 - ANÁLISE DA TERCEIRA COMPONENTE PRINCIPAL

Com relação ao autovetor E_3 , associado à CP_3 , nota-se que este é bem mais complexo do que o E_1 e o E_2 . Na Figura 4.1, as formas das curvas E_2 e E_3 são aproximadamente similares na faixa do visível, mas se diferenciam bastante em torno de 1.650 nm e de 2.200 nm, onde E_3 parece reconstituir a banda de absorção dos minerais argilosos que aparece nos espectros de solos expostos.

A Figura 4.8 mostra a imagem CP_3 da área de estudo, enquanto a Figura 4.9 ilustra o diagrama de espalhamento entre os escores CP_3 e CP_1 . Neste diagrama, os alvos correspondentes à V_v e SE_{Exp} possuem valores CP_3 muito mais altos do que os alvos relacionados com V_{nfa} , que situam-se na outra extremidade do eixo CP_3 do gráfico. Assim, para se ter uma melhor compreensão da imagem CP_3 mostrada na Figura 4.8, a Figura 4.10 mostra um par de espectros para áreas com *pixels* escuros (alvo E) e claros (alvo F) e, conseqüentemente, com *escores* distintos em CP_3 , mas com valores similares de CP_1 (mesmo albedo). Os alvos E e F, indicados na imagem da Figura 4.8, são compostos, respectivamente, por vegetação não-fotossinteticamente ativa (vegetação seca) do capim braquiária ou brizanta e por solo exposto. Em relação ao espectro E, a curva de reflectância do alvo F (solo exposto) apresenta maiores valores de reflectância no VS e início do IVP (700-850 nm), menores valores entre 850 e 2.200 nm, e novamente maiores valores acima de 2.300 nm.



Fig. 4.8 - Imagem da terceira componente principal (CP_3), obtida a partir de 142 bandas do AVIRIS. Os espectros extraídos da imagem AVIRIS para os *pixels* indicados pelas letras E e F são mostrados na Figura 4.10.

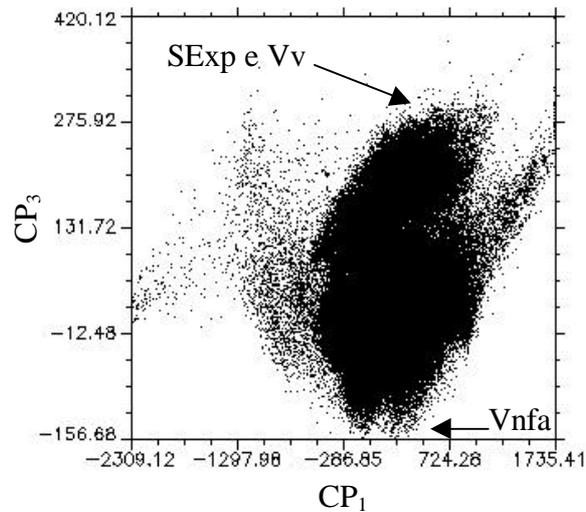


Fig. 4.9 - Diagrama de espalhamento dos escores CP_3 e CP_1 . Vv = Vegetação verde; Vnfa = Vegetação não-fotossinteticamente ativa; e SExp = Solo Exposto.

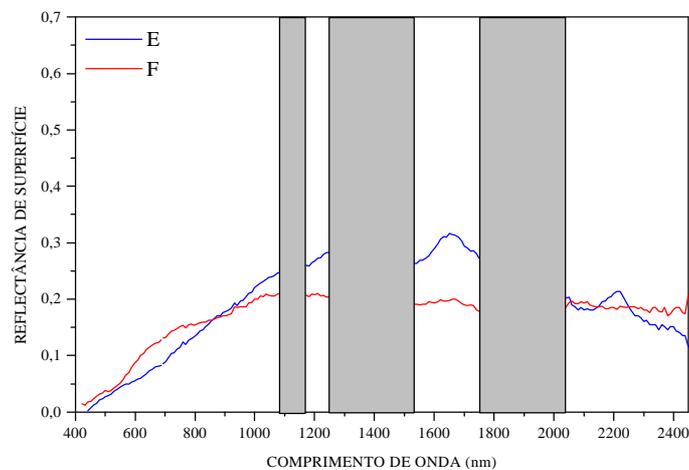


Fig. 4.10 - Espectros de reflectância AVIRIS de alvos com o mesmo albedo (escores CP_1 similares), mas com diferentes respostas (*pixels* claros e escuros) na imagem CP_3 . Os alvos estão identificados pelas letras E e F na Figura 4.8. As faixas hachuradas indicam intervalos de absorção atmosférica não utilizados na presente análise.

De uma maneira geral, a imagem CP₃ diferencia vegetação verde (vegetação fotossinteticamente ativa) e solo exposto (*pixels* claros) de vegetação não-fotossinteticamente ativa (*pixels* escuros). Entretanto, nessa imagem, não é possível separar solo exposto de vegetação verde, pois ambos os alvos aparecem com *pixels* claros ou escores CP₃ parecidos.

A Figura 4.11 ilustra a composição colorida das imagens CP₁, CP₂ e CP₃, exibidas em azul, vermelho e verde, respectivamente. Nesta figura, também estão indicados alguns locais representativos da ocorrência dos principais componentes da cena. Em geral, as áreas de vegetação rica em clorofila (Fr) ou Vv, como as de floresta ribeirinha situadas ao longo da drenagem, aparecem em amarelo devido aos valores altos dos escores CP₂ e CP₃ e baixos dos escores CP₁. As áreas em verde são dominadas praticamente por solo exposto devido aos altos valores do escore CP₃. Na cor expressa pelo tom azulado prevalece a Vseca ou Vnfa especialmente por capim braquiária e brizanta secos e eucalipto, devido aos valores altos do escore CP₁. Áreas com formações variando de campo cerrado até cerradão (vegetação de menor atividade fotossintética em relação à floresta ribeirinha) incluem cores alaranjadas e amareladas ou amarelo-esverdeadas. A vegetação com pouca atividade fotossintética, devido à ausência de chuvas para a época em que foram obtidos os dados AVIRIS, tende a aparecer em magenta. Algumas áreas que estão na cor ciano são formações variando de cerradinho com pasto sujo e um pouco de solo exposto (vegetação com pouca atividade fotossintética mais solo exposto). Áreas em branco, onde ocorre altos valores dos escores CP₁, CP₂ e CP₃, são compostas por uma mistura de Vseca e SExp.

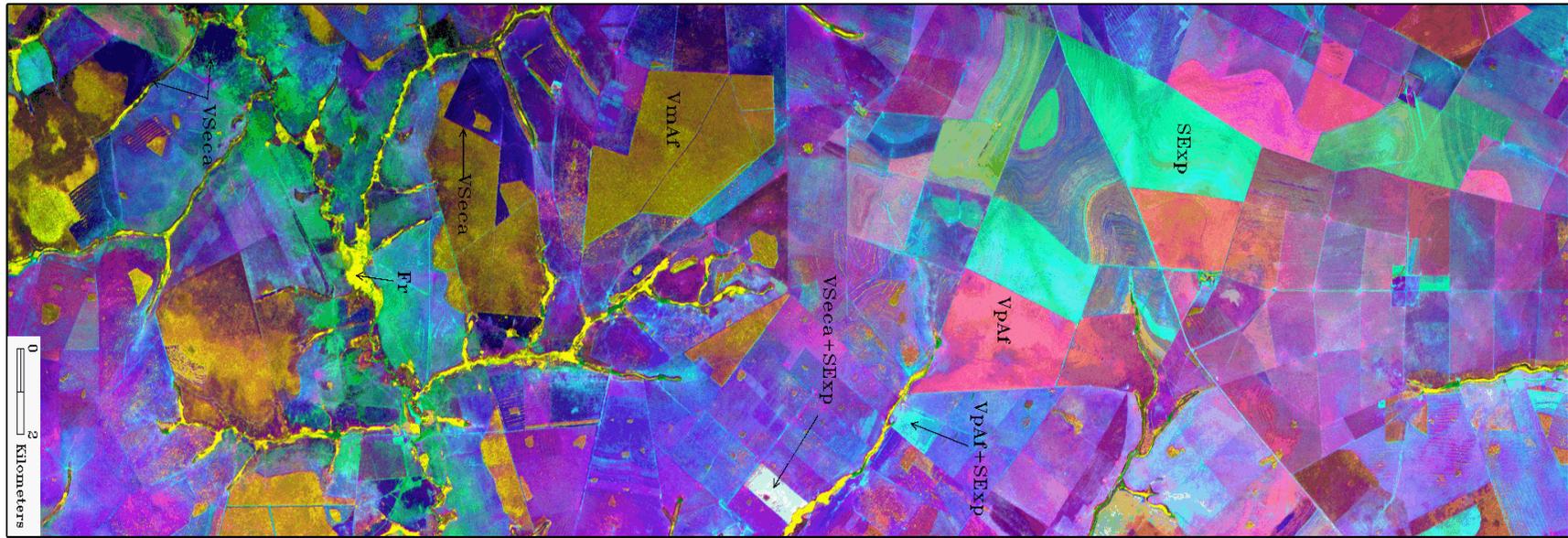


Fig. 4.11 - Composição colorida das três primeiras componentes principais representadas em azul (CP_1), vermelho (CP_2) e verde (CP_3). Fr = Floresta ribeirinha (veg. fotos. ativa); SExp = Solo Exposto; VSeca = Vegetação Seca (veg. não-fotos. ativa); VmAf = Vegetação com menor Atividade fotossintética; VpAf = Vegetação com pouca Atividade fotossintética; VpAf + SExp = Vegetação com pouca Atividade fotossintética mais Solo Exposto; VSeca + SExp = Vegetação seca + Solo Exposto. A nomenclatura é discutida no texto.

4.1.4 - DIFERENCIAÇÃO DOS SOLOS ATRAVÉS DAS COMPONENTES PRINCIPAIS

A Tabela 4.1 mostra a relação entre as 18 amostras selecionadas para análises físico-químicas e as classes de solo identificadas durante as atividades de campo. O posicionamento destas amostras na imagem AVIRIS foi indicada na composição colorida da Figura 3.3. As classes de solo identificadas foram: Podzólico Vermelho-Amarelo (PV); Latossolo Vermelho-Escuro álico (LE) e Latossolo Roxo (LR).

TABELA 4.1 – CLASSES DE SOLO IDENTIFICADAS PARA O SUBCONJUNTO DE 18 AMOSTRAS SELECIONADO PARA ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SOLOS	NÚMERO DE AMOSTRAS	CLASSE DE SOLO
P37; P38; P44	3	PV
P1; P3; P6; P29; P39; P40; P77	7	LE
P47; P54; P63; P67; P70; P73; P86; P93	8	LR

Espectros de reflectância AVIRIS das amostras mais representativas destas classes de solo são mostrados na Figura 4.12, referentes aos pontos P37 (PV), P3 (LE) e P93 (LR), que compreendem áreas de solos realmente expostos na imagem, ou seja, de *pixels* mais puros ou menos contaminados por resíduos de Vv ou Vnfa. A Tabela 4.2 apresenta os resultados das análises químicas para as amostras coletadas nos referidos pontos.

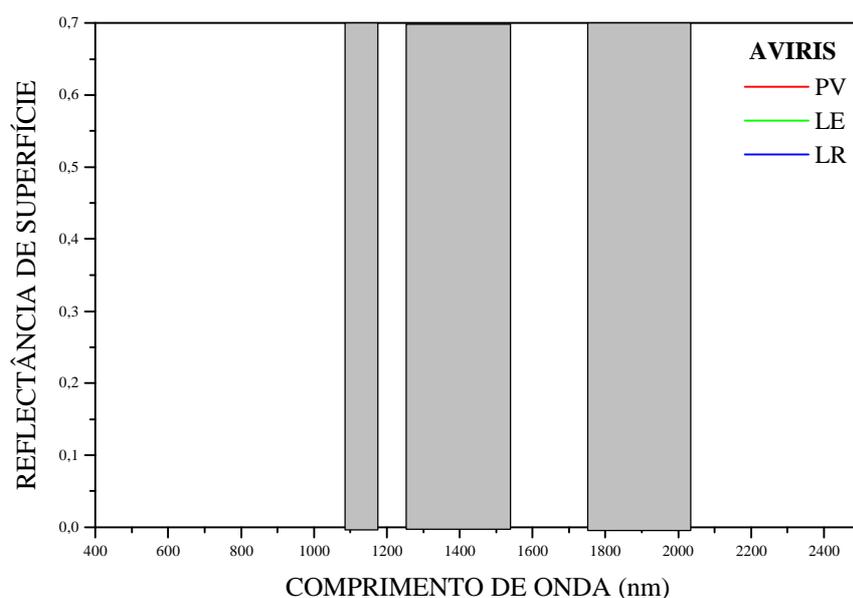


Fig. 4.12 – Espectros de reflectância AVIRIS para pixels representativos de Podzólico Vermelho-Amarelo (PV), Latossolo Vermelho-Escuro (LE) e Latossolo Roxo (LR). As curvas correspondem aos pontos P37 (PV), P3 (LE) e P93 (LR) indicados nas Figuras 3.3 e 4.3. As faixas hachuradas indicam intervalos de absorção atmosférica não utilizados na análise por componentes principais.

TABELA 4.2 - RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS PARA AMOSTRAS REPRESENTATIVAS DOS SOLOS ESTUDADOS

SOLO/IDENTIFICAÇÃO NA IMAGEM	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃¹ (%)	TiO₂ (%)	M.O.² g/kg
PV (P37)	4,2	1,94	0,45	0,37	7
LE (P3)	9,9	7,80	3,79	0,90	3
LR (P93)	16,6	14,53	24,97	2,19	22

Obs.: (1) conteúdo de ferro total e (2) matéria orgânica.

Na imagem CP₁ da Figura 4.3 também está indicado o posicionamento destas três amostras representativas das classes de solos mencionadas. Observe na imagem CP₁ que os *pixels* passam de claros a escuros, refletindo as variações de albedo dos solos. Tais variações também podem ser visualizadas na Figura 4.12, onde o espectro de LR apresenta menores valores de reflectância ao longo da faixa 400-2.500 nm do que o espectro de PV, que tem, portanto, maior albedo. Desta forma, é possível discriminar em CP₁ as três classes de solos (PV, LE e LR).

Para dar uma melhor visão das variações espectrais destas classes de solo (ou de suas amostras representativas) ao longo das três componentes, as Figuras 4.13 a e b ilustram os diagramas de espalhamento da relação entre os escores CP₂ e CP₁ e entre CP₃ e CP₁, respectivamente. Estes diagramas foram obtidos para porções diferentes da imagem da área de estudo, o que explica as variações de valores ao longo do eixo CP₁. O albedo, compreendendo o eixo CP₁ nestas figuras, aumenta da esquerda para a direita, ou seja, do Latossolo Roxo (LR) para o Podzólico Vermelho-Amarelo (PV). No que se refere aos eixos CP₂ e CP₃, pode-se dizer que estão relacionadas com as modificações nas formas das curvas espectrais, ou seja, são eixos representativos das variações de declividade das curvas. As variabilidades espectrais dos dados associadas aos três eixos podem ser explicadas pela composição química das três classes de solos identificadas (Tabela 4.2). Assim, LR e LE possuem menor albedo do que PV por apresentarem uma maior quantidade de substâncias opacas ou minerais fortemente absorvedores de radiação (p. ex., matéria orgânica e magnetita) na sua composição. Solos mais claros (p. ex., PV), normalmente mais pobres em substâncias opacas, tendem a ser mais sensíveis aos efeitos espectrais resultantes das variações relativas de matéria orgânica e argila, que podem provocar mudanças significativas na forma dos espectros, conforme destacaram Galvão et al. (1997). Isto pode explicar a melhor separabilidade de PV, em relação a LR e LE, ao longo dos eixos CP₂ e CP₃ das Figuras 4.13a e 4.13b.

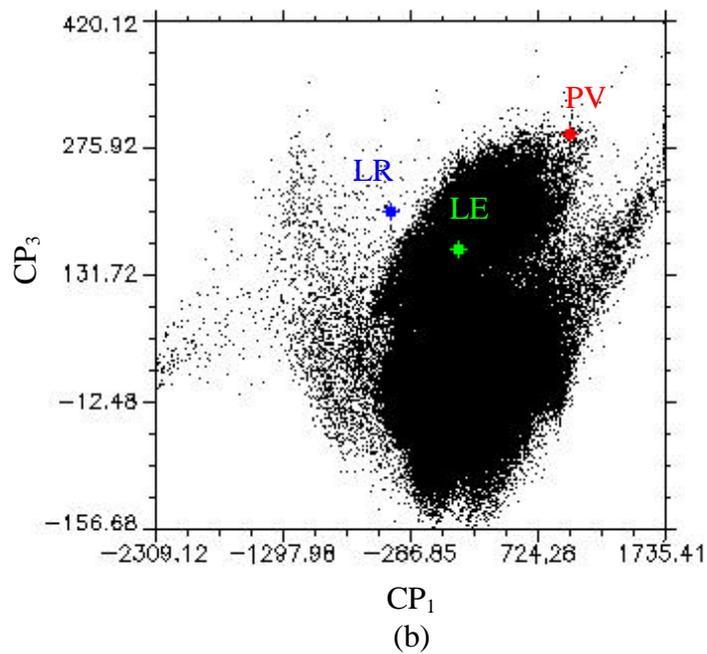
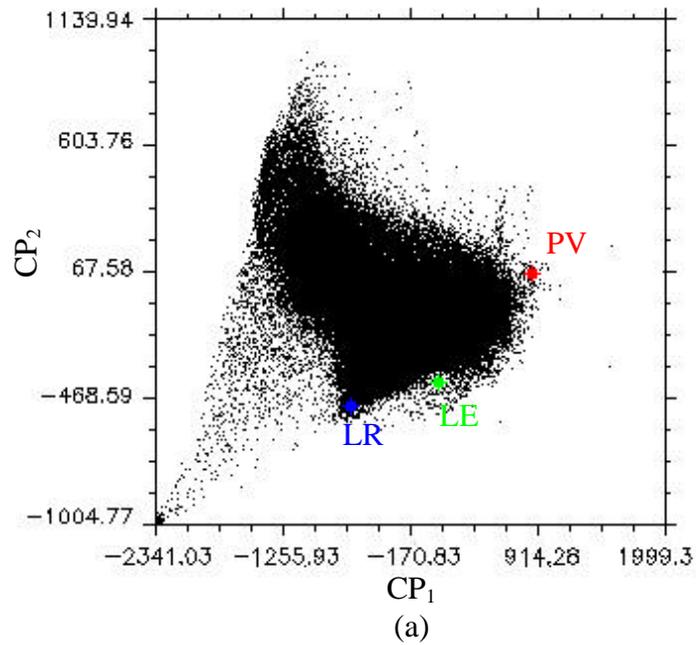


Fig. 4.13 - Diagrama de espalhamento das relações entre os escores CP_2 e CP_1 (a), e entre CP_3 e CP_1 (b). As posições das amostras representativas das classes Latossolo Roxo (LR), Latossolo Vermelho-Escuro (LE) e Podzólico-Vermelho-Amarelo (PV) estão indicadas nos diagramas. Os diagramas foram obtidos para porções diferentes da imagem da área de estudo.

4.2 - CORRELAÇÕES ENTRE CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS E DADOS ESPECTRAIS DE AERONAVE (AVIRIS) E DE LABORATÓRIO (IRIS)

4.2.1 - RELAÇÕES ENTRE CONSTITUINTES FÍSICO-QUÍMICOS

É conveniente analisar as relações dos constituintes físico-químicos dos solos entre si antes de verificar sua influência sobre a resposta espectral das amostras estudadas. De uma maneira geral, os solos argilosos são mais ricos em Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Matéria Orgânica (M.O.) e TiO_2 que os solos arenosos. A Tabela 4.3 exibe a matriz de correlação entre os constituintes físico-químicos das 18 amostras de solos sob análise (Apêndice E). À medida que aumenta o conteúdo de areia total das amostras, diminuem os teores de argila total, TiO_2 , Silte, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , M.O. e SiO_2 . As melhores relações lineares foram obtidas entre areia total e argila total ($r = -0,9954$), areia total e TiO_2 ($r = -0,9016$), areia total e Silte ($r = -0,8726$) e areia total e Al_2O_3 ($r = -0,8647$). Entre as correlações positivas, pode-se destacar a relação entre TiO_2 e Fe_2O_3 ($r = 0,9511$), TiO_2 e Silte ($r = 0,9161$), TiO_2 e Al_2O_3 ($r = 0,8929$), TiO_2 e argila total ($r = 0,8721$) e Fe_2O_3 e Al_2O_3 ($r = 0,8724$).

TABELA 4.3 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA OS CONSTITUINTES FÍSICO-QUÍMICOS DE 18 AMOSTRAS DE SOLOS

	% Al_2O_3	% ARGILA	% Fe_2O_3	% SILTE	% SiO_2	% TiO_2	% AREIA TOTAL
% ARGILA TOTAL	0,8564						
% Fe_2O_3	0,8724	0,8072					
% SILTE	0,7764	0,8218	0,8636				
% SiO_2	0,8394	0,5203	0,7959	0,7139			
% TiO_2	0,8929	0,8721	0,9511	0,9161	0,7849		
% AREIA TOTAL	-0,8647	-0,9954	-0,8371	-0,8726	-0,566	-0,9016	
M.O. (g/kg)	0,4954	0,5573	0,6142	0,6044	0,5054	0,7122	-0,5793

Todos os coeficientes de correlação são significativos a 5%.

Os gráficos a, b, c e d da Figura 4.14 exemplificam algumas destas correlações. As funções que melhor explicam a maior parte das covariações dos dados não são lineares, mostrando que nem sempre o ajuste linear é o melhor. Por exemplo, a Figura 4.14d mostra a correlação positiva, $r=0,573$ com ajuste não linear, entre os teores de argila total e M.O., ou seja, a um aumento da M.O. corresponde um aumento do teor de argila total.

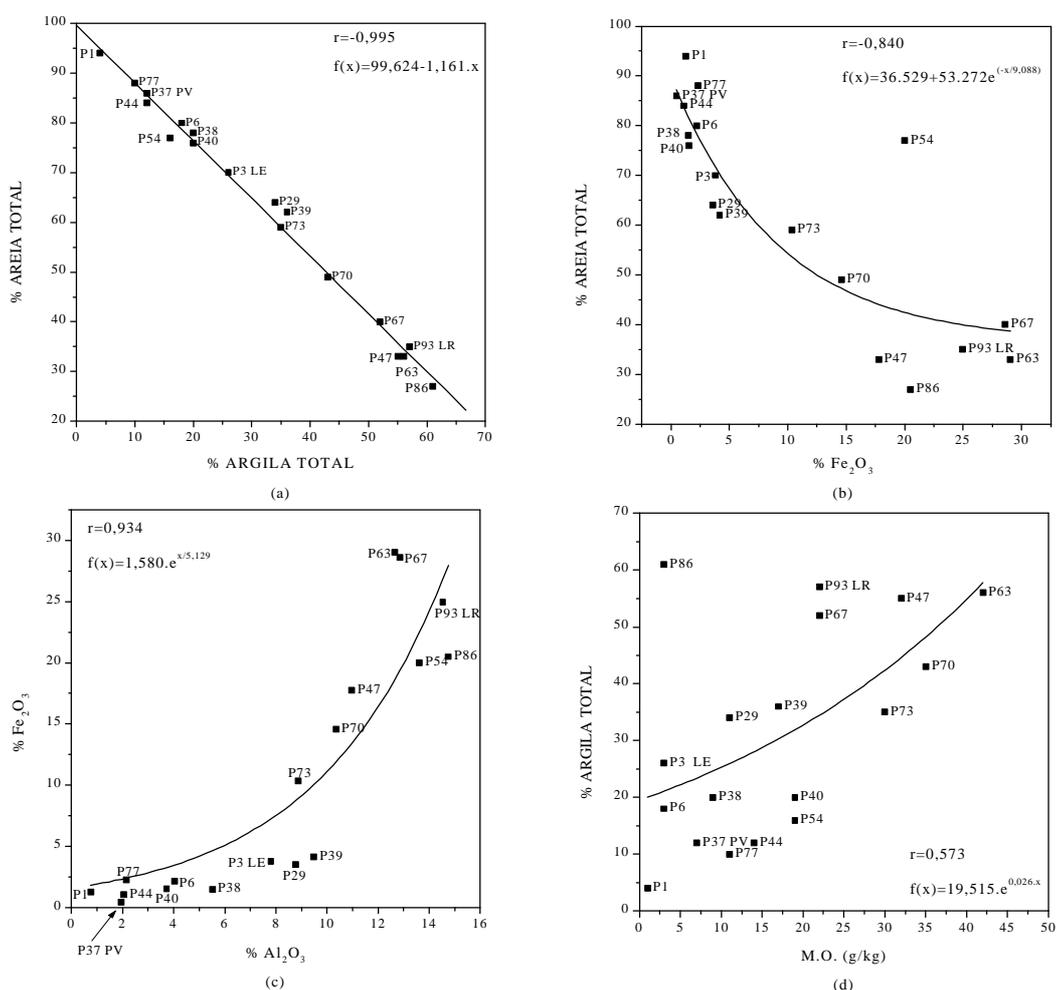


Fig. 4.14 – Diagramas de espalhamento para as relações areia total versus argila total em (a), areia total versus Fe_2O_3 em (b), Fe_2O_3 versus Al_2O_3 em (c), e argila total versus M.O. em (d). Os diagramas foram obtidos a partir de 18 amostras.

A alta correlação negativa entre areia total e os demais constituintes químicos e físicos mostra que quanto maior a quantidade da fração de areia, menor tende a ser o conteúdo dos constituintes TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , M.O., SiO_2 , fração de silte e, especialmente, fração de argila total, que apresentou o melhor resultado ($r = -0,99$). Estes resultados eram esperados, uma vez que as amostras variam de arenosas (mais ricos em areia total) para mais argilosas (mais pobres em areia total e mais ricos em TiO_2 , Silte, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , M.O. e SiO_2).

4.2.2 - RELAÇÕES ENTRE AS REFLECTÂNCIAS OBTIDAS PELOS SENSORES IRIS E AVIRIS

4.2.2.1 - COMPARAÇÃO ENTRE OS ESPECTROS DE REFLECTÂNCIA PARA AS TRÊS CLASSES DE SOLO

A Figura 4.15 possibilita a comparação entre os espectros de reflectância obtidos em laboratório com o espectrorradiômetro IRIS e os extraídos da imagem AVIRIS. Há uma similaridade no formato das curvas no VS e IVP. O mesmo não ocorre no IVM, onde os espectros IRIS (Fig. 4.15b) são ascendentes até 2.000 nm à medida em que o albedo das amostras aumenta, ocorrendo o contrário com os espectros AVIRIS (Fig. 4.15a).

Em termos de bandas de absorção, as feições decorrentes de processos de transições eletrônicas envolvendo Fe^{+3} e Fe^{+2} em 850 nm (Hunt, 1977) e de processos vibracionais envolvendo OH (Hunt e Salisbury, 1976a) em 2.200 nm são visíveis nos dois conjuntos de dados, embora com uma melhor definição no contexto de laboratório. Os espectros de laboratório são caracterizados também por distintas bandas de absorção em 1.400, 1.900 e 2.200 nm, devido às vibrações das hidroxilas OH da rede cristalina do mineral presente na amostra de solo. Nos espectros do AVIRIS não é possível observar feições de absorção em 1.400 e 1.900 nm por causa da forte absorção provocada pelo vapor de água presente na atmosfera. Em 2.200 nm nota-se que há certa coerência entre os dois

sensores em relação à profundidade da banda de absorção para as diferentes classes de solos. Embora o latossolo roxo contenha 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 2.200 nm (Vitorello et al., 1995). É por isso que este solo apresenta poucas feições de absorção no IVM. 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 pouca quantidade de matéria orgânica (Krishnan et al., 1980).

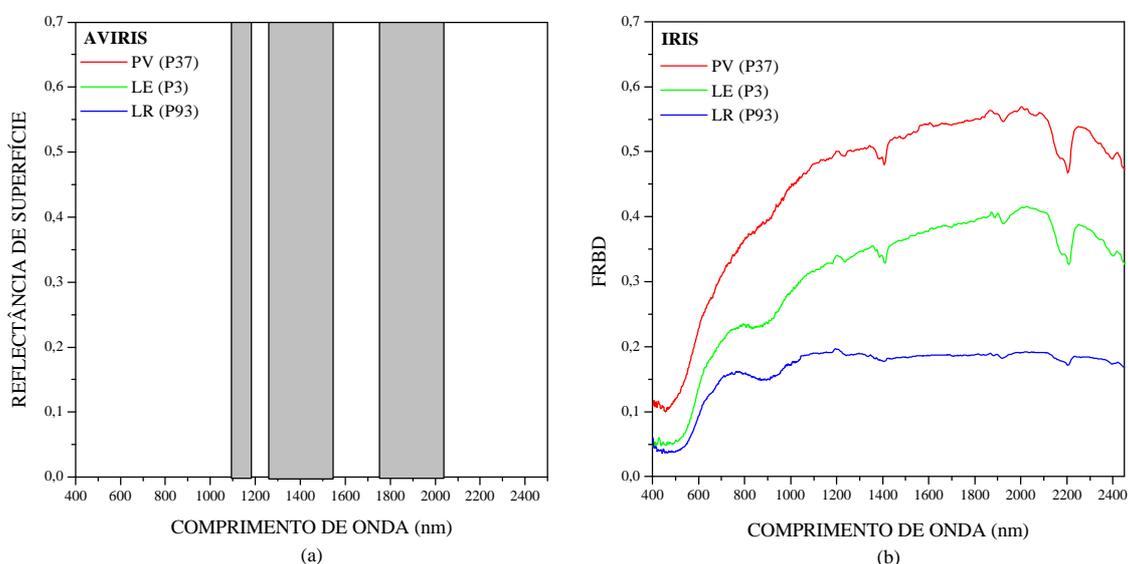


Fig. 4.15 - Espectros de reflectância para amostras representativas de três classes de solo, extraídos da imagem AVIRIS (1 x 1 pixel) em (a), e coletados em laboratório pelo espectrorradiômetro IRIS em (b). As faixas hachuradas indicam intervalos não utilizados na presente análise.

Na região do visível há um acentuado decréscimo da reflectância abaixo de 600 nm (Figura 4.15a), na direção do comprimento de onda do azul, por causa da absorção provocada pela transferência de carga ocasionada pelo ferro. As mudanças na inclinação têm sido atribuídas tradicionalmente às diferenças no conteúdo da matéria orgânica e do

óxido de ferro (Stoner e Baumgardner, 1981). Na faixa de comprimento de onda curto, entre 400 e 480 nm aproximadamente, onde o espalhamento atmosférico é mais forte (Lawrence et al., 1991; Huete, 1996), as diferenças entre os espectros AVIRIS e IRIS se acentuam (Figura 4.15). Em parte, essas diferenças podem ter sido causadas pelo procedimento de correção atmosférica utilizado. Nos espectros do AVIRIS há resíduos espectrais de uma absorção em torno de 940 nm, correspondente ao vapor d'água, que foi utilizada para compensar o efeito da absorção sobre os dados do AVIRIS, e que não aparece nos espectros de laboratório. Outro efeito que poderia ser atribuído ao modelo utilizado na correção atmosférica é o aspecto convexo observado no espectro AVIRIS em torno de 1.651 nm. Porém, este aspecto pode também ser atribuído à influência da vegetação no IVM.

A ausência das feições de absorção bem definidas da hematita e da goetita (Hunt, 1980; Epiphany et al., 1992) nos espectros AVIRIS, que são minerais presentes em muitos solos tropicais, principalmente para solos da classe Latossolo Roxo com alto teor de ferro (Tabela 4.2, ponto P93), pode ser resultante da complexidade dos componentes mistos da cena que não é detectada no ambiente de laboratório. Kruse et al. (1993b) verificaram a existência destas absorções para os dados AVIRIS para uma área situada no extremo norte do Death Valley, situado entre os Estados da Califórnia e Nevada, EUA.

4.2.2.2 - CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS ESPECTRAIS AVIRIS E IRIS

A Figura 4.16 mostra o coeficiente de correlação linear entre as reflectâncias obtidas através do AVIRIS (aeronave) e do IRIS (laboratório) para 18 pontos amostrais, em função do comprimento de onda. Há uma correlação positiva entre as reflectâncias AVIRIS e IRIS sendo maiores principalmente ao redor de 550 nm e a partir de 1.000 nm.

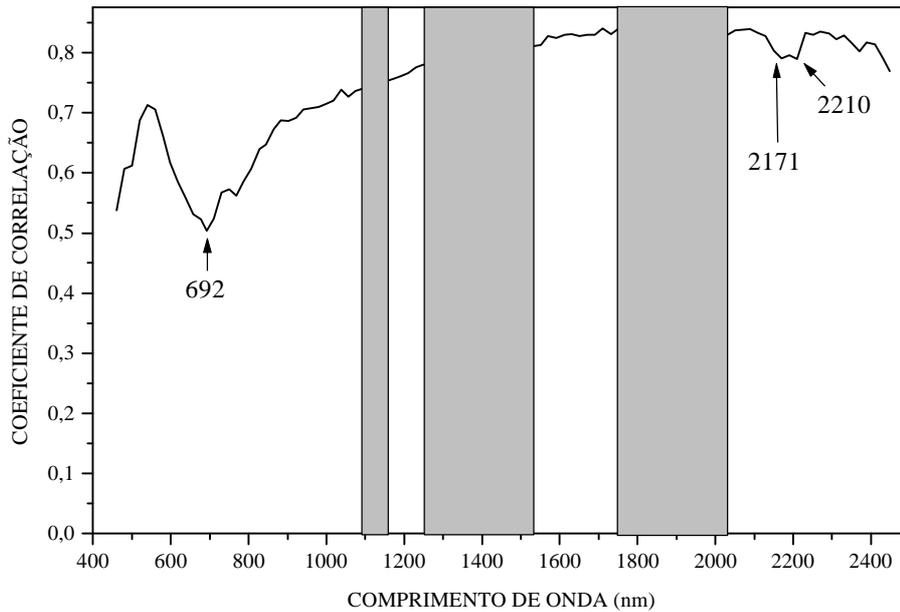


Fig. 4.16 - Correlação entre os valores de reflectância medidos com o IRIS e com o AVIRIS, determinados em intervalos de 20 nm. As correlações foram calculadas para 72 comprimentos de ondas, mantidas as respectivas larguras de bandas de cada espectrorradiômetro. Todos os coeficientes de correlação são significativos a 5%.

Entre os coeficientes de correlação destacam-se alguns picos de menor correlação situados em 692 nm, 2.171 nm e 2.210 nm (Figura 4.16) representados pelos respectivos diagramas de espalhamento de pontos nas Figuras 4.17a, b e c. Conforme visto nestas figuras, as reflectâncias de ambos os sensores aumentam de forma linear. Entretanto, alguns pontos se distribuem de forma mais dispersa em relação ao ajuste da reta, como por exemplo, o P44 e o P29. Portanto, esses dois pontos foram escolhidos para explicar as causas dos menores valores das correlações em 692 nm, 2.171 nm e 2.210 nm.

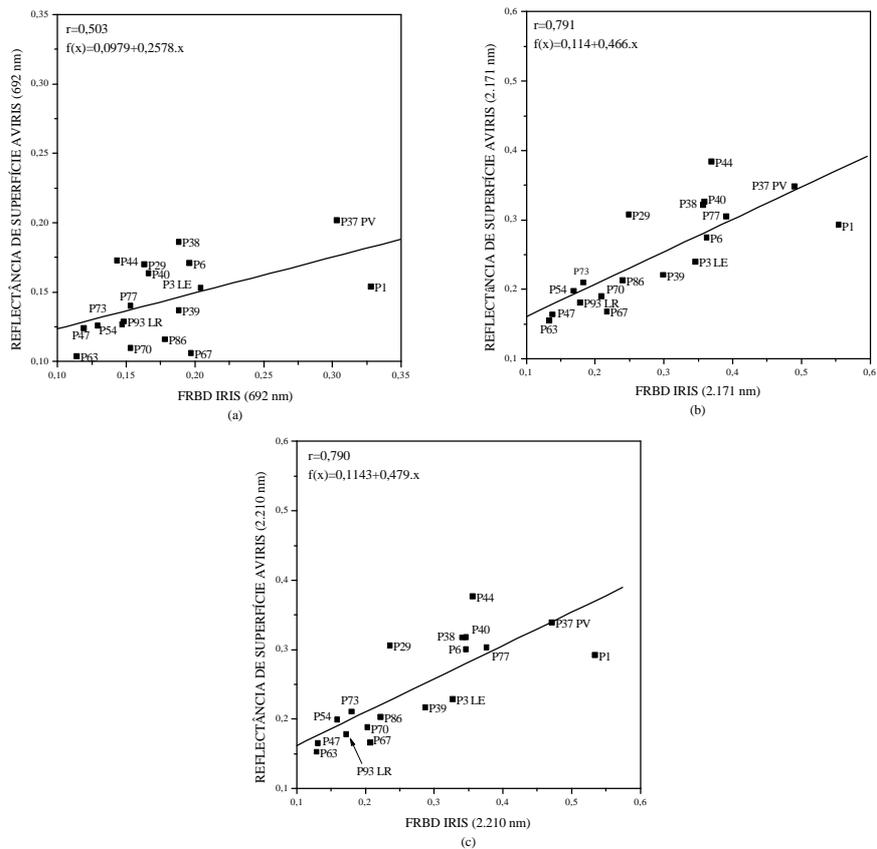


Fig. 4.17 - Diagramas de espalhamento para as relações entre dados espectrais AVIRIS e IRIS em 692 nm em (a), 2.171 nm em (b) e 2.210 nm (c). Os diagramas foram obtidos a partir de 18 amostras.

Os espectros IRIS e AVIRIS dos pontos P44 e P29 estão ilustrados nas Figuras 4.18a, b, c e d. Em termos de bandas de absorção, os espectros de laboratório apresentam feições melhores definidas. Em relação à inclinação das curvas, percebe-se que os espectros de aeronave não acompanham os de laboratório entre 1.531 e 2.450 nm. Os espectros de laboratório são mais ascendentes na faixa de 1.531 a 2.100 nm e menos descendentes a partir de 2.250 nm em relação aos de aeronave, e para ambos os pontos percebe-se o aspecto convexo observado no espectro AVIRIS em torno de 1.651 nm, confirmando os resultados já discutidos no item 4.2.2.1. Os menores coeficientes de correlação obtidos

em torno de 2.200 nm, em relação aos comprimentos de onda vizinhos, expressam diferenças na profundidade da banda de absorção dos minerais argilosos, que é melhor definida nos dados de laboratório (Figuras 4.15a e b). Por outro lado, é possível que os baixos valores de correlação encontrados em torno de 692 nm reflitam uma faixa espectral de maior sensibilidade à presença de resíduos de vegetação no solo, cujos efeitos estariam presentes somente nos dados AVIRIS e, obviamente, ausentes nas condições de laboratório.

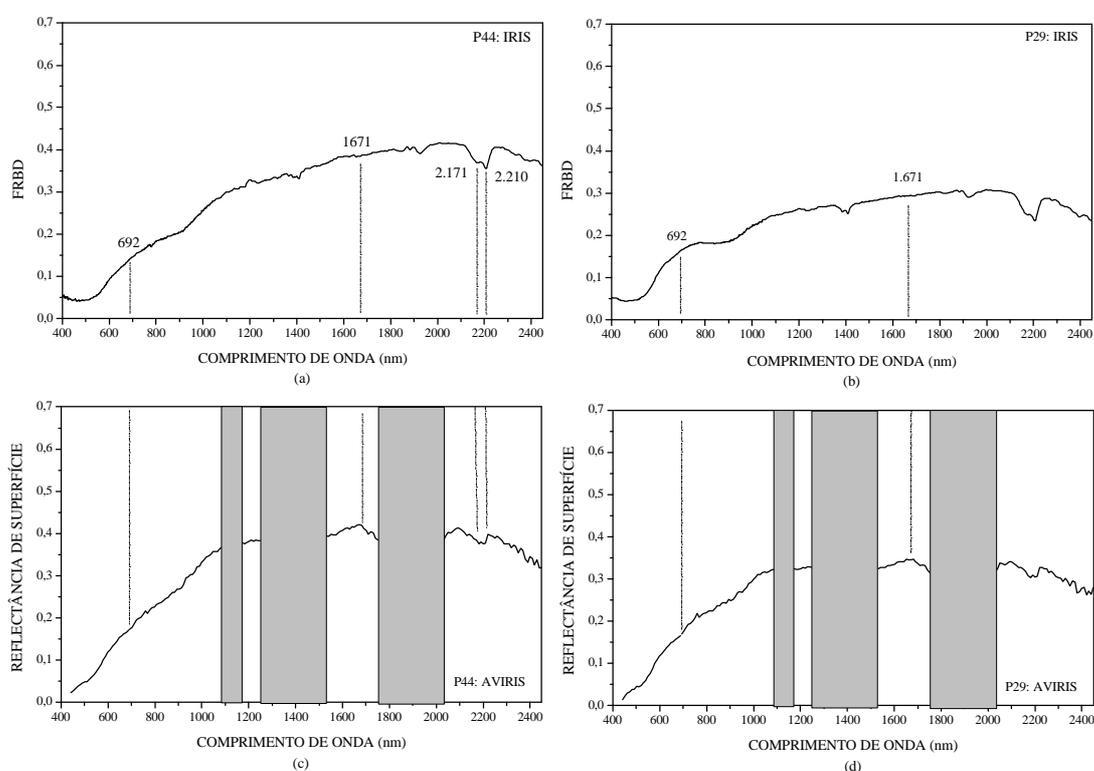


Fig. 4.18 - Espectros de reflectância para os pontos P44 e P29. Em (a) e (b), os espectros foram obtidos em laboratório (IRIS). Em (c) e (d), os espectros foram coletados pela aeronave (AVIRIS). Em todos os gráficos, indica-se onde ocorrem pontos de menor correlação, com exceção do indicado em $\lambda = 1.671$ nm.

4.2.2.3 - CARACTERIZAÇÃO DAS DIFERENÇAS ESPECTRAIS ENTRE DADOS AVIRIS E IRIS POR ANÁLISE DERIVATIVA

Para melhor detectar as feições de absorção extremamente estreitas e pouco profundas nas curvas espectroscópicas dos dois ambientes de coleta de dados, realizou-se o cálculo da derivada segunda, utilizando-se o procedimento descrito no item 3.5.1. Assim, será possível dar melhor respaldo às discussões dos resultados apresentados pelos diagramas de espalhamento (Figuras 4.17a, b e c).

A Figura 4.19 mostra como se comportam as derivadas de segunda ordem [$A''(\lambda)$] para os pontos P44 e P29, obtidas a partir dos espectros IRIS e AVIRIS. Observe que é possível determinar exatamente o comprimento de onda (eixo x) e a magnitude do valor (eixo y) nos pontos de inflexões das feições de absorção (Figura 4.19). Por exemplo, a feição localizada em 692 nm (ponto de inflexão), para ambos os pontos nos espectros originais IRIS e AVIRIS (Figura 4.18), foi realçada após à aplicação da segunda derivada [$A''(\lambda)$] (Figura 4.19). Na Figura 4.19, observa-se que $A''(\lambda)_{IRIS} > 0$ e que $A''(\lambda)_{AVIRIS} < 0$ em $\lambda = 692$ nm. Essa diferença produzida pelas variações nas reflectâncias é a provável causadora da redução nos coeficientes de correlação entre ambos os sensores ao redor desse comprimento de onda, como mostra a Figura 4.17a, e que está situada justamente na transição entre o vermelho e o IVP, faixa de influência dos componentes fotossinteticamente ativos e não-ativos da vegetação. É bem provável que esta influência comece a partir de 550 nm e se estenda até 1.100 nm aproximadamente.

Elvidge e Mouat (1989) e Elvidge et al. (1993) conseguiram observar a presença da clorofila para coberturas de vegetação com até 0,8% para 18 *pixels* e 4,8% para 2 *pixels*, respectivamente, utilizando os dados AVIRIS. Infelizmente não foi possível ter este controle para a época do voo do AVIRIS, mas estes limites de coberturas avaliados pelos autores acima descritos poderiam ser um indicador da presença de resíduos de

vegetação sobre a superfície dos solos, o que explicaria a maior variabilidade espectral entre os conjuntos de dados (AVIRIS e IRIS) em 692 nm e as menores correlações observadas ao redor deste comprimento de onda (Figura 4.16). Pode-se notar pelas Figuras 4.18c e d que há uma ligeira absorção em torno de 700 nm, não verificada nas Figuras 4.18a e b, sugerindo uma provável influência dos resíduos de vegetação para os pontos P44 e P29. Observe nos espectros extraídos dos dados AVIRIS como as curvas espectrais mudam rapidamente a sua inclinação ao redor de 700 nm. Essas variações nas absorções para os pontos analisados podem ser atribuídas, por exemplo, ao estado fisiológico do vegetal (Rock et al., 1994; Singhroy e Kruse, 1991) ou ao tipo da espécie vegetal (Gong et al., 1997).

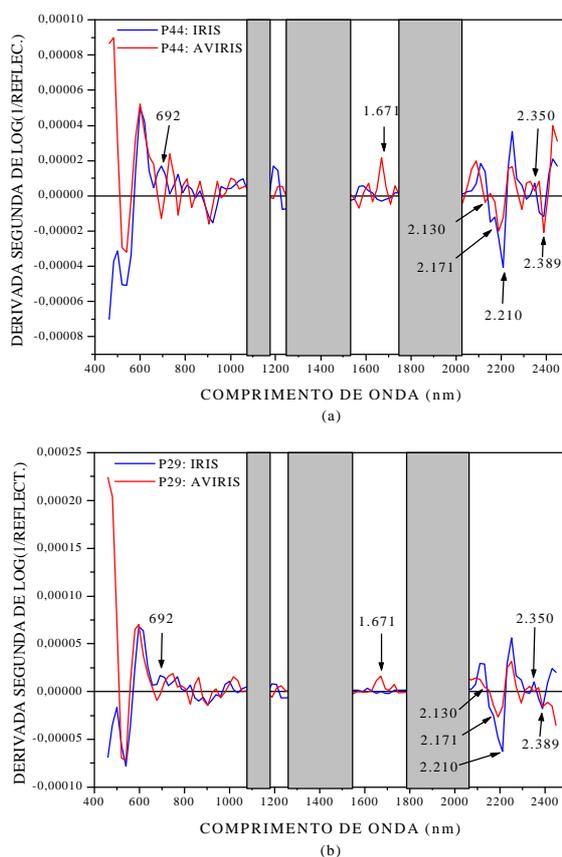


Fig. 4.19 - Derivadas de segunda ordem aplicadas nos espectros de laboratório (IRIS) e de campo (AVIRIS) para os pontos P44 (a) e P29 (b).

Pela Figura 4.19 observa-se também que ocorrem pontos de inflexão para $\lambda = 2.130$ e 2.350 nm e que $A''(\lambda)_{\text{IRIS}} > 0$ e que $A''(\lambda)_{\text{AVIRIS}} < 0$. Isso mostra a existência de feições de absorção para estes comprimentos de onda nos espectros AVIRIS e que podem estar associadas à presença de dois outros constituintes químicos da vegetação nos espectros AVIRIS, respectivamente, a lignina (Curran (1989) e Elvidge (1987)) e a celulose. Normalmente estas feições são mascaradas pela água líquida das folhas no IVP e IVM quando a vegetação se encontra fotossinteticamente ativa (vegetação verde). À medida que o conteúdo da água vai diminuindo ou a vegetação vai se tornando seca, as feições da lignina e celulose vão se tornando mais definidas (Elvidge e Portugal, 1990; Elvidge, 1990). A existência destas duas absorções no IVM reforça ainda mais a hipótese da possível influência dos resíduos de Vv e/ou Vnfa (vegetação seca) presentes na superfície dos solos sobre sua resposta espectral detectada pelo sensor AVIRIS.

A vegetação seca não se restringe apenas à palha (*litter*) presente sobre os solos em virtude do manejo do solo, mas também pode estar presente no dossel da vegetação como folhas e ramos secos (Elvidge, 1987, 1990), fazendo com que o espectro tenha o comportamento de vegetação seca. Exemplos de espectros de vegetação seca extraídos da área de estudo estão ilustrados nas Figuras 4.4 (curva A), 4.7 (curva D) e 4.10 (curva E). Roberts et al. (1992, 1993, 1997, 1998) e van Leeuwen e Huete (1996) relataram que é possível, através da presença das feições da lignina e celulose obtidas a partir de dados hiperespectrais, distinguir SExp de Vnfa, o que pode contribuir na melhoria da precisão dos modelos de mistura espectral.

Outros dois comprimentos de onda de menor correlação entre AVIRIS e IRIS ocorrem em 2.171 e 2.210 nm (Figuras 4.16) e que reconstituem a dupla absorção ocasionada pela caulinita (vide a Tabela 2.2). Ao contrário do que ocorre em 692 , 2.130 e 2.350 nm, onde os valores da derivada segunda tendem a ser maiores para o IRIS em relação aos do AVIRIS, em torno de 2.200 nm os valores tendem a ser concordantes (Figuras 4.19a e b), realçando as absorções. A provável explicação da concordância nos valores

da derivada segunda está associada à menor influência da vegetação no IVM em relação ao VS. Entretanto, como era de se esperar, as feições de dupla absorção são mais bem reconstituídas nas curvas adquiridas em laboratório (Figuras 4.18a e b) e por isso também provocam diferenças entre as magnitudes na derivada segunda. Portanto, a diferença na magnitude das correlações em 2.171 e 2.210 nm, em relação ao coeficiente obtido em 692 nm, sugere que a influência dos resíduos de vegetação sobre a resposta espectral dos solos seria maior na faixa do vermelho.

4.2.2.4 - CARACTERIZAÇÃO DAS DIFERENÇAS ESPECTRAIS ENTRE DADOS AVIRIS E IRIS ATRAVÉS DO CÁLCULO DO NDVI

Pelos resultados apresentados no item anterior, há indicação da presença de resíduos de vegetação verde ou não-fotossinteticamente ativa na superfície dos solos. Estes resíduos provavelmente influenciaram a resposta espectral destes solos, detectada pelo AVIRIS, especialmente em torno de 692 nm, em relação aos espectros de laboratório IRIS. Para tentar confirmar esta hipótese, foram determinados valores de NDVI para as 18 amostras ou *pixels* representativos das classes de solo da área de estudo, conforme procedimento descrito no do item 3.5.1.

A Figura 4.20 ilustra os histogramas obtidos para os valores de NDVI calculados a partir dos espectros de reflectância AVIRIS e IRIS dos solos. Nota-se uma diferença entre as médias do NDVI obtidas nos dois ambientes de coleta de dados, ou seja, o valor médio de NDVI tende a ser maior para os dados AVIRIS do que para os dados IRIS. Novamente, isto sugere a influência de material de origem vegetal sobre a resposta espectral coletada pelo sensor AVIRIS. Tanto os resíduos de vegetação verde, quanto os de vegetação seca, os quais podem incluir folhas secas, galhos, cascas de árvores, palha resultante de áreas com atividades agrícolas, normalmente produzem um incremento dos valores de NDVI de solos. Portanto, a diferença entre os valores de

NDVI, resultantes da transição dos dados de laboratório para os de aeronave, mostra a complexidade introduzida pelos componentes mistos da cena.

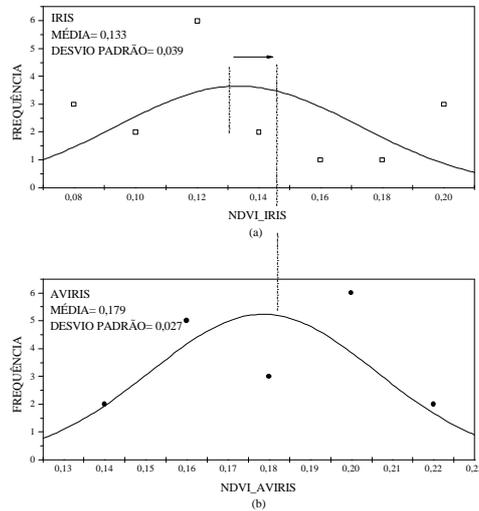


Fig. 4.20 - Histograma dos dados de NDVI para 18 pontos analisados. Em (a) são plotados os valores de NDVI calculados a partir dos espectros obtidos pelo IRIS, cuja média é 0,133 e desvio padrão é 0,039; e (b) são plotados os resultados calculados a partir dos dados AVIRIS, cuja média é 0,179 e desvio padrão é 0,027.

Na verdade existe uma série de fatores pertinentes aos dados adquiridos por aeronave e que dificultam sua comparação com os dados adquiridos em laboratório. Entre eles pode-se destacar os seguintes:

- a) as diferentes geometrias de aquisição dos dados (Jackson et al., 1990);
- b) a correção atmosférica;
- c) a influência da vizinhança do alvo (Silva Filho, 1992);

- d)** a imprecisão na escolha dos *pixels* mais representativos das classes de solo na cena (GPS com erro máximo de ± 100 metros ou ± 5 *pixels*), em relação ao local de coleta das amostras, e as próprias diferenças no campo de visada dos dois sensores (centimétricas em laboratório e métricas em aeronave);

- e)** a diferença proveniente da sensibilidade radiométrica dos sensores (IRIS e AVIRIS) (Dungan et al., 1996), fator este que pode influenciar a caracterização das feições de absorção, independente da existência e do estado da vegetação sobre a superfície;

- f)** a diferença de dois anos entre a aquisição de dados pelos sensores AVIRIS e IRIS sobre as amostras de solos, podendo ter ocorrido variação no teor de matéria orgânica (M.O.) pela sua decomposição e, conseqüentemente, um maior ou menor declive nas curvas espectrais ao redor de 692 nm (Baumgardner et al., 1985; Rondeaux et al., 1996; Ben-Dor et al., 1997);

- h)** a ocorrência, em algumas áreas, do manejo do solo fazendo com que as camadas do horizonte subsuperficial tenham se misturado com as do horizonte superficial. Como foi observado durante os trabalhos de campo, algumas áreas onde foram coletadas amostras de solos sofreram manejo de cultura, alternando-se entre soja e capim braquiária. Os trabalhos de Demattê (1995) e Epiphanyo et al. (1992) mostram que as diferenças nas curvas espectrais entre a camada superficial e a sub-superficial se devem em grande parte à M.O., pois os horizontes sub-superficiais possuem menor teor de M.O. diferenciando ainda mais as inclinações das curvas nesta faixa espectral (ao redor de 700 nm).

4.2.3 - RELAÇÕES ENTRE REFLECTÂNCIAS (IRIS E AVIRIS) E ANÁLISES FÍSICAS

Os coeficientes de correlação lineares obtidos entre os valores de FRBD e areia total, silte e argila total e plotados em função do comprimento de onda são mostrados na Figura 4.21a (IRIS), onde as correlações envolvendo os três constituintes físicos são significativas ao nível de 0,05 em todos os comprimentos de onda, com exceção dos resultados entre 461 e 560 nm. Na Figura 4.21b (AVIRIS), as correlações são todas significativas ao nível de 0,05, com exceção dos resultados para areia e argila total em 461 nm.

De uma maneira geral, em ambas as figuras, as correlações são uniformes e elevadas, principalmente a partir de 1.172 nm, mas o mesmo não acontece entre 461 e 1.075 nm. Neste intervalo, os resultados obtidos para o AVIRIS (Figura 4.21b) mostram correlações, tanto positivas quanto negativas, melhores do que as obtidas na Figura 4.21a (IRIS). A correlação positiva, obtida nas Figuras 4.21a e b para a relação entre areia total e reflectância, indica que à medida em que o teor de areia total das amostras aumenta, aumenta por conseqüência a sua reflectância, principalmente no infravermelho. O contrário ocorre para silte e argila, que mostram valores negativos de correlação com a reflectância.

Os diagramas ilustrados nas Figuras 4.22a, b e c correspondem, respectivamente, às relações do FRBD em 500 nm, obtida em laboratório, com os teores de areia, silte e argila. Os piores resultados dos coeficientes de correlação entre os dados IRIS e as análises físicas foram obtidos neste comprimento de onda e, conforme verificado nestas figuras, estas relações não são exatamente lineares. A razão provável do menor valor de correlação para este comprimento de onda, e que também coincide com uma menor correlação entre os FRBDs do IRIS e as reflectâncias de superfície AVIRIS, como

mostra a Figura 4.16, é por ele estar situado na faixa onde ocorre mudança na posição das absorções nas curvas das 18 amostras de solos estudadas (Epiphanyo et al., 1992).

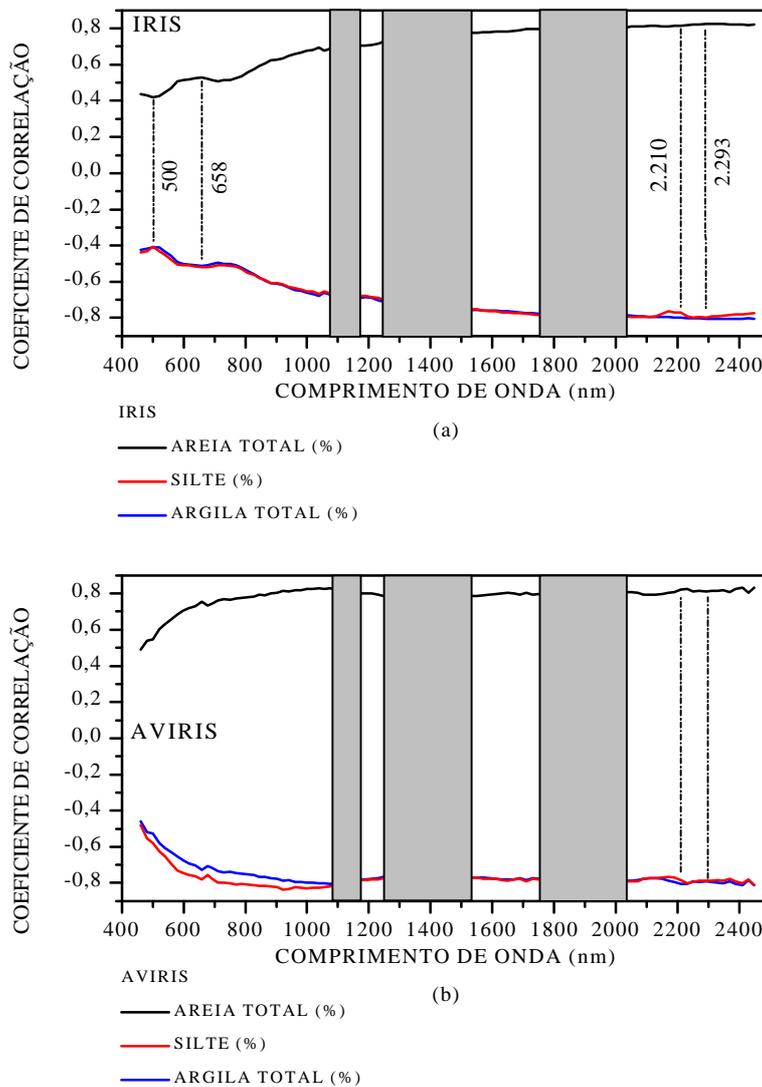


Fig. 4.21 – Curvas de correlação entre dados espectrais e variações no conteúdo de areia, silte e argila de 18 pontos em função do comprimento de onda, (a) refere-se aos dados de FRBD obtidos com o IRIS; e (b) dados de reflectância de superfície AVIRIS.

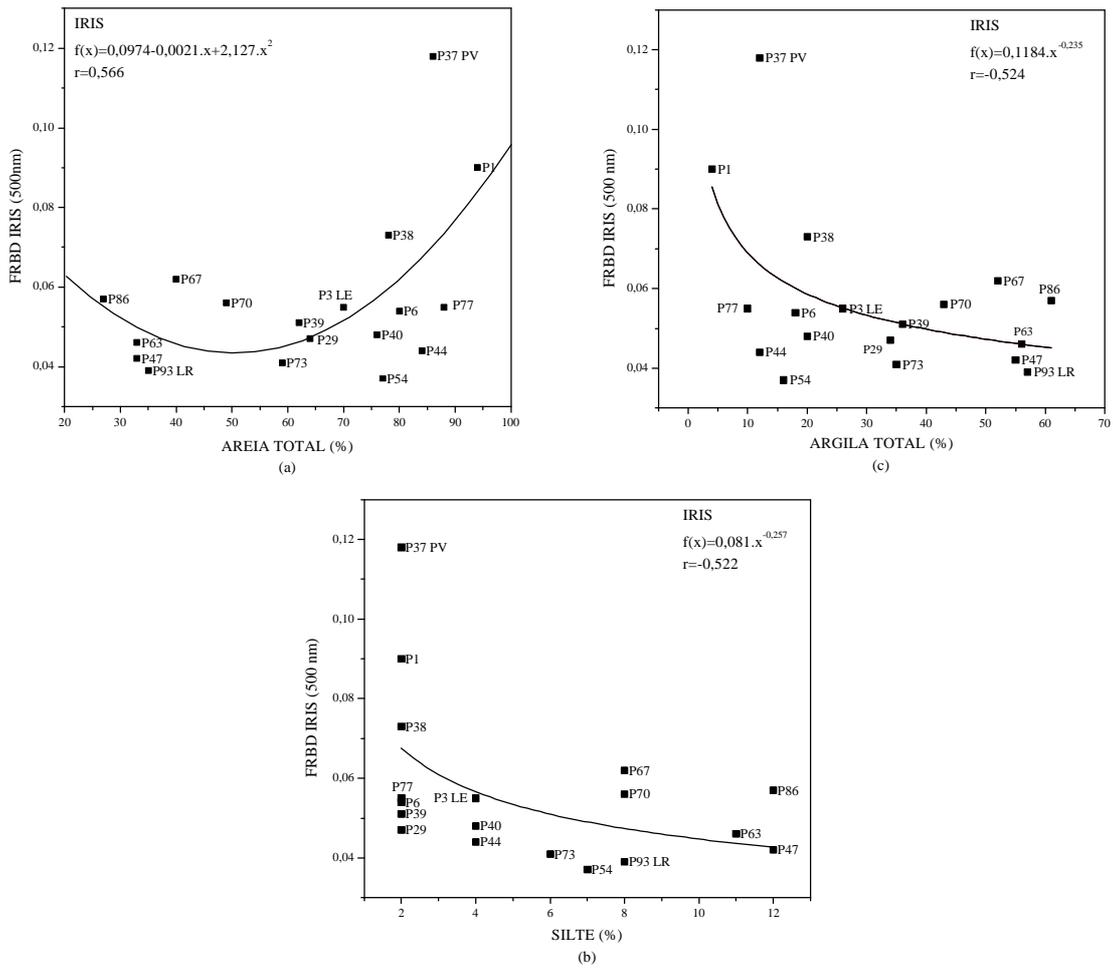


Fig. 4.22 – Diagramas de espalhamento para os dados de FRBD, coletado pelo IRIS, versus areia total (%) em (a), silte (%) em (b), e argila total (%) em (c).

Os resultados obtidos em laboratório para o comprimento de onda de 2.293 nm e apresentados nas Figuras 4.23a e b (IRIS) mostram uma dependência não linear entre os FRBDs e os teores de areia e argila. Estes resultados são concordantes com os obtidos por Galvão (1994) no que diz respeito à não linearidade das curvas ajustadas aos diagramas de espalhamento. Uma importante consideração é que as metodologias empregadas nas aquisições das reflectâncias espectrais foram praticamente as mesmas.

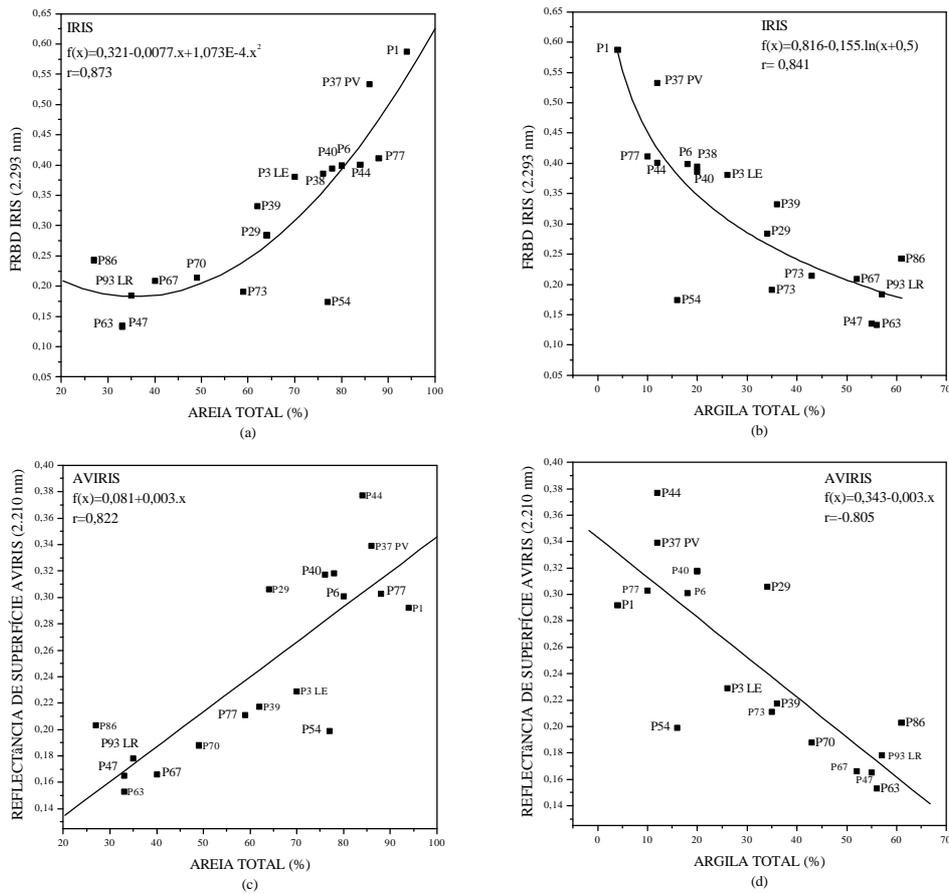


Fig. 4.23 - Diagramas de espalhamento para o Fator de Reflectância Bidirecional (FRBD) obtido pelo IRIS em 2.293 nm versus areia total (%) em (a) e argila total (%) em (b). Em (c) e (d), são mostradas as relações da reflectância obtida pelo AVIRIS em 2.210 nm com os respectivos parâmetros.

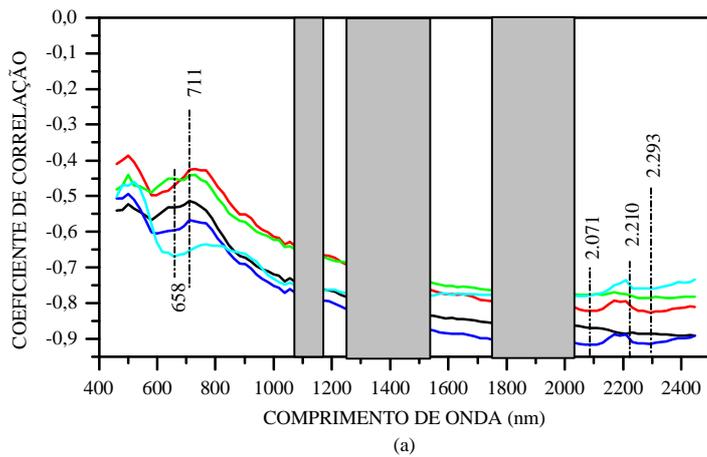
As Figuras 4.23c e d referem-se aos dados AVIRIS e exibem os diagramas de espalhamento para as reflectâncias em 2.210 nm versus os teores de areia e argila. Neste comprimento de onda, os coeficientes de correlação são elevados. Estas relações são lineares, ao contrário do observado nos dados de laboratório das Figura 4.23 a e b. Como era de se esperar, os pontos P37 (PV), P3 (LE) e P93 (LR), identificados nos diagramas de espalhamento das Figuras 4.22 e 4.23, têm as suas posições no diagrama

de espalhamento justificadas indiretamente por sua composição química. Por exemplo, observe que os solos mais argilosos (P47, P67, P70, P86 e P93 LR) (vide apêndice E) possuem menores valores de FRBD e de reflectâncias de superfícies também devido aos maiores teores de M.O.

4.2.4 - RELAÇÕES ENTRE DADOS ESPECTRAIS IRIS E AVIRIS E ANÁLISES QUÍMICAS

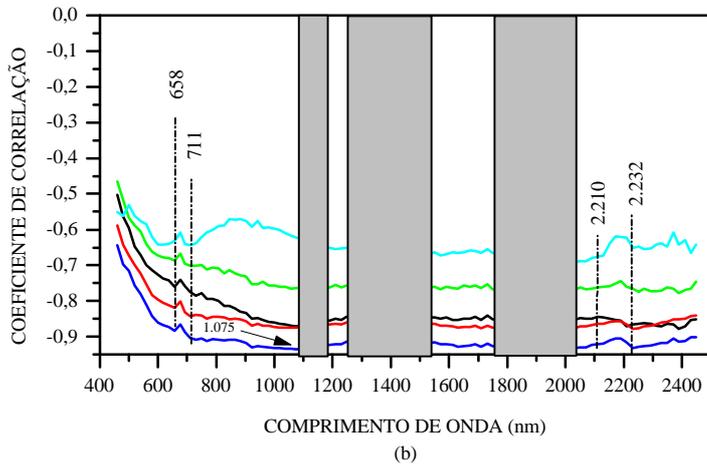
A Figura 4.24a ilustra a distribuição dos coeficientes de correlação linear entre o FRBD medido em laboratório pelo sensor IRIS e cinco constituintes químicos dos solos (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 e M.O.). As correlações envolvendo os cinco constituintes químicos são significativas ao nível de 0,05, com exceção dos resultados obtidos para Fe_2O_3 entre 461 a 560 nm e 658 a 807 nm; para SiO_2 entre 461 a 540 e 598 a 768 nm; e para M.O. entre 461 a 540 nm. Todas as curvas de correlações são negativas onde se pode destacar a influência da M.O. na porção do VS e início do IVP (700 a 800 nm). Já entre o intervalo de 2.000 e 2.450 nm ocorrem os melhores valores de correlação para a curva de Al_2O_3 , um indicador da presença de argilas. Esta tendência também pode ser observada na Figura 4.21a.

Segundo Baumgardner et al. (1985), a faixa do VS e início do IVP, compreendida entre 500 e 1.200 nm, é a melhor para mapear a M.O. dos solos. Quando os teores de matéria orgânica dos solos são inferiores a 2%, ela torna-se menos efetiva para mascarar os efeitos de outros constituintes, como o ferro, sobre sua resposta espectral (Baumgardner et al., 1969).



IRIS

- Al_2O_3 (%)
- Fe_2O_3 (%)
- SiO_2 (%)
- TiO_2 (%)
- M.O. (g/kg)



AVIRIS

- Al_2O_3 (%)
- Fe_2O_3 (%)
- SiO_2 (%)
- TiO_2 (%)
- M.O. (g/kg)

Fig. 4.24 - Correlação entre os dados espectrais obtidos pelo IRIS (a) e AVIRIS (b) e os constituintes químicos de 18 amostras de solos.

A partir de 850 nm o TiO_2 começa a apresentar as melhores correlações em relação aos demais constituintes (Figura 4.24a). À medida que se desloca para comprimentos de onda maiores, na seqüência e em ordem decrescente dos valores dos coeficientes de correlação lineares, estão Al_2O_3 , Fe_2O_3 e SiO_2 . Observe que ocorre uma inversão no

comportamento das curvas de correlação no final do IVM, em que os constituintes TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e SiO_2 apresentam maiores coeficientes de correlação linear em relação aos da M.O. As curvas de correlação do TiO_2 e do Fe_2O_3 mostram um comportamento similar (Figura 4.24a) e têm um alto coeficiente de correlação positivo inerente a eles, $r=0,951$ (Tabela 4.3), porque os solos tropicais são ricos em óxidos de ferro (hematita e goetita) e tendem a apresentar também forte presença dos óxidos de titânio (rutílio e ilmenita). A ilmenita e a magnetita (óxido de ferro) são minerais opacos que ocorrem nos solos e afetam fortemente o albedo das amostras, como no caso do LR (P93). O correspondente decréscimo na reflectância também é resultado do aumento do constituinte Al_2O_3 , que apresentou elevados coeficientes de correlação em torno de 2.200 nm (Figura 4.24a). O comportamento da curva do SiO_2 é similar ao do Al_2O_3 , devido à relação de covariância positiva entre estes dois constituintes ($r=0,839$ na Tabela 4.3).

As Figuras 4.25a, b, c e d mostram os decaimentos curvilíneos calculados em 658, 2.071, 2.210 e 2.293 nm, respectivamente, exatamente onde ocorrem os picos negativos nas curvas de correlação (Figura 4.24a) para os constituintes M.O., TiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Isto mostra que a M.O. pode ser vista como o constituinte de maior influência sobre a reflectância dos solos no intervalo do VS, enquanto que os óxidos de ferro e titânio e minerais argilosos têm maior efeito espectral na faixa do IVP e IVM. Na Figura 4.25a, a reflectância diminui com o aumento do conteúdo de M.O., concordando com a literatura (Hoffer e Johansen, 1969; Al-Abbas et al., 1972). Observa-se ainda que a diminuição da reflectância é de forma não-linear com o aumento do conteúdo de M.O. Concordante com o presente trabalho, Henderson et al. (1992), Galvão et al. (1997) e Mathews et al. (1973) também observaram um pico de correlação negativo em torno da faixa de 500 a 1.200 nm. Observa-se também que o pico de correlação negativo da M.O. em 658 nm, coincide com um decréscimo nos coeficientes do TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e SiO_2 . Isto se deve à maior influência da M.O., que provoca um efeito mascarador sobre os outros constituintes dos solos.

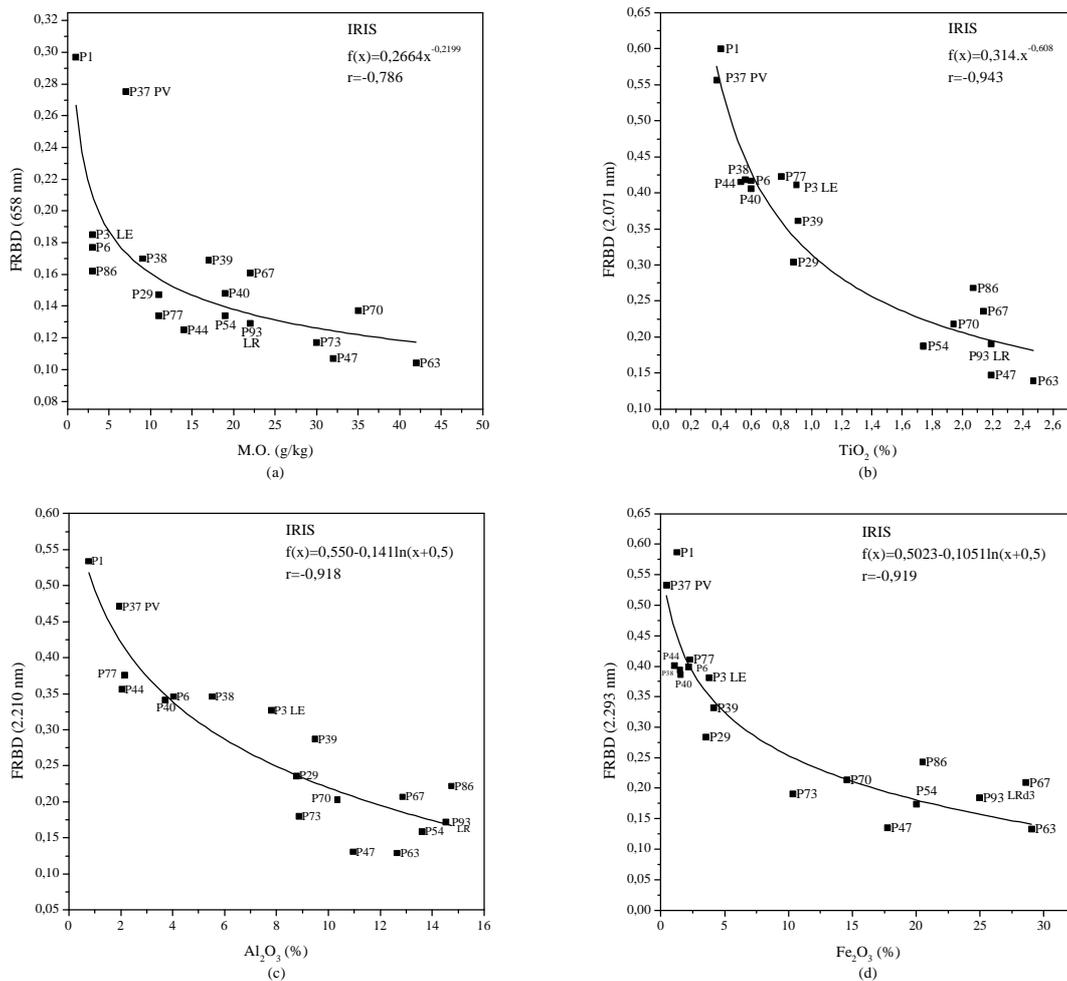


Fig. 4.25 - Diagramas de espalhamento para o Fator de Reflectância Bidirecional (FRBD) obtido em laboratório pelo IRIS em 658 nm versus M.O. (g/kg) em (a), para FRBD em 2.071 nm versus TiO₂ (%) em (b), para FRBD em 2.210 nm versus Al₂O₃ (%) em (c), e para FRBD em 2.293 nm versus Fe₂O₃ (%) em (d).

Como no caso anterior, a Figura 4.24b ilustra a distribuição espectral dos coeficientes de correlação linear entre a reflectância de superfície, obtidos para o sensor aerotransportado AVIRIS, e os mesmos constituintes químicos utilizados na Figura 4.24a. Os coeficientes de correlação para todos os três constituintes químicos são

significativos ao nível de 0,05, com exceção dos resultados obtidos em 461 nm. Note que todas as curvas (Figura 4.24b) apresentam coeficientes de correlação negativos concordando em sinal com os obtidos com a Figura 4.24a. Os piores coeficientes de correlação linear, como mostra a Figura 4.24b para os dados AVIRIS, foram observados para a relação entre a reflectância e a M.O. Em ordem crescente de coeficientes de correlação lineares estão SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e TiO_2 , sendo que os coeficientes para Al_2O_3 e Fe_2O_3 estão bem próximos.

A M.O. apresenta um pico de correlação negativo situado em 711 nm. A Figura 4.26a mostra o diagrama de espalhamento em que a reflectância diminui de forma linear com o aumento da M.O., enquanto que na Figura 4.25a este decréscimo é de forma não linear, mas com menor dispersão dos pontos. A causa principal da maior dispersão dos pontos em torno de 700 nm, como já relatado no item 4.2.2.2, parece ser decorrente da existência de material de origem vegetal sobre a superfície dos solos. Pode-se observar um deslocamento dos picos negativos de correlação na faixa do VS indicados nas Figuras 4.24a e b, para a direita, de 658 para 711 nm. A provável explicação para este efeito, tomando como condição a presença da vegetação com diferentes atividades fotossintéticas e/ou de *pixels* associados a solos com maior ou menor grau de contaminação de sua superfície nos pontos analisados, é a conseqüente absorção em torno de 700 nm, causada pela clorofila. Isto se coaduna com o que foi observado no cálculo do NDVI (Figura 4.20), onde o $\text{NDVI}_{\text{AVIRIS}}$ é maior do que ao $\text{NDVI}_{\text{IRIS}}$.

Outro aspecto interessante, quando se comparam as Figuras 4.24a e b é que, em geral, para os dados IRIS (Figura 4.24a), à medida que melhora a correlação (picos negativos) para a M.O., pioram as correlações dos outros constituintes. Isto não ocorre para os dados AVIRIS, onde as correlações para os constituintes químicos SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e TiO_2 tendem a ser melhores entre 500 e 1.200 nm, aproximadamente. Em contrapartida, os resultados obtidos para M.O. tendem a ser piores, principalmente entre 700 e 1.200 nm. Nesta faixa, o TiO_2 apresenta um pico negativo de correlação situado em 1.075 nm

(diagrama de espalhamento ilustrado na Figura 4.26b), onde os valores de reflectância de superfície tendem a diminuir de forma curvilínea. Diferentemente da posição do pico negativo de correlação encontrado na Figura 4.24a, situado em 2.071 nm, os valores de reflectância de superfície tendem a diminuir de forma curvilínea e mais acentuada com o aumento do teor de TiO_2 .

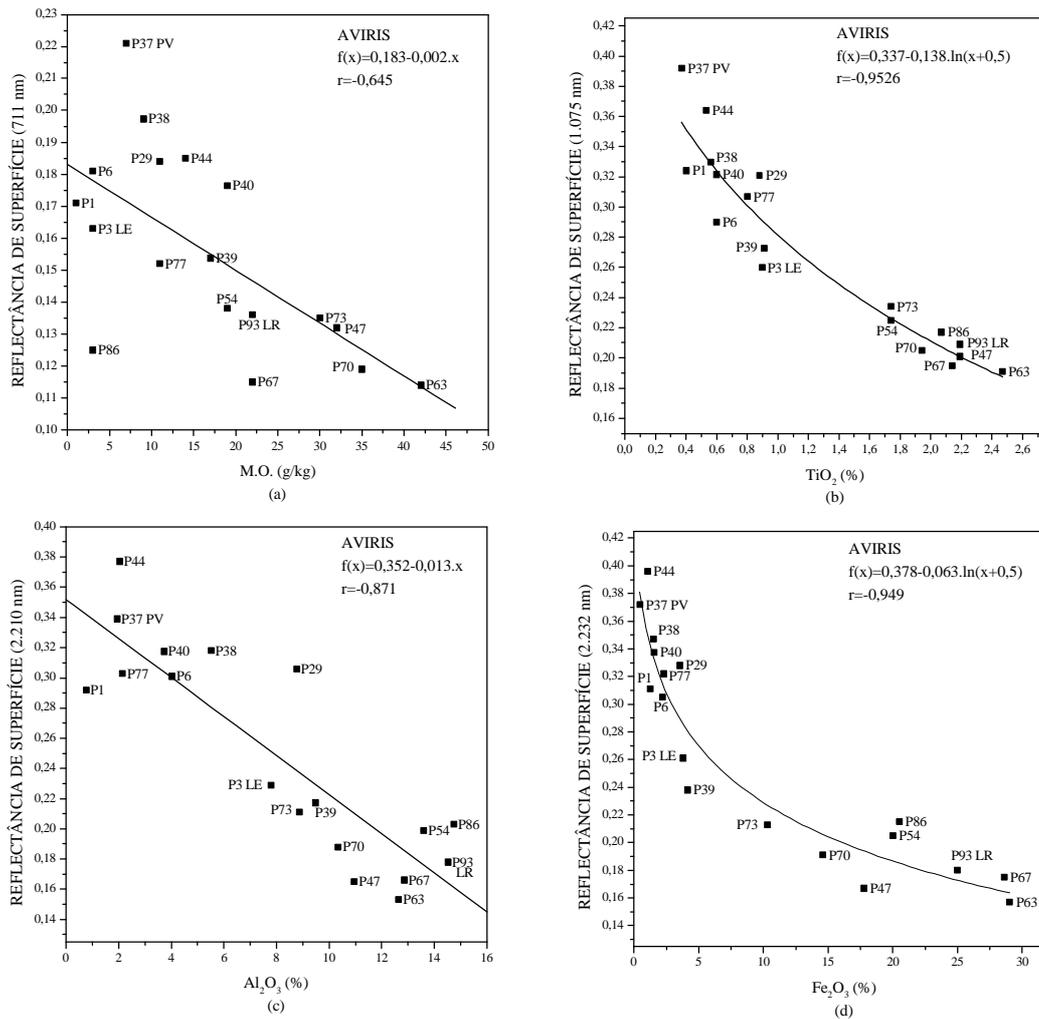


Fig. 4.26 - Diagramas de espalhamento para os valores de reflectância observados para o AVIRIS em 692 nm versus M.O. (g/kg) em (a), em 1.075 nm versus TiO_2 (%) em (b), e em 2.210 nm versus Al_2O_3 (%) em (c) e em 2.232 nm versus Fe_2O_3 (%) em (d).

No final do IVM, como descrito para a Figura 4.24a, diminui a influência espectral da M.O., mas em contrapartida o Al_2O_3 e o Fe_2O_3 tornam-se mais importantes, ocasionando decréscimos nas reflectâncias, como mostram as Figuras 4.26c e d para os comprimentos de onda de 2.210 e 2.232 nm, respectivamente. Estes decréscimos, causados pelo aumento destes constituintes, estão de acordo com os resultados obtidos em laboratório, incluindo o pico de correlação negativo em 2.210 nm provocado pelo Al_2O_3 causado pela forte presença de argila. Isto mostra que a influência da vegetação é menor nesta faixa do espectro, haja vista a concordância das curvas de correlação observada nas Figuras 4.24a e b para esta faixa espectral. Este fato vem a fortalecer o que foi descrito sobre a maior influência dos resíduos de vegetação na região do VS e começo do IVP nos pontos analisados.

De uma maneira geral, as diferenças encontradas entre as curvas de correlação entre os valores de FRBD obtidos pelo IRIS e das reflectâncias de superfícies AVIRIS e os constituintes químicos dos solos, ilustradas nas Figuras 4.24a e b ocorrem pelas dissimilaridades entre os ambientes de aquisição. Como foi relatado, a provável e principal causa dessas diferenças é 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. Experimentos adicionais devem ser realizados para verificar também a influência não só da variação no teor de M.O. que pode alterar a inclinação das curvas espectrais, principalmente entre 500 e 1.200 nm (Baumgardner et al., 1985 e Ben-Dor et al., 1997), como também da correção atmosférica.

4.3 – IDENTIFICAÇÃO MINERAL A PARTIR DOS DADOS AVIRIS ATRAVÉS DA TÉCNICA SFF

Como foi demonstrado no item 4.1, as áreas de solo exposto identificadas pela cor verde na composição colorida obtida a partir das três componentes principais (Figura 4.11) são compostas predominantemente por três classes de solos (PV, LE e LR). A partir da

seleção dos minerais de maior ocorrência para estas classes de solos (vide item 3.6), aplicou-se a técnica SFF (Kruse et al., 1993b; Dwyer et al., 1995) para mapeamento dos mesmos sobre a imagem AVIRIS reflectância de superfície. Desta forma, verificou-se a possibilidade de identificação de alguns minerais (hematita/goetita e caulinita/montmorilonita/gibbsita) através do uso dessa técnica, tomando como verdade terrestre os dados de reflectância obtidos em laboratório e através das análises por difração de raio-x (apêndice E).

Conforme discutido no Capítulo 3 (item 3.6), a técnica foi aplicada para dois grupos de minerais separadamente, um proveniente do grupo dos óxidos de ferro (hematita e goetita) e o outro do grupo das argilas (gibbsita, montmorilonita e caulinita), sendo que em cada grupo os minerais foram avaliados simultaneamente. As Figuras 4.27a e b ilustram as curvas dos espectros de reflectância com o *continuum* removido para os dois grupos de minerais utilizados como referência durante a aplicação da técnica SFF. Os intervalos espectrais selecionados na imagem AVIRIS para remoção do *continuum* e classificação mineralógica foram 749-1.085 nm (hematita e goetita) e 2.101-2.330 nm (gibbsita, montmorilonita e caulinita). Estas faixas foram selecionadas após a inspeção dos espectros de alvos considerados como SExp na cena e dos espectros de referência dos minerais. Os espectros de referência (hematite 0-1A, goethite 0H-2a, kaolinite well ordered PS-1A, montmorillonite SCD PS-2D e gibbsite synthetic 0H-3A) foram extraídos da biblioteca espectral do Jet Propulsion Laboratory (jpl_lib/jpl1.sli/ENVI) (JPL/NASA).

Um exemplo de uma composição colorida obtida a partir da imagem *continuum* para o intervalo espectral do grupo das argilas (2101-2330 nm) é apresentado na Figura 4.28. As bandas 184 (2.111 nm), 191 (2.180 nm) e 196 (2.230 nm) são exibidas, respectivamente, em vermelho, verde e azul. O processo de normalização da imagem, através da remoção do *continuum*, tem como objetivo minimizar as variações de reflectância ou albedo dos alvos e realçar as modificações espectrais associadas às

feições de absorção. Desta forma, a distribuição de cores na composição colorida da Figura 4.28 reflete variações na profundidade da banda de absorção em 2200 nm. Em geral, as áreas na cor magenta representam áreas dominadas por valores de reflectância normalizada altos nas bandas 184 e 196 (menor profundidade da banda de absorção) e baixos na banda 191 (maior profundidade da banda de absorção), ou seja, áreas dominadas pela feição de absorção em 2.200 nm causada pelos processos vibracionais envolvendo OH^- . Estas áreas coincidem com aquelas mais avermelhadas e muito claras na Figura 3.3, onde dominam as classes de solos LE e PV. Os pontos mais bem representativos das três classes de solos estão indicados na Figura 4.28 (PV, LE e LR). As áreas em ciano e amarelo são dominadas em sua grande maioria por vegetação com e sem atividade fotossintética, respectivamente.

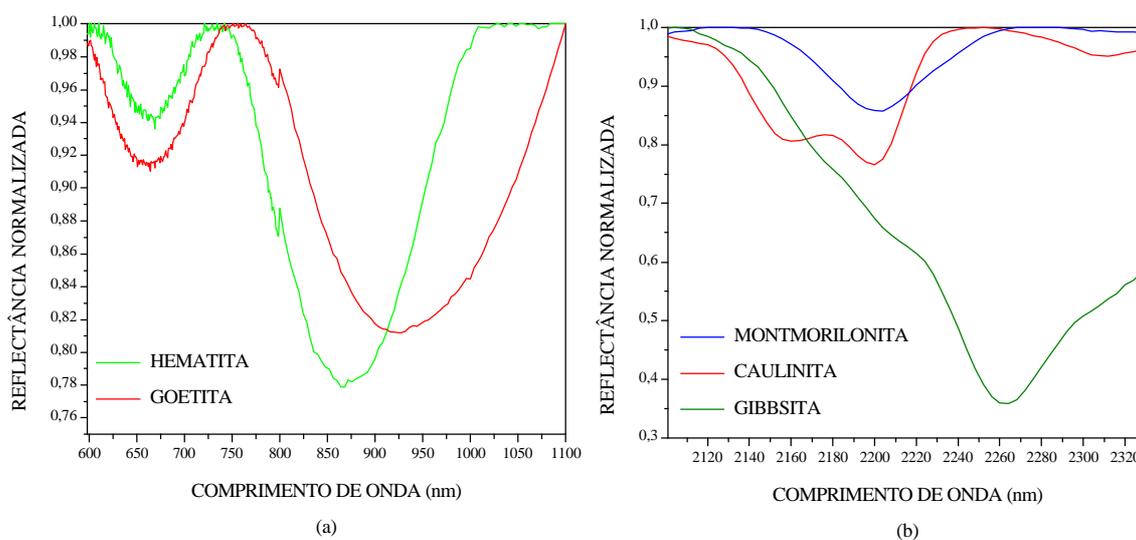


Fig. 4.27 - Espectros de reflectância normalizados com o uso do *continuum* removido dos minerais utilizados como referência pela técnica de mapeamento mineral SFF. (a) grupo dos óxidos de ferro (hematita e goetita); (b) grupo das argilas (caulinite, montmorilonite e gibbsite).

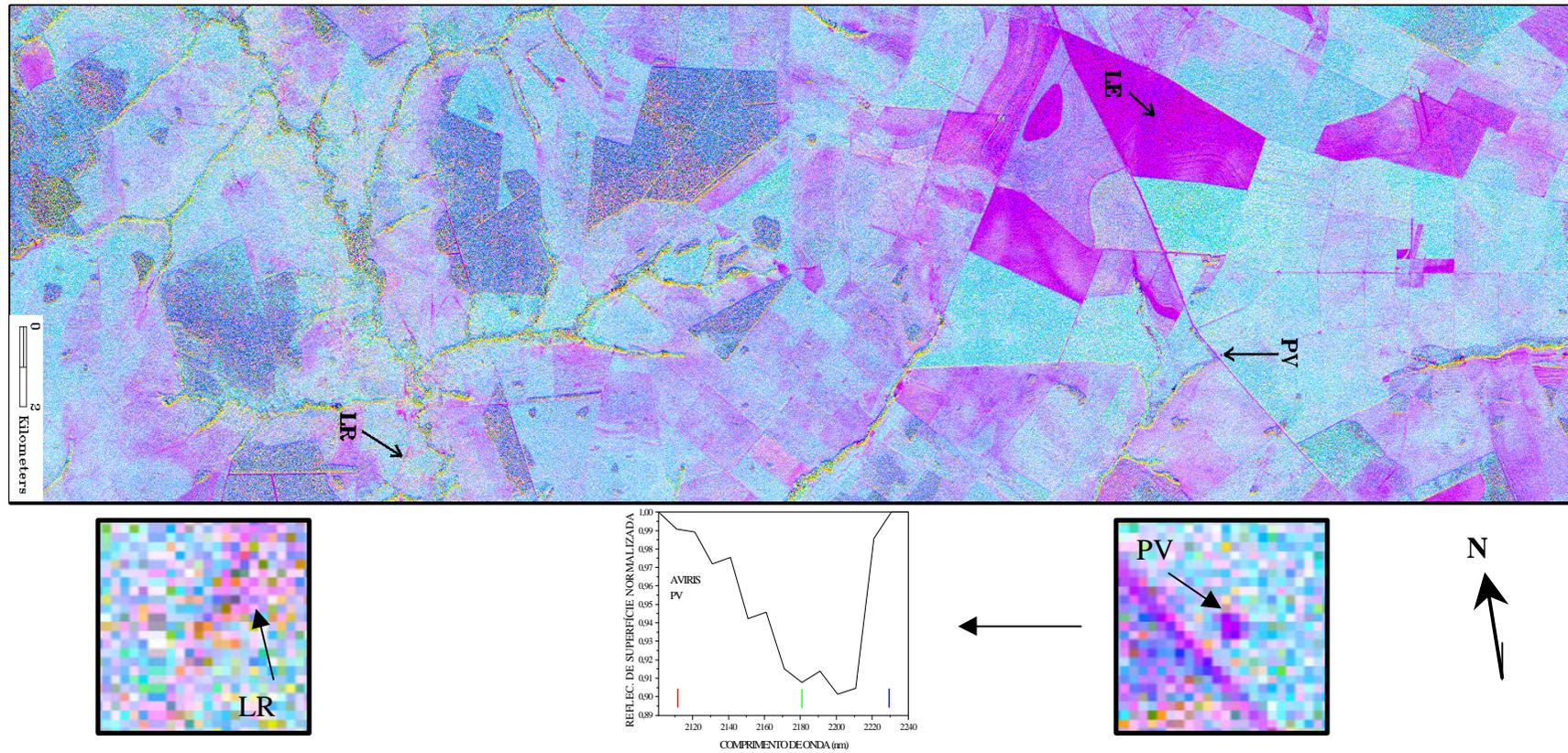


Fig. 4.28 - Imagem obtida a partir da composição colorida entre as bandas 184 (2.111 nm), 191 (2.180 nm) e 196 (2.230 nm), respectivamente, em vermelho, verde e azul, resultante da remoção do *continuum* no intervalo de 2.101 nm a 2.240 nm. As duas figuras menores são de áreas que caracterizam as classes de solos Podzólico Vermelho-Amarelo e Latossolo Roxo.

As Figuras 4.29a e b mostram as imagens da razão *escala/RMS*, resultantes da aplicação da técnica SFF, para os minerais hematita (Figura 4.29a) e caulinita (Figura 4.29b). Quanto maior for esta razão, ou mais claros forem os *pixels* nesta imagem, maiores serão as chances de classificação correta destes minerais. Na Figura 4.29a, a principal ocorrência de hematita está associada à área de LE, que ocorre em cores avermelhadas na composição colorida da Figura 3.3, e também a uma seqüência de solos expostos ao longo do Rio Pardo (Figura 3.3) composta principalmente por LR. Na Figura 4.29b, as áreas de destaque para a provável ocorrência de caulinita e da montmorilonita (resultado não mostrado) são as de LE e PV. Observa-se que há várias estradas secundárias que, indiretamente, representam solos expostos e que também são bem delineadas na imagem classificada. A título de informação, alguns pontos muito claros na Figura 4.29b foram importantes, porque ajudaram na definição dos locais visitados nas atividades de campo, principalmente a área de solo exposto PV (P37) identificada na Figura 3.3 e que por sua vez foi classificada como contendo caulinita (Figura 4.29b).

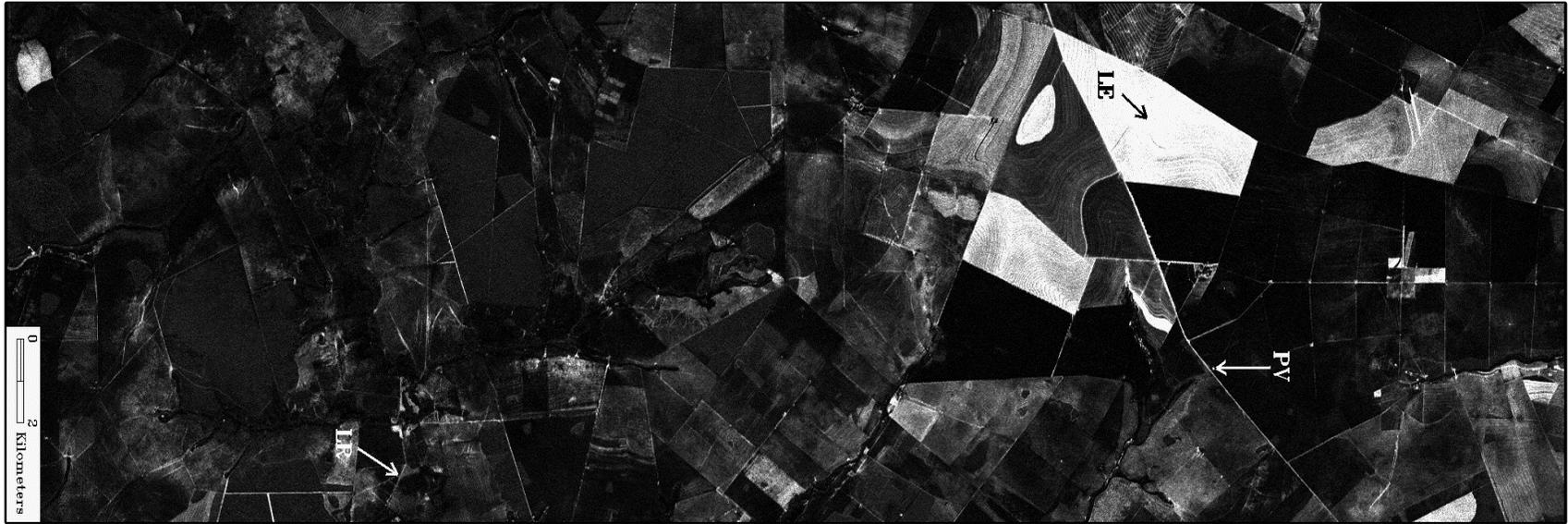
Os resultados para goetita e gibbsita (não mostrados neste trabalho) apresentaram desempenho inferior devidos aos baixos valores razão *escala/RMS*. Pizarro et al. (1998) verificaram que técnicas de classificação hiperespectral como a SFF produziram melhores resultados, ou foram mais úteis, para a identificação espectral de minerais em áreas onde prevalecem solos de albedo intermediário (LE), mais pobres em substâncias opacas (matéria orgânica e magnetita), tanto para solos hematíticos como cauliniticos.



(a)

Fig. 4.29 - Imagens da razão escala/RMS para os minerais de referência hematita (a) e caulinita (b), obtidas a partir da aplicação da técnica Spectral Feature Fitting (SFF) na imagem AVIRIS. Quanto mais claros forem os pixels, maiores as probabilidades de identificação destes minerais na cena. Áreas representativas das classes de solos PV, LE e LR estão indicadas.

(continua)



(b)

Fig. 4.29 - Conclusão.

4.3.1 - IMAGENS PÓS-CLASSIFICADAS

Para melhor visualização da distribuição espacial dos minerais resultante da aplicação da técnica SFF foi feita uma pós-classificação nas imagens *escala/RMS*. Foram estabelecidos limiares e os *pixels* com valores *escala/RMS* superiores aos limiares foram classificados em relação a um determinado mineral. Por outro lado, *pixels* com valores inferiores a estes limiares foram suprimidos na imagem pós-classificada.

Os resultados da aplicação da pós-classificação estão ilustrados nas Figuras 4.30a e b. A primeira imagem (Figura 4.30a) mostra a classificação para os minerais hematita e goetita, enquanto que a segunda imagem (Figura 4.30b) ilustra os resultados para os minerais caulinita, montmorilonita e gibbsita. Um fato a ser destacado é a possibilidade de um mesmo *pixel* ser classificado como pertencente a mais de uma classe mineral, especialmente para classes com domínios espectrais distintos. Por exemplo, áreas da classe Latossolo Vermelho-Escuro (LE) contêm feições típicas de hematita (domínio espectral entre 749 e 1.085 nm) e de caulinita (entre 2.101 e 2.330 nm). Como mostra a Figura 4.12, a curva do LE apresenta feições de absorção ao redor de 900 nm (Fe^{+3} e Fe^{+2}) e de 2.200 nm (OH^-), justificando assim a identificação dos dois minerais para o *pixel* correspondente a esta curva.

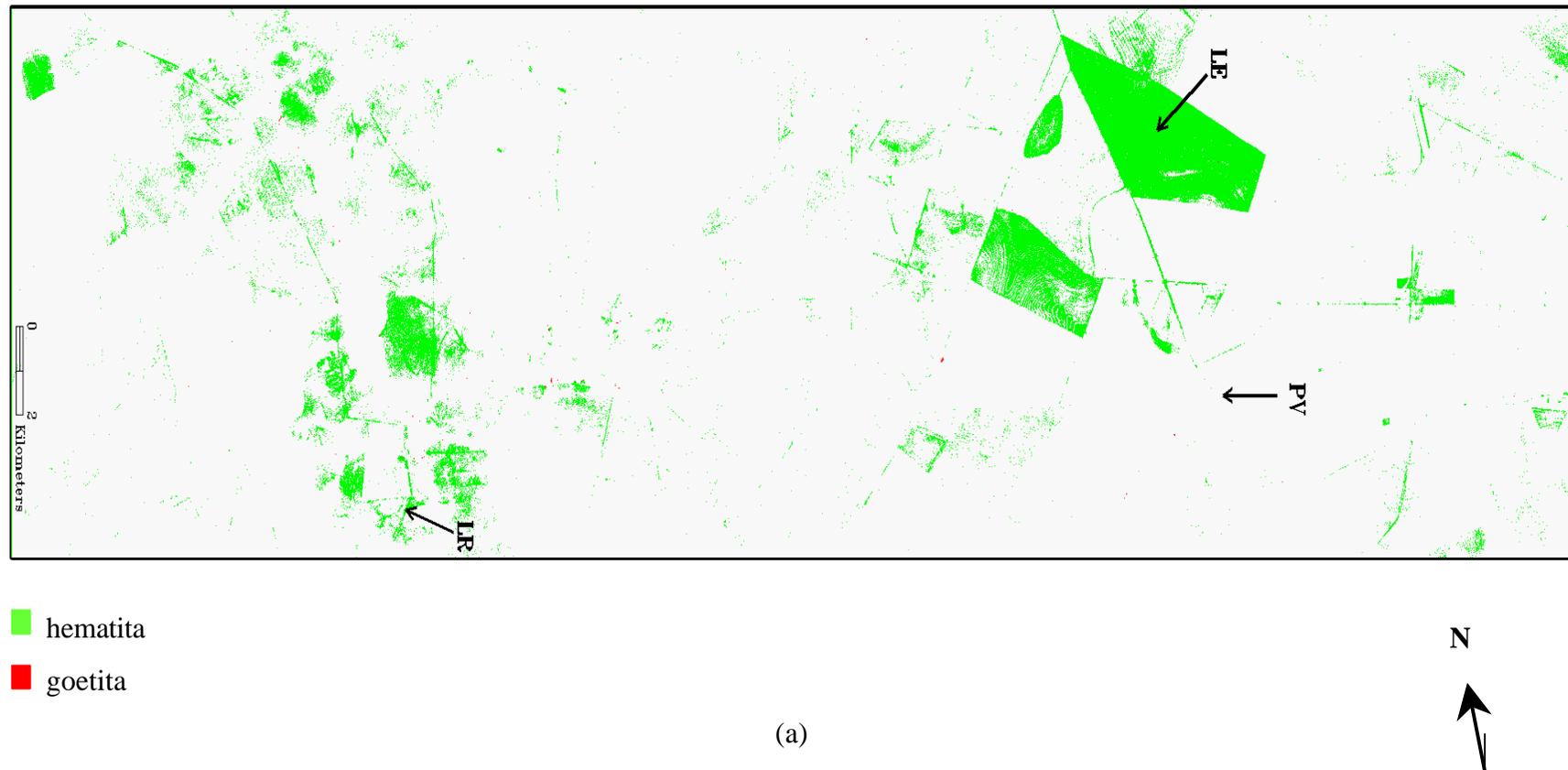
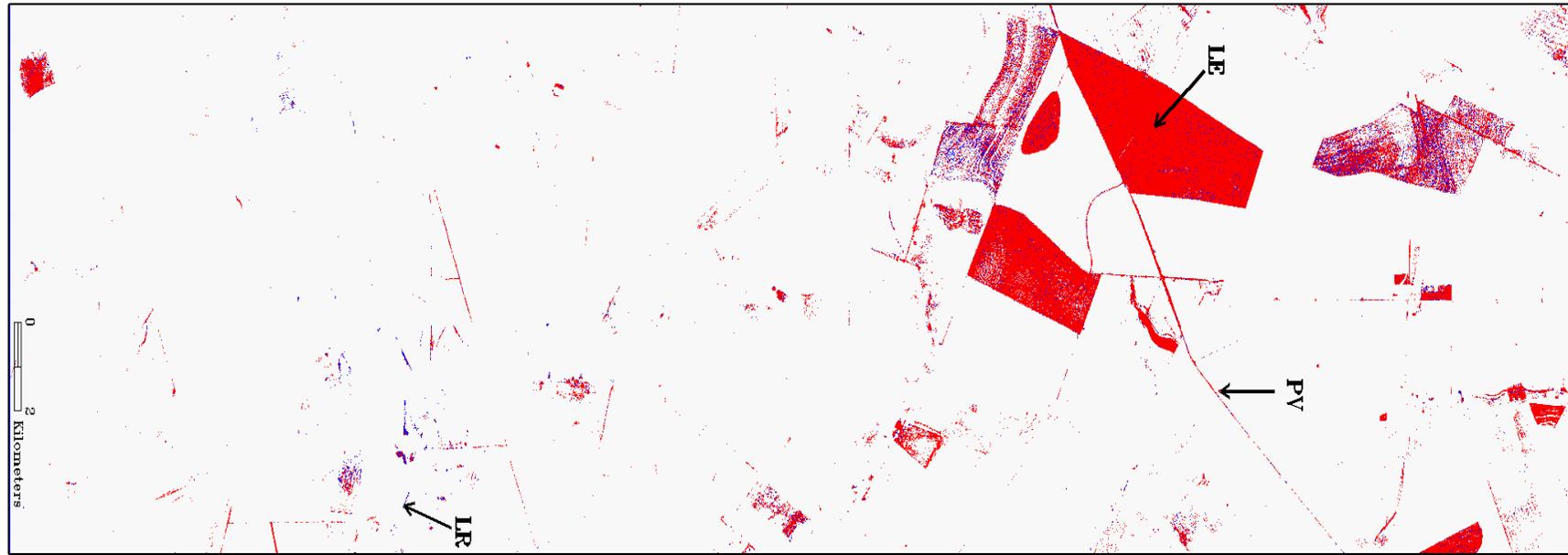


Fig. 4.30 - Imagens pós-classificadas para hematita e goetita (a) e caulinita, montmorilonita e gibbsita (b), obtidas a partir das imagens da razão *escala/RMS*. Nelas estão indicadas as três principais classes de solos identificadas na área de estudo. (continua).



- caulinita
- montmorilonita
- gibbsita

(b)

Fig. 4.30 - Conclusão.

Na Figura 4.30a, a goetita, mapeada na cor vermelha, foi classificada apenas para uma pequena quantidade de *pixels*. Nota-se também que não aparece na pós-classificação o mineral gibbsita na imagem ilustrada na Figura 4.30b, à qual foi atribuída a cor verde escuro na pós-classificação. As feições encontradas causadas pela gibbsita são bem fracas ou até mesmo inexistentes nas áreas onde dominam os solos de albedo intermediário (LE ou P3) a alto (PV ou P37) indicados na imagem da Figura 4.30b. Isso faz com que seus valores *escala*/RMS sejam muito baixos quando comparados com os encontrados para a caulinita e a montmorilonita. Foi verificado também que o valor de limiar deveria ser em torno de 5 para que alguns *pixels* de áreas de solos expostos fossem classificados como gibbsíticos, bem inferior ao valor utilizado na pós-classificação mostrada na Figura 4.30a, em torno de 18.

4.3.2 – FEIÇÕES DE ABSORÇÃO ESPECTRAL EM DADOS IRIS E AVIRIS VERSUS IDENTIFICAÇÃO MINERAL

4.3.2.1 – GRUPO DOS ÓXIDOS DE FERRO

A Figura 4.31 mostra os espectros de laboratório das amostras de solos representativas das três classes de solos (PV, LE e LR) e dos *pixels* correspondentes na imagem AVIRIS, em conjunto com os espectros extraídos da biblioteca espectral do JPL/ENVI para os minerais goetita e hematita. A Figura 4.32 ilustra os espectros de reflectância AVIRIS e IRIS normalizados através da remoção do *continuum* no intervalo de 600 a 1100 nm. Observe que este intervalo inclui a faixa espectral do vermelho que não foi utilizada na aplicação da técnica SFF na área de estudo.

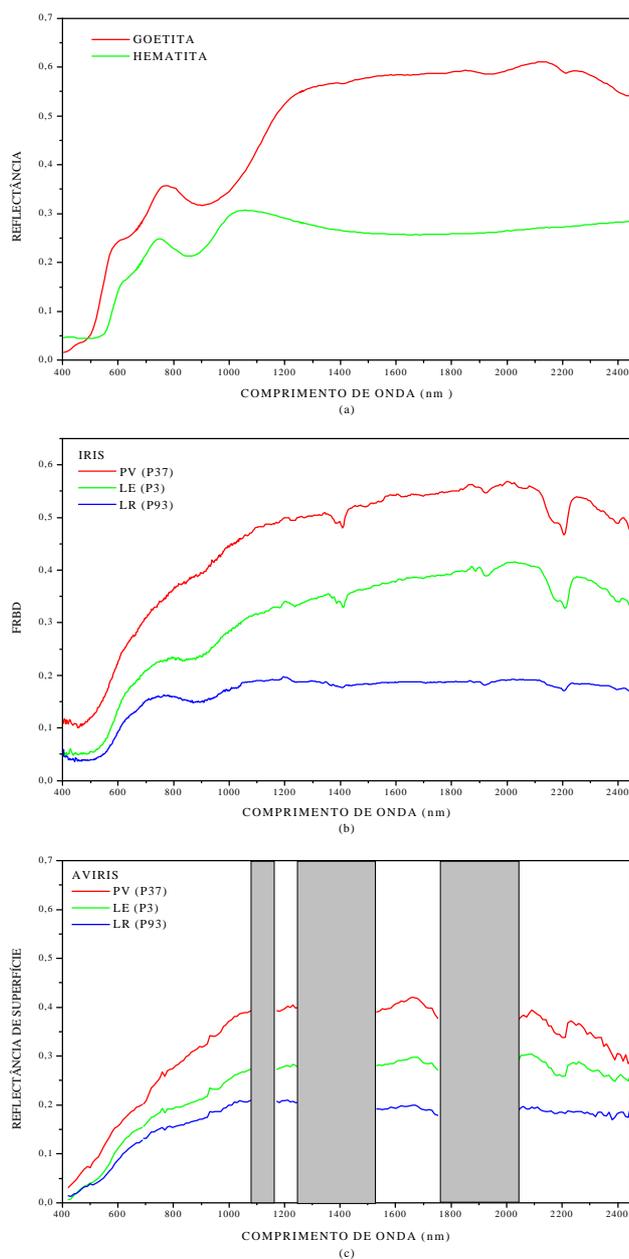


Fig. 4.31 - Espectros dos minerais utilizados no mapeamento do grupo dos óxidos de ferro e extraídos da biblioteca espectral do JPL/ENVI (a), espectros obtidos pelo IRIS das amostras de solos (b) e espectros obtidos pelo AVIRIS para os mesmos locais de onde foram extraídas as amostras (c). Em todas as curvas foram mantidas as resoluções espectrais dos respectivos sensores.

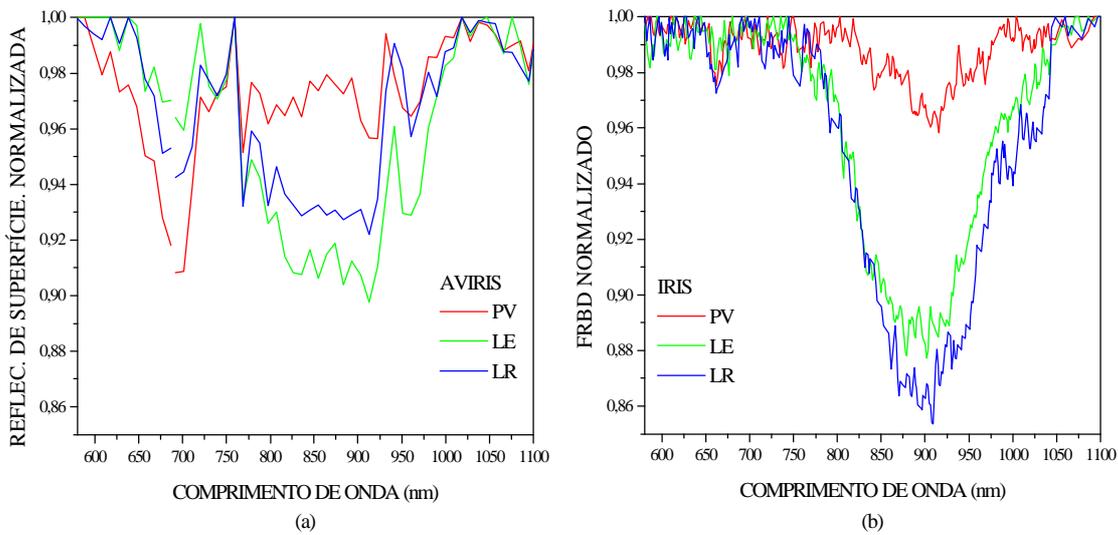


Fig. 4.32 – Reflectância e FRBD normalizados com o uso do *continuum*, no intervalo 600-1100 nm, para amostras representativas das três classes de solos. Em (a), os resultados são apresentados para o AVIRIS e em (b) para o IRIS.

Em geral, nas Figuras 4.31 e 4.32, as feições espectrais são melhores reconstituídas para o ambiente de laboratório (IRIS) do que para os dados de aeronave (AVIRIS), que exibem uma menor profundidade da banda de absorção em torno de 900 nm. Entretanto, a diferença espectral marcante na Figura 4.32 é a presença de uma feição em torno de 690 nm nos dados AVIRIS que é coincidente com a posição da borda vermelha (*red edge*) e que está ausente nos dados IRIS. Esta feição pode ser um indicador da presença de resíduos de vegetação verde no solo, o que tende a afetar o processo de identificação mineral nos dados AVIRIS, especialmente para áreas dominadas por componentes mistos da cena.

4.3.2.2 – GRUPO DAS ARGILAS

A Figura 4.33 ilustra os espectros dos mesmos tipos de solo mostrados na Figura 4.31, mas tendo como referência as curvas de reflectância dos minerais caulinita, gibbsita e

montmorilonita. A Figura 4.34 mostra os espectros de reflectância AVIRIS e IRIS normalizados através da remoção do *continuum* no intervalo de 2.100-2.330 nm.

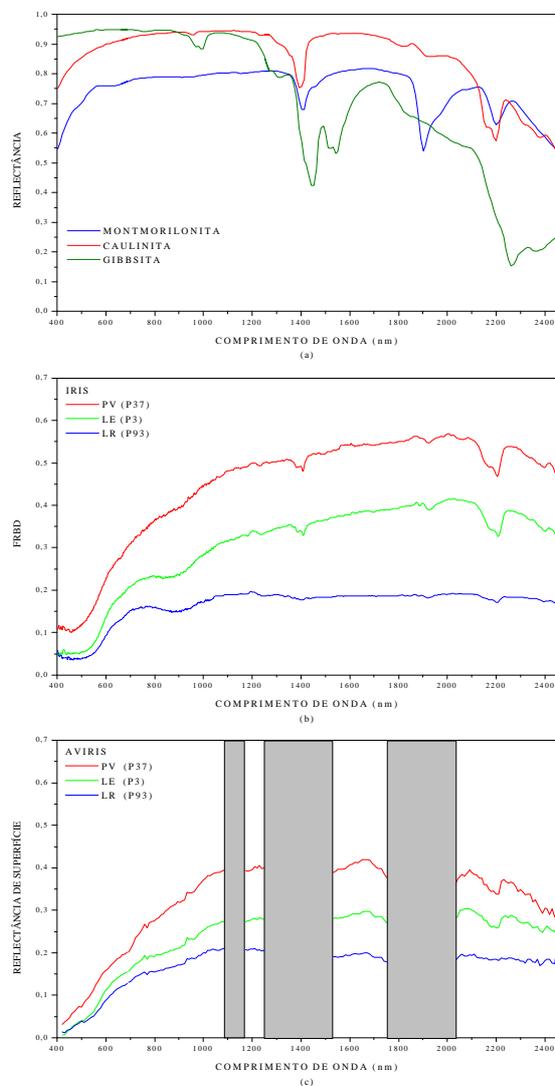


Fig. 4.33 - Espectros de referência dos minerais utilizados no mapeamento do grupo das argilas e extraídos da biblioteca espectral do JPL/ENVI (a), espectros obtidos pelo IRIS das amostras de solos (b) e espectros obtidos pelo AVIRIS para os mesmos locais de onde foram extraídas as amostras (c). Em todas as curvas foram mantidas as resoluções espectrais dos respectivos sensores.

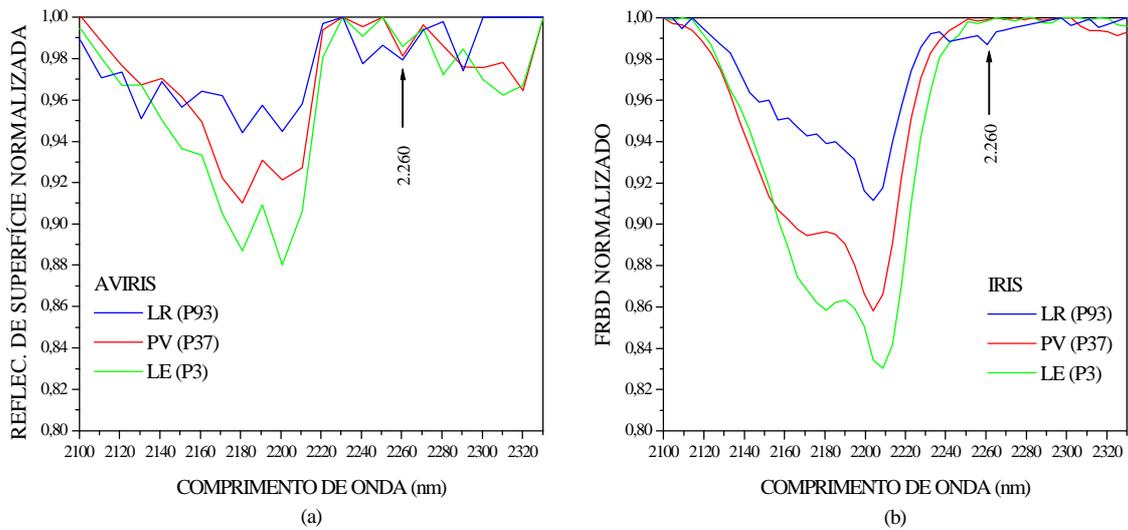


Fig. 4.34 - Reflectância e FRBD normalizados com o uso do *continuum*, no intervalo 2.100-2.330 nm, para amostras representativas das três classes de solos. Em (a), os resultados são apresentados para o AVIRIS e em (b) para o IRIS.

De forma similar à verificada para o grupo dos óxidos de ferro, a feição de absorção em torno de 2.200 nm é melhor reconstituída para o ambiente de laboratório (Figura 4.34b) do que para o ambiente de aeronave. Para ambos os ambientes de aquisição dos dados espectrais, a maior profundidade das feições de absorção em torno de 2.200 nm está provavelmente associada à presença da caulinita. Isto é uma indicação da maior influência dos íons OH^- da estrutura deste mineral, principalmente para as classes de solos PV e LE, o que pode ser justificado pela análise de raio-x (apêndice E) para as amostras dos pontos P3 (LE), P37 (PV) e P93 (LR). Entretanto, examinando atentamente a Figura 4.34a, observe que a feição de dupla absorção da caulinita não é reconstituída de forma bem definida nos dados AVIRIS, em relação aos dados de laboratório. A razão para este fato não é bem conhecida, mas certamente está associada à complexidade decorrente da transição do ambiente de laboratório para o de aeronave, ou seja, aos problemas decorrentes da contaminação dos *pixels* localizados nas áreas de

solos por componentes mistos da cena ou pela influência de alguns dos fatores citados nas páginas 120 e 121.

Em relação à gibbsita, nota-se que tanto para os dados IRIS (Figura 4.34a) quanto para os dados AVIRIS (Figura 4.32b), a profundidade da feição de absorção em 2.260 nm é praticamente igual e pouco profunda, quando comparada com a da caulinita. De acordo com os resultados da análise por difração de raio-x (apêndice E), a porcentagem de gibbsita é menor do que a de caulinita para os pontos analisados. De fato, praticamente para todos os demais pontos, a porcentagem de gibbsita nas amostras de solo é bem inferior ao de caulinita, o que justifica os baixos valores *escala/RMS* encontrados na imagem para gibbsita e os altos valores obtidos para a caulinita.

Para a montmorilonita, outro mineral analisado no grupo das argilas, quando presente na curva espectral apresenta a feição de absorção em torno de 2.204 nm, como mostra o espectro normalizado pelo *continuum* na Figura 4.27b. Note que não ocorre em nenhum dos três pontos analisados indícios da presença da feição em 2.204 nm para ambos os ambientes de aquisição (Figuras 4.33a e b, e 4.24 a e b). Examinando as análises por difração de raio-x (apêndice E) não é possível avaliar a porcentagem da montmorilonita nas amostras de solos, pois ela está incluída na coluna dos minerais 2:1, onde além dela incluem-se vermiculita, micas e material amorfo de sílica e alumina. Pelo exposto, a causa mais provável para que fossem classificadas nas mesmas áreas a montmorilonita e a caulinita, como ilustrado na Figura 4.30b, é a falta de sensibilidade do algoritmo empregado pela SFF em discriminar as feições de absorção muito próximas causadas por esses dois minerais.

A Figura 4.35a mostra o diagrama de dispersão entre a profundidade da absorção em 2.200 nm e os valores *escala/RMS*, para os 18 pontos considerados como solos expostos e identificados na imagem da Figura 3.3. A profundidade foi calculada a partir dos dados AVIRIS normalizados com o uso do *continuum* espectral. Em geral, observa-se que à medida em que aumentam os valores *escala/RMS* ocorre também um aumento

da profundidade da absorção, indicando uma correlação linear positiva ($r= 0,857$) entre os dados. Em outras palavras, os locais onde há maior probabilidade de identificação mineral são aqueles cujos espectros contêm feições de absorção mineral do material analisado mais profundas.

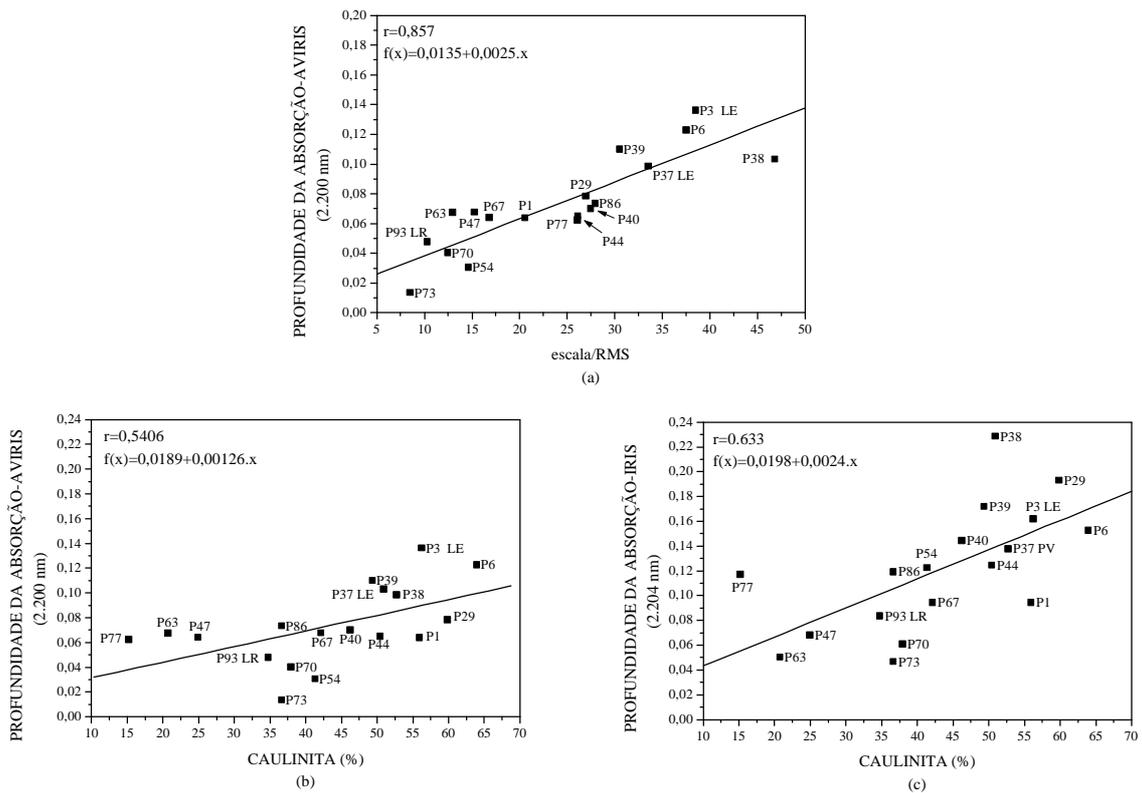


Fig. 4.35 - Diagramas de espalhamento para a profundidade da feição de absorção da caulinita em 2.200 nm (AVIRIS) versus valores escala/RMS em (a) e versus caulinita (%) das amostras de solos em (b). Em (c), os resultados da relação entre a profundidade de absorção em 2.200 nm, calculada dos dados IRIS, versus caulinita (%) das 18 amostras de solo são apresentados.

As Figuras 4.35b e c mostram os diagramas de dispersão para a relação dos valores da profundidade da banda de absorção posicionada ao redor de 2.200 nm, calculados a partir dos dados AVIRIS e IRIS, respectivamente, com a porcentagem de caulinita (apêndice E) presente nas 18 amostras de solos coletadas em campo. Comparando os dois gráficos, nota-se uma maior inclinação da reta ajustada para os dados IRIS em relação aos do AVIRIS. Isto significa que para uma mesma porcentagem de caulinita ocorre uma maior profundidade de absorção para os dados IRIS. O resultado reflete a melhor reconstituição/profundidade das feições de absorção em laboratório quando comparada com a aquisição de dados pelo sensor aerotransportado (Figura 4.34 a e b). Os dados de laboratório traduzem melhor as propriedades físico-químico-mineralógicas dos solos do que os de aeronave, por causa das melhores condições de controle das variáveis externas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

Com relação à caracterização espectral da área de estudo através da análise por componentes principais dos dados AVIRIS, pode-se concluir que:

- a) As três primeiras componentes são responsáveis por mais de 98% da variância total dos dados sendo suficientes para explicar a maior parte da variabilidade espectral da cena;
- b) A primeira Componente Principal (CP₁) expressa a variação do albedo na imagem, enquanto as CP₂ e CP₃ refletem as diferenças na declividade das curvas (efeito de inversão espectral). Amostras com escores CP₁ baixos possuem normalmente menor albedo (*pixels* escuros) do que aquelas com escores CP₁ altos (*pixels* claros). A CP₂ é útil para diferenciar vegetação verde ou fotossinteticamente ativa (*pixels* claros) da vegetação seca ou não-fotossinteticamente ativa e solo exposto (*pixels* escuros). Por outro lado, a CP₃ propicia a discriminação espectral da vegetação verde e solo exposto (*pixels* claros) em relação à vegetação não-fotossinteticamente ativa (*pixels* escuros).
- c) O parâmetro que melhor diferencia as classes de solo é o albedo (imagem CP₁), o qual está diretamente relacionado com os seus constituintes. Desta forma, solos como o LR e o LE tendem a apresentar menor albedo (*pixels* mais escuros na imagem CP₁) do que o PV (*pixels* mais claros), porque normalmente contêm uma maior quantidade de substâncias opacas. Em relação às imagens CP₂ e CP₃, que representam variações na forma dos espectros, elas são úteis para discriminar solos vermelho-amarelados (PV) de solos vermelho-escuros (LE e LR).

Portanto, os resultados demonstram que as imagens AVIRIS podem contribuir na discriminação de classes de solos;

Com relação às correlações entre os dados de laboratório (IRIS) e de aeronave (AVIRIS) e destes com as análises físico-químicas, pode-se concluir que:

- a) As correlações entre os dois ambientes de aquisição de dados (IRIS e AVIRIS) são normalmente altas, especialmente na faixa do IVM. Os menores coeficientes de correlação ocorreram no intervalo espectral correspondente ao limite superior do vermelho, em torno de 692 nm;
- b) As curvas espectrais representativas das classes de solo LR, LE e PV para os dados de laboratório (IRIS) e de aeronave (AVIRIS) são comparáveis. Entretanto, as bandas de absorção, tanto para o grupo dos óxidos de ferro como para o das argilas, são melhor definidas no contexto de laboratório;
- c) A segunda derivada é uma técnica bastante sensível para a detecção de feições de absorção extremamente estreitas situadas em diferentes comprimentos de onda, possibilitando a diferenciação das feições entre as curvas espectrais de laboratório e de aeronave;
- d) Há indícios de que a feição de absorção situada em 692 nm e detectada nos espectros AVIRIS de solos seja provocada pela presença de resíduos de vegetação verde ou não-fotossinteticamente ativa na superfície dos mesmos. As razões atribuídas são: posição espectral da feição entre a transição do vermelho e IVP, faixa de influência da clorofila; a feição não é encontrada em nenhuma curva obtida em laboratório pelo IRIS; foram encontradas feições de absorção em 2.130 e 2.350 nm atribuídas à celulose e à lignina, respectivamente, em duas

curvas analisadas; o valor médio encontrado para o $NDVI_{AVIRIS}$, em relação ao $NDVI_{IRIS}$, é ligeiramente maior nos 18 solos considerados como solos expostos na imagem, o que pode indicar a presença de resíduos vegetais;

- e) Os solos com textura arenosa possuem normalmente maior reflectância do que aqueles com textura argilosa. Estas relações são válidas para os dois ambientes de aquisição de dados. A alta correlação existente entre as bandas explica o aspecto plano das curvas, principalmente para o ambiente de laboratório;
- f) Para as correlações entre a reflectância e os constituintes dos solos, a principal diferença entre os dados IRIS e AVIRIS ocorre entre 500 e 1.200 nm. Neste intervalo, a matéria orgânica mostra um pico de correlação negativo em 658 nm para os dados IRIS, que não está presente nos dados AVIRIS, provavelmente devido ao processo de contaminação de *pixels* por resíduos de vegetação, conforme discutido anteriormente;
- g) De uma maneira geral, os resultados exprimem as diferenças inerentes aos dois ambientes de aquisição de dados. No ambiente de laboratório, há um melhor controle da intensidade e da distribuição espectral da iluminação, bem como da geometria de aquisição de dados, e da própria condição físico-química das amostras de solos. Em contraste, na aquisição dos dados por meio aerotransportado, o Sol é usado como fonte de iluminação, o campo de visada é maior do que o existente no laboratório, e as complexidades introduzidas pelos componentes mistos da cena (contaminação do *pixel*) são bem mais fortes.

Com relação à aplicação da técnica de classificação hiperespectral SFF, pode-se concluir que:

- a) 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;
- b) A técnica SFF tende a apresentar melhores resultados para a classificação dos minerais provenientes do grupo dos óxidos de ferro para solos de albedo intermediário a baixo (Latosolo Vermelho-Escuro e Latossolo Roxo). Por outro lado, para a classificação dos minerais provenientes do grupo das argilas, melhores resultados são obtidos para solos de albedo intermediário a alto (Latosolo Vermelho-Escuro e Podzólico Vermelho-Amarelo);
- c) A identificação mineral das áreas contendo caulinita e gibbsita na imagem AVIRIS foi coerente com os resultados das análises por difração de raio-x, mas o mesmo não ocorreu com a montmorilonita;

A falta de controle de campo concomitante com a aquisição dos dados AVIRIS, dificultou a análise dos resultados, principalmente, a compreensão do papel espectral desempenhado pelos diferentes componentes da cena. Combinações de diferentes estágios evolutivos da vegetação, desde vegetação fotossinteticamente ativa (vegetação sadia) até a vegetação não-fotossinteticamente ativa, não puderam ser devidamente caracterizadas. Além disso, não foi considerada neste estudo, a possibilidade de modificações no estado de decomposição da matéria orgânica provocada pela diferença de dois anos entre as aquisições dos dados AVIRIS e IRIS.

Adicionalmente, há também a necessidade de verificar qual a influência da variação dos parâmetros de entrada de dados do primeiro programa (h2olut0) do método de transferência radiativa, a fim de minimizar os efeitos de espalhamento atmosférico e melhor reconstituir as feições de absorção, na faixa entre 400 e 500 nm, relativas ao grupo dos óxidos de ferro.

Os resultados, como um todo, demonstram o potencial da Espectroscopia de Imageamento para reconstituir as variações de albedo, forma dos espectros e bandas de absorção mineral, que podem propiciar a discriminação das diferentes classes de solos tropicais e a identificação, na cena, de alguns de seus componentes minerais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Abbas, A.H.; Swain, P.H.; Baumgardner, M.F. Relating organic matter and clay content to multispectral radiance of soils. **Soil Science**, v. 11, n. 6, p. 477-485, 1972.
- Baumgardner, M.F.; Kristof, S.J.; Johannsen, C.J.; Zachary, A.L. Effects of organic matter on the multispectral properties of soils. **Proceedings of the Indiana Academy of Science**, v. 79, p. 413-422, 1969.
- Baumgardner, M.F.; Silva, L.R.F.; Biehl, L.L.; Stoner, E.R. Reflectance properties of soils. **Advances in Agronomy**, v. 38, p. 1-44, 1985.
- Ben-Dor, E.; Inbar, Y.; Chen, Y. The reflectance spectra of organic matter in the visible, near-infrared and short wave infrared region (400-2500 nm) during a controlled decomposition process. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, p. 1-15, 1997.
- Bigham, J.M.; Golden, D.C.; Buol, S.W.; Weed, S.B.; Bowen, L.H. Iron oxide mineralogy of well-drained ultisols and oxisols: II. Influence on color, surface area, and phosphate retention. **Soil Science Society of America Journal**, v. 42, p. 825-830, 1978.
- Boardman, J.W.; Huntington, J.F. Mineral mapping with 1995 AVIRIS data. In: Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, 6., Pasadena, March 4-8, 1996. **Summaries.**, NASA.JPL, v.1, p.9-12. (JPL Publication 96-4).
- Bowers, S.A.; Hanks, R.J. Reflection of radiant energy from soils. **Soil Science**, v. 100, n. 2, p. 130-138, 1965.

Camargo, O.A. de; Moniz, A.C.; Jorge, J.A.; Valadares, J.M. **Métodos de análise química, mineralogia e física de solos do IAC**. Campinas, Instituto Agranômico de Campinas, 1986, 94 p. (IAC. Boletim Técnico, 106).

Chrien, T.G.; Green, R.O.; Eastwood, M.L. Accuracy of the spectral and radiometric laboratory calibration of the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS). In: Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, 2., Jun. 4-5, 1990. **Proceedings**. Pasadena: NASA.JPL, 1990. p. 1-14. (JPL Publication 90-54).

Chrien, T.G.; Green, R.O. Instantaneous field of view and spatial sampling of the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS). In: Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, 4., Oct. 25-29, 1993. **Summaries**. Pasadena: NASA.JPL, 1993. v.1, p.23-26. (JPL Publication 93-26).

Chrien, T.G.; Green, R.O.; Sarture, C.M.; Chovit, C.; Eastwood, M.L.; Eng, B.T. Airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS): recent improvements to the sensor. In: Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, 4., Pasadena, Oct. 25-29, 1993. **Summaries**. NASA.JPL, 1993. v.1, p.27-30. (JPL Publication 93-26).

Chrien, T.G.; Green, R.O.; Chovit, C.; Eastwood, M.L.; Faust, J.; Hajek, P.; Johnson, H.; Novack, H.I.; Sarture, C. New calibration techniques for the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS). In: Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, 5., Pasadena, Jan 23-26, 1995. **Proceedings**. NASA.JPL, 1995. v.1, p. 33-34. (JPL Publication 95-1).

Cipra, J.E.; Baumgardner, M.F.; Stoner, E.R; Macdonald, R.B. Measuring radiance characteristics of soil with a field spectroradiometer. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 35, p. 1014-1017, 1971.

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

Clark, R.N.; King, T.V.V.; Klejwa, M. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. B8, p. 12653-12680, 1990a.

Clark, R.N.; Gallagher, A.J.; Swayze, G.A. Material absorption band depth 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 (AVIRIS) Workshop, 2., Pasadena, June 4-5, 1990. **Proceedings**. NASA.JPL, 1990b, p.176-186. (JPL Publication 90-54).

Clark, R.N.; Swayze, G.A.; Gallagher, A.; Gorelick, N.; Kruse, F. Mapping with imaging spectrometer data using the complete band shape least-squares algorithm simultaneously fit to multiple spectral features from multiple materials. In: Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS), 3., Pasadena, May 20-21, 1991. **Proceedings**. NASA.JPL, 1991, p. 2-3. (JPL Publication 91-28).

Clark, R.N.; Swayze, G.A.; Heidebrecht, K.; Green, R.O.; Goetz, A.F.H. Calibration to surface reflectance of terrestrial imaging spectroscopy data: comparison of methods. In: Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, 5., Pasadena, Jan 23-26, 1995. **Summaries**. NASA.JPL, 1995. v.1, p.41-42. (JPL Publication 95-1).

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., Pasadena, Jan 23-26, 1995. **Summaries**. NASA.JPL, 1995. v. 1, p. 39-40. (JPL Publication 95-1).

Cloutis, E.A. Hyperspectral geological remote sensing: evaluation of analytical techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 12, p. 2215-2242, 1996.

Coleman, T.L.; Montgomery, O.L. Soil moisture, organic matter, and iron content effect on the spectral characteristics of selected vertisols and alfisols in Alabama. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 53, n. 12, p. 1659-1663, Dec. 1987.

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.

Coulson, K.L.; Reynolds, D.W. The spectral reflectance of natural surfaces. **Journal of Applied Meteorology**, v. 10, n. 6, p. 1285-1295, Dec. 1971.

Crósta, A.P. **Síntese sobre o método de correção atmosférica de Green et al. (1993)**, (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 10 jul. 1997).
Comunicação pessoal.

Crown, P.H.; Pawluk, S. Spectral signatures from selected soils in the Edmonton-Vereville area. In: Canadian Symposium on Remote Sensing, 2., Ontario, Canada, 1974. **Proceedings**. 1974, Ottawa: Campbell, v. 1, p. 450-462.

CSIRO Division of Exploration and Mining, the. ARIES-1 Applications Development Program (ADP). [Online]. <<http://aries@dem.csiro.au>>. Dec. 1997.

Curran, P.L. Remote sensing of foliar chemistry. **Remote Sensing of Environment**, v. 30, p. 271-278, 1989.

Davis, J.C. **Statistics and data analysis in geology**. New York, N.Y.: John Wiley & Sons, 1973. 550 p.

Demattê, J.A.M. **Relações entre dados espectrais e características físicas, químicas e mineralógicas de solos desenvolvidos de rochas eruptivas**. Piracicaba. 265 p. Tese (Doutorado em Solos) - Universidade de São Paulo/ESALQ, 1995.

Dixon, J.B. Quantitative analysis of kaolinite and gibbsite in soils by differential thermal and selective dissolution methods. In: Clays and Clay Minerals Conference, 14. **Proceedings**. New York: Pergamon Press. 1966. p. 82-9.

Drury, S.A. **Image interpretation in geology**. London: Chapman & Hall, 1993, 283 p., Cap. 1: Electromagnetic radiation and materials, p. 6-14, Cap. 5: Digital image processing, p. 124-149.

Dungan, J.; Johnson, L.; Billow, C.; Matson, P.; Mazzurco, J.; Moen, J.; Vanderbilt, V. High spectral resolution reflectance of douglas fir grown under different fertilization treatments: Experiment design and treatment effects. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, n. 2, p. 217-228, 1996.

Dwyer, J.L.; Kruse F.A.; Lefkoff, A.B. Effects of empirical versus model-based reflectance calibration automated analysis of imaging spectrometer data: a case study from the Drum Mountains, Utah. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 61, n. 10, p. 1.247-1.254, Oct. 1995.

Elvidge, C.D. Reflectance characteristics of dry plant materials. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 21., Ann Arbor, MI, Oct. 26-30, 1987. **Proceedings**. Ann Arbor: ERIM, 1987, p.721-733.

Elvidge, C.D. Vegetation reflectance features in AVIRIS data. In: Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, 6. Houston, Texas, USA, May 16-19, 1988. **Proceedings**., 1988a, p. 169-182.

Elvidge, C.D. Examination of the spectral features of vegetation in 1987 AVIRIS data. In: Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Performance Evaluation Workshop, 1., Pasadena, 1988. **Proceedings**. NASA.JPL, 1988b. p. 97-101. (JPL Publication 88-39).

Elvidge, C.D.; Mouat, D.A. Analysis of green vegetation detection limits in 1988 AVIRIS data. In: Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, 7. Calgary, Alberta, Canada, Oct. 2-6, 1989. **Proceedings**., Ann Arbor: ERIM, 1989, p. 791-800.

Elvidge, C.D. Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plants materials. **International Journal of Remote Sensing**, v.11, n.10, p.1775-1795, 1990.

Elvidge, C.D; Portigal, F.P. Change detection in vegetation using 1989 AVIRIS data.

Proceedings. Bellingham, Wash. SPIE, 1990, p. 178-1989. (SPIE, 1298).

Elvidge, C.D; Chen, Z.; Groeneveld, D.P. Detection of trace quantities of green

vegetation in 1990 AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, n. 2/3, p. 271-279, May-June 1993.

ENVI. **Tutorial - versão 3.** Lafayette, Dec. 1997.

Epiphanyo, 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).

Feldman, S.C.; Taranik, J.V. Identification of hydrothermal alteration assemblages using Airborne Imaging Spectrometer data. In: Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop, 2., Pasadena, May 6-8, 1986. **Proceedings.** NASA.JPL, 1986. p.96-101. (JPL Publication 86-35).

Formaggio A.R.; Epiphanyo J.C.N.; Valeriano, M.M.; Oliveira, J.B. Comportamento espectral (450-2.450 nm) de solos tropicais de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 467-474, 1996.

Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística/Secretaria de Planejamento e Coordenação da Presidência da República do Brasil (FIBGE/SEPLAN/BR). **Folha SE - 22-Y-C-IV Ribeirão Salgado (MT)**; carta projeção universal transversa de mercator. Rio de Janeiro, 1978. (Escala 1:100.000).

Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística/ Secretaria de Planejamento e Coordenação Geral do Mato Grosso do Sul (FIBGE/SEPLAN/MS).

Macrozoneamento geoambiental do Estado de Matogrosso do Sul. Campo Grande, MS. SEPLAN, 1988.

Fundação Instituto de Apoio ao Planejamento do Mato Grosso do Sul (FIPLAN/MS).

Estudos integrados do potencial de recursos naturais do Estado de Mato Grosso do Sul/solos. Campo Grande, MS, 1989a.

Fundação Instituto de Apoio ao Planejamento do Mato Grosso do Sul (FIPLAN/MS).

Estudos integrados do potencial de recursos naturais do Estado de Mato Grosso do Sul/vegetação. abril 1989b.

Galvão, L.S. **Litoestratigrafia de reflectância espectral e uma abordagem**

quantitativa para análise de espectros. São Paulo. 181 p. Tese (Doutorado em Geofísica) - Universidade de São Paulo/IAG, 1994.

Galvão, L.S.; Vitorello, I., Formaggio, A.R. Relationships of spectral reflectance and color among surface and subsurface horizons of tropical soil profiles. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, n. 1, p. 24-33, 1997.

Galvão, L.S.; Vitorello, I. Variability of laboratory measured soil lines of soils from Southeastern Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 63, n. 2, p. 166-181, Feb. 1998.

Galvão, L.S., Vitorello, I.; Almeida Filho, R. Effects of band positioning and bandwidth on NDVI measurements of tropical savanas. **Remote Sensing of Environment**, v. 67, n.2, p. 181-193, Feb. 1999.

Gamon, J.A.; Field, C.B.; Roberts, D.A.; Ustin, S.L.; Valentini, R. Functional patterns in an annual grassland during an AVIRIS overflight. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, n. 2/3, p. 239-253, May/June 1993.

Gao, Bo-Cai; Goetz, A.F.H. Column atmospheric water vapor and vegetation liquid water retrievals from airborne imaging spectrometer data. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D4, p. 3549-3564, Mar. 20 1990.

Gao, Bo-Cai; Goetz, A.F.H.; Zamudio, J.A. Removing atmospheric effects from AVIRIS data for surface reflectance retrievals. In: Proceedings of the Third Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS), 3. Pasadena, May 20-21, 1991. **Proceedings**. NASA.JPL, 1991. p.80-86. (JPL Publication 91-28).

GARMIN. **Owner's manual & reference**. Kansas, USA. 1996.

GER Geophysical Environmental Research (GER). **Mark V dual field of view IRIS manual**. New York,1990. 147 p.

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

Gong, P.; Pu, R.; Yu, B. Conifer species recognition: an exploratory analysis of *In Situ* hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, v.62, n. 2, p.189-200, Mar. 1997.

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, May 20-21, 1991. **Proceedings**. NASA.JPL, 1991. p. 200-210. (JPL Publication 91-28)

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. In: SPIE. Imaging Spectrometry of the Terrestrial Environment. Bellingham, Wash: SPIE, 1993. p. 2-11. (SPIE Proceeding, v. 1937)

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.; Solis, M.; Olah, M.R.; Williams, O. Imaging spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). **Remote Sensing of Environment**, v. 65, n. 3, p. 227-248, Set. 1998.

Henderson, T.L.; Baumgardner, M.F.; Franzmeier, D.E.; Stott, D.E.; Coster, D.C. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, v. 53, n. 3, p. 865-872, 1992.

Hoffer, R.M.; Johannsen, C.J. Ecological potentials in spectral signature analysis. In: Johnson, P.L. ed. **Remote sensing in ecology**. Athens: Univ. of Georgia Press, 1969, cap. 1, p. 1-16.

Hook, S.J.; Grove, C.I.; Paylor II, E.D. The JPL spectral library 0.4 to 2.5 micrometers. In: Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, 3., Pasadena, Jun. 1-5, 1992. **Summaries**. NASA.JPL, 1992. v. 1, p. 152-153. (JPL Publication 92-14).

- Huete, A.R. Extension of soil spectra to the satellite: atmosphere, geometric, and sensor considerations. **Photo-Interprétation**, n. 1996, p. 101-114, Oct. 1996.
- 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.
- Hunt, G.R.; Salisbury, J.W; Lenhoff, C.J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III. Oxides and hydroxides. **Modern Geology**, v. 2, p. 195-205, 1971.
- Hunt, G.R.; Salisbury, J.W; Lenhoff, C.J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: VI. Additional silicates. **Modern Geology**, v. 2, p. 85-106, 1973.
- Hunt, G.R.; Salisbury, J.W; Lenhoff, C.J. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: IX. Basic and ultrabasic igneous rocks. **Modern Geology**, v. 5, p. 15-22, 1974.
- Hunt, G.R.; Salisbury, J.W. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: XI. sedimentary rocks. **Modern Geology**, v. 5, p. 211-217, 1976a.
- Hunt, G.R.; Salisbury, J.W. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: XII. metamorphic rocks. **Modern Geology**, v. 5, p. 219-228, 1976b.
- Hunt, G.R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. **Geophysics**, v. 44, n. 3, p. 501-513, Apr. 1977.

Hunt, G.R. Electromagnetic radiation: the communication link in remote sensing. In: Siegal, D.S.; Gillespie, A.R. (eds.). **Remote sensing in geology**. New York, NY:John Wiley, 1980. cap. 2, p. 5-45.

Hurcom, S.J.; Harrison, A.R.; Taberner, M. Factor analysis of semi-arid vegetation response using AVIRIS and airborne video data. In: International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Strasbourg, France, 1. 11-15 Sep., 1994, v. II. **Proceedings**. p. 424-436.

Jackson, M.L. **Soil chemical analysis: advance course**. Madison, Wisconsin University, 1969. 895 p.

Jackson, R.D.; Teillet, P.M.; Slater, P.N.; Fedosejevs, G.; Jasinski, M.F.; Aase, J.K.; Moran, M.S. Bidirectional measurements of surface reflectance for view angle corrections of oblique imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 32, n. 2/3, p. 189-202, May-June 1990.

Jackson, R.D.; Clarke, T.R.; Moran, M.S. Bidirectional calibration results for 11 spectralon and 16 BaSO₄ reference reflectance panels. **Remote Sensing of Environment**, v. 40, n. 3, p. 231-239, 1992.

Johnson, L.F.; Hlavka, C.A.; Peterson, D.L. Multivariate analysis of AVIRIS data for canopy biochemical estimation along the Oregon transect. **Remote Sensing of Environment**, v. 47, n. 2, p. 216-230, 1994.

Karmanov, I.I. Study of soils from the spectral composition of reflected radiation. **Soviet Soil Science**, n. 4, p. 34-37, 1970.

Krishnan, P.; Alexander, J.D.; Butler, B.J; Hummel, J.W. Reflectance technique for predicting soil organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 6, p. 1282-1285, Nov.-Dec. 1980.

Kruse, F.A.; Clark, R.N. Atmospheric-water absorption features near 2.2 micrometers and their importance in high spectral resolution remote sensing. In: Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop, 2., May 6-8, Pasadena, 1986. **Proceedings**. NASA.JPL, 1986, p. 63-73. (JPL Publication 86-35).

Kruse, F.A. Mapping by hydrothermally altered rocks in the northern grapevine mountains, Nevada and California with the Airborne imaging spectrometer. In: Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop, 3., Pasadena, June 2-4, 1987. **Proceedings**. NASA.JPL, Aug. 15, 1987, p. 148-166. (JPL Publication 87-30).

Kruse F.A.; Kierein-Young, K.S.; Boardman, J.W. Mineral mapping at Cuprite, Nevada with a 63-Channel Imaging Spectrometer. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 61, n. 1, p. 83-93, 1990.

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**, v. 44, n. 2/3, p. 145-163, May/June 1993a.

Kruse, F.A.; Lefkoff, A.B.; Dietz, J.B. Expert system based mineral mapping in Northern Death Valley, California/Nevada, using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). **Remote Sensing of Environment**, v. 44, n. 2/3, p. 309-336, May/June 1993b.

- LaCapra, V.C.; Melack, J.M.; Gastil, M.; Valeriano, D. Remote sensing of foliar chemistry of inundated rice with imaging spectrometry. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, n. 1, p. 309-336, Jan. 1996.
- Labsphere. **Calibration certificate (for a spectralon standard)**. North Sutton, 1991.
- Lawrence, W.T.; Williams, D.L.; Ranson, K.J. Comparative analysis of radiance data from AVIRIS, ASAS, and a helicopter-borne spectroradiometer. In: Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, 3., Pasadena, May 20-21, 1991. **Proceedings**. NASA.JPL, 1991. p. 33-42. (JPL Publication 91-28).
- Leprieur, C.; Carrere, V.; Gu, X.F. Atmospheric corrections and ground reflectance recovery for Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) data: MAC Europe'91. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 61, n. 10, p. 1233-1238, 1995.
- Lee, J.B.; Woodyatt, S.; Berman, M. Enhancement of high spectral resolution remote-sensing data by a noise-adjusted principal components transform. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 3, p. 295-304, May 1990.
- Lindberg, J.D.; Snyder, D.G. Diffuse reflectance spectra of several clay minerals. **American Mineralogist**, v. 57, p. 485-493, p. 1972.
- Martin, M.E.; Aber, J.D. High spectral resolution remote sensing of forest canopy lignin, nitrogen, and ecosystem processes. **Ecological Applications**, v. 6, n. 2, p. 431-443, 1997.

- Mathews, H.L.; Cunningham, R.L.; Petersen, G.W. Spectral reflectance of selected Pennsylvania Soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 37, p. 421-424, 1973.
- Mato Grosso do Sul. Secretaria de Planejamento e Coordenação Geral do Estado do Mato Grosso do Sul (MS.SEPLAN). **Referencial de Acesso Rodoviário em Mato Grosso do Sul**. 1990.
- Microcal Origin. **Professional graphics software – versão 5.0**. 1997.
- Milton, E.J. Principles of field spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 12, p. 1807-1827, 1987.
- Montgomery, O.L. **The effects of the physical and chemical properties of soil on the spectral reflectance of soils**. West Lafayette. 110 p. Master (Degree) – Purdue University, 1974.
- Mustard, J.F.; Pieters, C.M. Abundance and distribution of mineral components associated with mouses rock (kimberlite) diatreme. In: Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop, 2., Pasadena, May 6-8, 1986. **Proceedings**. NASA.JPL, 1986. p.81-85. (JPL Publication 86-35).
- Mustard, J.F. Relationships of soil, grass, and bedrock over the Kaweah Serpentinite Melange through spectral mixture analysis of AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**. v. 44, n. 2/3, p. 293-308, May/June 1993.

- Myers, V.I.; Allen, W.A. Electrooptical remote sensing methods as nondestructive testing and measuring techniques in agriculture. **Applied Optics**, v. 7, n. 9, p. 1819-1838, Sep. 1968.
- Nicodemus, F.E.; Richmond, J.C.; Hsia, J.J.; Ginsberg, I.W.; Limperis, T. **Geometrical considerations and nomenclature for reflectance**. West Lafayette, Indiana, U.S. Department of Commerce, 1977. 52 p. (NBS Monograph 160).
- Novo, E.; Gastil, M.; Melack, J. An algorithm for chlorophyll using first difference transformations of AVIRIS reflectance spectra. In: Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, 5., Pasadena, Jan 23-26, 1995. **Summaries**. NASA.JPL, 1995. v. 1, p. 121-124. (JPL Publication 95-1).
- Palacios-Orueta, A.; Ustin, S.L. Multivariate statistical classification of soil spectra. **Remote Sensing of Environment**, v. 57, n. 2, p. 108-118, Aug. 1996.
- Pizarro, M.A.; Epiphanyo, J.C.N.; Galvão, L.S. Identificação de minerais em solos tropicais a partir de dados hiperespectrais do sensor AVIRIS. [CD-ROM]. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 9., Santos, 1998. **Anais.**, São Paulo: Imagem Multimídia, 1998. Seção de Radiometria.
- Porter, W.M.; Enmark, H.T. A system overview of the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). In: Imaging Spectroscopy II. Bellingham, Wash: SPIE, 1987. p.22-31 (SPIE Proceedings, v. 834).

Porter, W.M; Chrien, T.G.; Hansen, E.G.; Sarture, C.M. Evolution of the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) flight and ground data processing system. In: SPIE. Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, 2., Pasadena, June 4-5, 1990. **Proceedings**. NASA.JPL, Nov. 15, 1990. p. 271-277. (JPL Publication. 90-54).

Price, J.C. Estimating leaf area index from satellite data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 31, n. 3, p. 727-734, May 1993.

Projeto RADAMBRASIL. **Folha SE22-Y-C Alto Sucuriú/Goiás**; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1983. (Escala 1:1.000.000).

Projeto RADAMBRASIL. **Folha SE22YC Alto Sucuriú**; carta exploratória de uso de solos. Rio de Janeiro, 1987. (Escala 1:250.000).

Raij, B. van; Quaggio, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1983, 40 p. (IAC. Boletim Técnico, 81)

Resende, M.; Curi, N.; Santana, D.P. **Pedologia e fertilidade do solo: interações e aplicações**. Brasília, ME/ ESAL/ POTAFOS, 1988. 83p.

Resmini, R.G; Kappus, M.E.; Aldrich, W.S.; Harsanyi, J.C.; Anderson, M. Mineral mapping with Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment (HYDICE) sensor data at Cuprite, Nevada, U.S.A. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 7, p. 1553-1570, May 1997.

Richards, J.A. **Remote sensing digital image analysis**. Berlin. Germany: Springer-Verlag, 1986, 281 p.

Roberts, D.A.; Yamaguchi, Y.; Lyon, R.J.P. Comparison of various techniques for calibration of AIS data. In: Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop, 2., Pasadena, May 6-8, 1986. **Proceedings**. NASA/JPL, 1986, p. 81-85. (JPL Publication 86-35).

Roberts, D.A.; Smith, M.O.; Sabol, D.E.; Adams, J.B.; Ustin, S. Mapping the spectral variability in photosynthetic and non-photosynthetic vegetation, soils and shade using AVIRIS. In: Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, 3., Pasadena, June 1-5, 1992, v.1. **Workshop**. NASA/JPL, 1992. p. 38-40. (JPL Publication 92-14).

Roberts, D.A.; Smith, M.O.; Adams, J.B. Green vegetation, nonphotosynthetic vegetation, and soils in AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, n. 2/3, May/June, p. 255-269, 1993.

Roberts, D.A.; Green, R.O.; Adams, J.B. Temporal and spatial patterns in vegetation and atmospheric properties from AVIRIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 62, n. 3, p.223-240, Dec. 1997.

Roberts, D.A.; Gardner M.; Church, R.; Ustin, S.; Scheer G.; Green, R.O. Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, v. 65, n. 3, p. 267-279, Sept. 1998.

- Rock, B.N.; Williams, D.L.; Moss, D.M.; Lauten, G.N.; Kim, M. High-spectral resolution field and laboratory optical reflectance measurements of red spruce and eastern hemlock needles and branches. **Remote Sensing of Environment**, v.47, n. 2, p. 176-189, 1994.
- Rondeaux, G.; Steven, M.; Baret, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, n. 2, p. 95-107, Feb. 1996.
- SCAR-B. **Field Mission Report**. Hampton, VA, Oct. 1996.
- Schreier, H. Quantitative predictions of chemical soil conditions from multispectral airborne, ground and laboratory measurements. In: Canadian Symposium on Remote Sensing, 4., May 1-18, 1977. **Proceedings**. Ottawa, May, 1977, p. 106-112.
- Silva Filho, P.N.: **Processos e erros na determinação do fator de reflectância bidirecional e de outras grandezas radiométricas**. São José dos Campos. (INPE-5386-TDI/475). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Abr. 1992, 141 p.
- Singhroy, V.H.; Kruse, F.A. Detection of metal stress in boreal forest species using the 670 nm chlorophyll absorption band. In: Eighth thematic conference on geologic remote sensing, 24., Denver, Colorado, Apr. 29 - May 2, 1991. **Proceedings**. p. 361-372.

- Smith, M.O.; Johnson, P.E.; Adams, J.B. Quantitative determination of mineral types and abundances from reflectance spectra using principal components analysis. In: Lunar and Planetary Science Conference, 5., Part 2, Journal of Geophysical Research, V. 90 B Supplement, Houston, Texas, March 1984. **Proceedings**. Feb. 15, 1985, p. B797-B804.
- Sommer, S.; Lörcher, G.; Endres, S. Application of MAC-Europe AVIRIS data to the analysis of various alteration stages in the landmannalaugar hydrothermal area (South Iceland). In: Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, 4., Pasadena, Oct. 25-29, 1993. **Summaries**. NASA.JPL, 1993. v. 1, p. 165-168. (JPL Publication 93-26).
- SPSS. **Professional Statistics Software – versão 6.0**. 1993.
- Steffen, C.A. **Reflectância**. São José dos Campos: INPE, ago. 1995. 11 p. (INPE-5638-PUD/070).
- Steffen, C.A.; Moraes, E.C.; Gama, F.F. Radiometria óptica espectral: Tutorial. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8. Salvador, 14-19 abril, 1996. **Anais**. São José dos Campos, INPE/SELPER, 1996. v. 1, p. 1 - 17.
- Stoner, E.R.; Baumgardner, M.F. **Physicochemical, site, and bidirecional reflectance factor characteristics of uniformly moist soils**. West Lafayette, Purdue University, 1980. (LARS Technical Report 111679).
- Stoner, E.R.; Baumgardner, M.F., Biehl, L.L.; Robinson, B.F. **Atlas of soil reflectance properties**. West Lafayette, Purdue University, May 1980. 75 p. (Research Bulletin 962).

Stoner, E.R.; Baumgardner, M.F. Characteristic variations in reflectance of surface soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, n. 6, p. 1161-1165, Nov.-Dec. 1981.

van Leeuwen, W.J.D.; Huete, A.R. Effects of standing litter on the biophysical interpretation of plant canopies with spectral indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, n. 2, p. 123-138, 1996.

Vane, G.; Goetz, A.F.H. Terrestrial imaging spectroscopy: current status, future trends. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, n. 2/3, p. 117-126, May/June 1993.

Vitorello, I.; Galvão, L.S.; Epiphanyo, J.C.N.; Formaggio, A.R.; Valeriano, M.M.; Principal components analysis of reflectance spectra of soils from southeastern Brazil; In: International Colloquium on Spectra Properties of Soils and Rocks, La Serena, Chile; 24-27 Abr., 1994. **Proceedings.**, Chile: ORSTOM, 1995. p. 95-99.

APÊNDICE A

PARÂMETROS UTILIZADOS NO MODELO DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA MODTRAN 3 (GREEN ET AL., 1993)

O método é composto por 4 programas, que são aplicados à imagem original (fornecida em radiância pelo JPL) de forma seqüencial: o resultado de um serve de entrada (*input*) para o próximo programa. Esses programas são:

h2olut0

Este programa trata-se do MODTRAN3, que é rodado 12 vezes, para 12 diferentes quantidades de vapor de água.

Parâmetros:

qmodtran model: (1 = tropical); (2 = mid lat summer); (7 models in total)

1*

type of atmospheric path: (2 =; sol->terreno -> avião)

2

mode of execution (2 = radiance mode)

2

scattering mode (1=multiple scattering)

1

problem boundary temperature in kelvin (0=default profile) (change parameter for 'hot fire')

0

spectral reflectance file name (not crucial) (it is not MODTRAM stand alone) (25 -> fixed for water vapour calculation)

25.rfl

discrete ordinate scattering (1 = yes), number of streams (parameter has been turned off!)

0.4

updated solar irradiance (1 = yes)), cm^{-1} resolution

1.5

background amount of gasesto be used in the model

H ₂ O	0.50
CO ₂	1.06
O ₃	1.00
N ₂ O	1.00
CO	1.00
CH ₄	1.00
O ₂	1.00
NO	1.00
SO ₂	1.00
NO ₂	1.00
NH ₃	1.00
HNO ₃	1.00

aerosol model (0 = none; 1 = rural => 23km; 2,3,4,5,6,7,8,9,10) (default 23 km; 15km would be better for smoky environments)

1

volcanic stratospheric aerosols (0.1 = background; 2 = background; 8 = extreme) (it is worthy to investigate if any major recent volcanic eruption has occurred around the world before choosing the right parameter)

1

visibility (horizontal visibility) (0 = default, > 0=units are in km: 10 km, 25km, 50km, 100km)

25

ground altitude in km (an average value is needed) (anything within 5km is fine) (use information from GPS or preferably topographic maps) (

1

platform, ground elevation (km), observation angle (180)

20, 0.607 (sub-cena4), **0.573**(sub-cena 5), **0.528** (sub-cena 6), **0,525** (sub-cena 7), **180**

path (long = 1, short = 0)

0

day, month, year (data from JPL mission in Brazil)

20 08 95

latitude (data from JPL mission in Brazil)

-19 54 51 (sub-cena4)**

-19 54 51 (sub-cena 5)

-19 54 51 (sub-cena 6)

-19 54 51 (sub-cena 7)

longitude (data from JPL mission in Brazil)

53 42 51 (sub-cena 4)

53 47 25 (sub-cena 5)

53 52 51 (sub-cena 6)

53 57 29 (sub-cena 7)

time (data from JPL mission in Brazil)

14 40 30 (sub-cena 4)

14 41 30 (sub-cena 5)

14 42 30 (sub-cena 6)

14 43 30 (sub-cena 7)

observation azimuth

0

start, end, delta, fwhm wave number

4000,2700, 8 4

spectral calibration file (specific for each year!)

950509.spc

water vapor interval in percent (states how many times MODTRAM will run within a interval)

h2olut.int

output vapor interval value in atm cm

h2olutnbrz

h2ospl0

Este programa é utilizado para corrigir eventuais deslocamentos (*shifts*) nas posições das bandas do AVIRIS; toma os 12 diferentes valores de vapor de H₂O e os interpola através de uma função *spline*; este programa produz uma série de imagens (na forma de “bandas”), das quais a terceira é uma função do vapor d’água presente na cena (em níveis de cinza: quanto maior a concentração de vapor d’água, mais alto o DN do pixel). O h2osplnbrz.in é o arquivo exemplo de entrada (*input*) para o programa h2ospl0.

Parâmetros:

wavelengths shifts A,B,C,D spectrometers (spectrometer B moves more (0.5 => 1.0))

0,0,3,0,0

fwhm change A,B,C,D spectrometers

0,0,0,0

water vapor intervals

h2olutnbrz (file produced by early program => h2olut0)

water vapor spilened range

1,3000,3 (1 = ?; 3000 =? (in very humid environements use 4000); 3 = atm/cm)

spectral calibration file

950509.spc

output spectral calibartion file

h2osplnbrz.spc (file produced with the shift)

channels to spline over

1,224 (use all the 224 channels)

input wavelengths

h2olutnbrz.wvl (file produced by early program => h2olut0)

input path radiance

h2olutnbrz.pth

input reflectance radiance

h2olutnbrz.rfl

output path radiance

h2osplnbrz.pth

output reflected radiance

h2osplnbrz.rfl

output test of output versus water (file used mostly for debugging) (check radiance (L) x water vapor data on a Excel spreadsheet)

h2osplnbrz.twtr

output test of output versus wavelength (file used mostly for debugging) (check water vapor x wavelength data on a Excel spreadsheet)

h2osplnbrz.twvl

vlsfit0

Este programa calcula as imagens de H₂O nas formas sólida, líquida e vapor. O vlsfitnbrz.in é o arquivo exemplo de entrada (*input*) para o programa h2ospl0

Parâmetros:

number of lines, samples, channels, radiance factor

1024,614,224,500,1

input image (image sensu stricto) (bip = band interleaved per pixel) (bil = band interleave per line)

/d1/950816r5s7_8.braz.bip

output image

nbrz.vls

spectral calibration file

h2osplnbrz.spc

dark signal file

0.drk

radiometric calibration coefficients

1.rcc

1.gain

1.clb

inflight calibration file

1.clb

inflight calibration obc file

1.clb

obc file

1.clb

liquid water absorption

wtrabs94.flt (optical properties)

solid water absorption

iceabs94.flt

water vapor range

1,3000,3 (same as used in the early h2ospl0_spline program)

water vapor to elevation file

wtr.mtr

band continua => vapor, liquid, solid centers

865,935,970,1025,1085

path radiance libraries (output)

h2osplnbrz.pth

reflected radiance libraries (output)

h2osplnbrz.rfl

starting line, sample, ??, 1= no ice, ??

1,1,1,1,20 (for Brazilian data, calculation will run pretty fast as there is no ice involved)

fit test (check data on Excel spreadsheet => measured water vapor x modelled water vapor)

vlsfitnbrz.fit

NDVI test (check data on Excel spreadsheet => NDVI x water vapor) (for instance, NDVI and water vapor do not correlate well in places close to a forest)

vlsfitnbrz.ndv

vlsfit output bands

band 1: average intensity (background brightness)

band 2: spectral slope

band 3: water vapor (microns x 10)

band 4: liquid water (emphasis on vegetation that appears bright)

band 5: ice lit water (solid water)

band 6: resid x 10^5 (error in the fit)

band 7: NDVI 1000 * (nir - red) / (nir + red)

band 8: equivalent elevation for standard atmosphere (water vapor x topography)

band 9: 940 nm band (radiance for 940nm region)

band 10: 870 nm band (radiance for 940nm region)

rfl0

Este programa produz as bandas corrigidas para reflectância aparente na superfície e o rfl.fl.50a.in é o arquivo exemplo de input para o programa h2ospl0.

CONVOLUÇÃO DA RESPOSTA ESPECTRAL DO SENSOR

Gerar um arquivo ASCII das funções de resposta espectral do sensor desejado a partir da digitalização das curvas a cada 5-10 nm

Analisar os seguintes arquivos:

cnvimg0.f

modis.spc => formato do MODIS (o formato é o mesmo para qualquer outro sensor)

wavelength	response	band	
.	.	1	
.	.	1	
.	.	1	
.	-10	----- 1	-----> necessário para o programa
		2	saber que mudou-se a banda

Antes de aplicar o modelo de transferência radiativa MODTRAN3 as sub-cenas (4, 5, 6 e 7) foram todas convertidas do formato *.bil para o formato *.bip, utilizando o *software* ENVI.

* - em **negrito e itálico** foram os parâmetros finais utilizados no modelo de transferência radiativa modtran valores finais utilizados nas correções.

** o modelo foi aplicado individualmente em cada sub-cena.

APÊNDICE B

**TABRELA B1 - DADOS DE CALIBRAÇÃO ESPECTRAL DO SENSOR AVIRIS
PARA A TEMPORADA REALIZADA EM 1995**

BANDAS	COMPRIMENTO DE ONDA** (nm)	LARGURA DE BANDA (FWHM)** (nm)	BANDAS	COMPRIMENTO DE ONDA (nm)	LARGURA DE BANDA (FWHM) (nm)
Banda 1*	383,15	9,77	Banda 41	739,92	8,63
Banda 2	392,84	9,79	Banda 42	749,51	8,65
Banda 3	402,54	9,81	Banda 43	759,09	8,67
Banda 4	412,25	9,82	Banda 44	768,68	8,69
Banda 5	421,98	9,82	Banda 45	778,27	8,7
Banda 6	431,71	9,83	Banda 46	787,87	8,72
Banda 7	441,46	9,83	Banda 47	797,46	8,74
Banda 8	451,22	9,83	Banda 48	807,05	8,76
Banda 9	460,99	9,82	Banda 49	816,65	8,77
Banda 10	470,76	9,81	Banda 50	826,25	8,79
Banda 11	480,55	9,81	Banda 51	835,85	8,8
Banda 12	490,34	9,8	Banda 52	845,45	8,82
Banda 13	500,14	9,79	Banda 53	855,05	8,83
Banda 14	509,95	9,77	Banda 54	864,65	8,85
Banda 15	519,76	9,76	Banda 55	874,25	8,86
Banda 16	529,58	9,75	Banda 56	883,85	8,88
Banda 17	539,4	9,74	Banda 57	893,46	8,89
Banda 18	549,23	9,73	Banda 58	903,06	8,9
Banda 19	559,07	9,73	Banda 59	912,67	8,92
Banda 20	568,9	9,72	Banda 60	922,27	8,93
Banda 21	578,74	9,72	Banda 61	931,88	8,94
Banda 22	588,58	9,72	Banda 62	941,49	8,95
Banda 23	598,43	9,72	Banda 63	951,09	8,96
Banda 24	608,27	9,72	Banda 64	960,7	8,97
Banda 25	618,11	9,73	Banda 65	970,31	8,98
Banda 26	627,96	9,75	Banda 66	979,92	8,99
Banda 27	637,8	9,76	Banda 67	989,53	9
Banda 28	647,65	9,79	Banda 68	999,13	9,01
Banda 29	657,49	9,82	Banda 69	1008,7	9,02
Banda 30	667,33	9,85	Banda 70	1018,3	9,03
Banda 31	677,17	9,89	Banda 71	1028	9,04
Banda 32	687	9,94	Banda 72	1037,6	9,05
Banda 33	663,3	8,46	Banda 73	1047,2	9,06
Banda 34	672,87	8,49	Banda 74	1056,8	9,06
Banda 35	682,44	8,51	Banda 75	1066,4	9,07
Banda 36	692,02	8,53	Banda 76	1076	9,08
Banda 37	701,59	8,55	Banda 77	1085,6	9,08
Banda 38	711,17	8,57	Banda 78	1095,2	9,09
Banda 39	720,75	8,59	Banda 79	1104,8	9,09
Banda 40	730,34	8,61	Banda 80	1114,4	9,1

(continua)

TABELA B1 - CONTINUAÇÃO

BANDAS	COMPRIMENTO DE ONDA (nm)	LARGURA DE BANDA (FWHM) (nm)	BANDAS	COMPRIMENTO DE ONDA (nm)	LARGURA DE BANDA (FWHM) (nm)
<i>Banda 81</i>	<i>1124</i>	<i>9,1</i>	Banda 127	1551,7	10,41
<i>Banda 82</i>	<i>1133,6</i>	<i>9,11</i>	Banda 128	1561,6	10,41
<i>Banda 83</i>	<i>1143,2</i>	<i>9,11</i>	Banda 129	1571,6	10,4
<i>Banda 84</i>	<i>1152,8</i>	<i>9,11</i>	Banda 130	1581,5	10,4
<i>Banda 85</i>	<i>1162,4</i>	<i>9,12</i>	Banda 131	1591,5	10,39
Banda 86	1172	9,12	Banda 132	1601,4	10,39
Banda 87	1181,6	9,12	Banda 133	1611,4	10,38
Banda 88	1191,2	9,12	Banda 134	1621,3	10,38
Banda 89	1200,8	9,12	Banda 135	1631,3	10,37
Banda 90	1210,4	9,13	Banda 136	1641,2	10,37
Banda 91	1220	9,13	Banda 137	1651,2	10,36
Banda 92	1229,6	9,13	Banda 138	1661,2	10,36
Banda 93	1239,2	9,13	Banda 139	1671,1	10,35
Banda 94	1248,8	9,13	Banda 140	1681,1	10,35
<i>Banda 95</i>	<i>1258,4</i>	<i>9,13</i>	Banda 141	1691	10,34
<i>Banda 96</i>	<i>1268</i>	<i>9,12</i>	Banda 142	1701	10,33
<i>Banda 97</i>	<i>1252,9</i>	<i>10,49</i>	Banda 143	1710,9	10,33
<i>Banda 98</i>	<i>1262,8</i>	<i>10,49</i>	Banda 144	1720,9	10,32
<i>Banda 99</i>	<i>1272,8</i>	<i>10,49</i>	Banda 145	1730,8	10,31
<i>Banda 100</i>	<i>1282,8</i>	<i>10,49</i>	Banda 146	1740,8	10,31
<i>Banda 101</i>	<i>1292,7</i>	<i>10,49</i>	Banda 147	1750,7	10,3
<i>Banda 102</i>	<i>1302,7</i>	<i>10,48</i>	<i>Banda 148</i>	<i>1760,7</i>	<i>10,29</i>
<i>Banda 103</i>	<i>1312,6</i>	<i>10,48</i>	<i>Banda 149</i>	<i>1770,6</i>	<i>10,29</i>
<i>Banda 104</i>	<i>1322,6</i>	<i>10,48</i>	<i>Banda 150</i>	<i>1780,6</i>	<i>10,28</i>
<i>Banda 105</i>	<i>1332,6</i>	<i>10,48</i>	<i>Banda 151</i>	<i>1790,5</i>	<i>10,27</i>
<i>Banda 106</i>	<i>1342,5</i>	<i>10,48</i>	<i>Banda 152</i>	<i>1800,5</i>	<i>10,27</i>
<i>Banda 107</i>	<i>1352,5</i>	<i>10,48</i>	<i>Banda 153</i>	<i>1810,4</i>	<i>10,26</i>
<i>Banda 108</i>	<i>1362,4</i>	<i>10,47</i>	<i>Banda 154</i>	<i>1820,4</i>	<i>10,25</i>
<i>Banda 109</i>	<i>1372,4</i>	<i>10,47</i>	<i>Banda 155</i>	<i>1830,3</i>	<i>10,24</i>
<i>Banda 110</i>	<i>1382,4</i>	<i>10,47</i>	<i>Banda 156</i>	<i>1840,3</i>	<i>10,24</i>
<i>Banda 111</i>	<i>1392,3</i>	<i>10,47</i>	<i>Banda 157</i>	<i>1850,2</i>	<i>10,23</i>
<i>Banda 112</i>	<i>1402,3</i>	<i>10,46</i>	<i>Banda 158</i>	<i>1860,2</i>	<i>10,22</i>
<i>Banda 113</i>	<i>1412,2</i>	<i>10,46</i>	<i>Banda 159</i>	<i>1870,1</i>	<i>10,21</i>
<i>Banda 114</i>	<i>1422,2</i>	<i>10,46</i>	<i>Banda 160</i>	<i>1880,1</i>	<i>10,2</i>
<i>Banda 115</i>	<i>1432,2</i>	<i>10,46</i>	<i>Banda 161</i>	<i>1880,4</i>	<i>9,76</i>
<i>Banda 116</i>	<i>1442,1</i>	<i>10,45</i>	<i>Banda 162</i>	<i>1890,4</i>	<i>9,76</i>
<i>Banda 117</i>	<i>1452,1</i>	<i>10,45</i>	<i>Banda 163</i>	<i>1900,5</i>	<i>9,76</i>
<i>Banda 118</i>	<i>1462</i>	<i>10,45</i>	<i>Banda 164</i>	<i>1910,6</i>	<i>9,76</i>
<i>Banda 119</i>	<i>1472</i>	<i>10,44</i>	<i>Banda 165</i>	<i>1920,6</i>	<i>9,76</i>
<i>Banda 120</i>	<i>1481,9</i>	<i>10,44</i>	<i>Banda 166</i>	<i>1930,6</i>	<i>9,75</i>
<i>Banda 121</i>	<i>1491,9</i>	<i>10,44</i>	<i>Banda 167</i>	<i>1940,7</i>	<i>9,75</i>
<i>Banda 122</i>	<i>1501,9</i>	<i>10,43</i>	<i>Banda 168</i>	<i>1950,7</i>	<i>9,75</i>
<i>Banda 123</i>	<i>1511,8</i>	<i>10,43</i>	<i>Banda 169</i>	<i>1960,8</i>	<i>9,75</i>
<i>Banda 124</i>	<i>1521,8</i>	<i>10,42</i>	<i>Banda 170</i>	<i>1970,8</i>	<i>9,74</i>
Banda 125	1531,7	10,42	<i>Banda 171</i>	<i>1980,8</i>	<i>9,74</i>
Banda 126	1541,7	10,42	<i>Banda 172</i>	<i>1990,8</i>	<i>9,74</i>

(continua)

TABELA B1 – CONCLUSÃO

BANDAS	COMPRIMENTO DE ONDA (nm)	LARGURA DE BANDA (FWHM) (nm)	BANDAS	COMPRIMENTO DE ONDA (nm)	LARGURA DE BANDA (FWHM) (nm)
<i>Banda 173</i>	<i>2000,9</i>	<i>9,73</i>	Banda 213	2399,7	9,49
<i>Banda 174</i>	<i>2010,9</i>	<i>9,73</i>	Banda 214	2409,6	9,48
<i>Banda 175</i>	<i>2020,9</i>	<i>9,73</i>	Banda 215	2419,6	9,47
Banda 176	2030,9	9,72	Banda 216	2429,5	9,46
Banda 177	2040,9	9,72	Banda 217	2439,4	9,45
Banda 178	2050,9	9,72	Banda 218	2449,3	9,44
Banda 179	2060,9	9,71	<i>Banda 219</i>	<i>2459,2</i>	<i>9,43</i>
Banda 180	2071	9,71	<i>Banda 220</i>	<i>2469,1</i>	<i>9,42</i>
Banda 181	2081	9,7	<i>Banda 221</i>	<i>2479</i>	<i>9,41</i>
Banda 182	2091	9,7	<i>Banda 222</i>	<i>2488,9</i>	<i>9,39</i>
Banda 183	2101	9,7	<i>Banda 223</i>	<i>2498,8</i>	<i>9,38</i>
Banda 184	2111	9,69	<i>Banda 224</i>	<i>2508,7</i>	<i>9,37</i>
Banda 185	2121	9,69			
Banda 186	2130,9	9,68			
Banda 187	2140,9	9,68			
Banda 188	2150,9	9,67			
Banda 189	2160,9	9,67			
Banda 190	2170,9	9,66			
Banda 191	2180,9	9,65			
Banda 192	2190,8	9,65			
Banda 193	2200,8	9,64			
Banda 194	2210,8	9,64			
Banda 195	2220,8	9,63			
Banda 196	2230,7	9,62			
Banda 197	2240,7	9,62			
Banda 198	2250,6	9,61			
Banda 199	2260,6	9,6			
Banda 200	2270,6	9,6			
Banda 201	2280,5	9,59			
Banda 202	2290,4	9,58			
Banda 203	2300,4	9,57			
Banda 204	2310,4	9,57			
Banda 205	2320,3	9,56			
Banda 206	2330,2	9,55			
Banda 207	2340,2	9,54			
Banda 208	2350,1	9,53			
Banda 209	2360	9,52			
Banda 210	2370	9,52			
Banda 211	2379,9	9,51			
Banda 212	2389,8	9,5			

* - os intervalos em negrito e itálico não foram utilizadas nos processamentos.

** - considerar duas casas decimais em todos os comprimentos de onda e intervalos espectrais.

APÊNDICE C

**TABELA C1 - PONTOS IDENTIFICADOS E GEO-REFERENCIADOS
VISITADOS DURANTE O TRABALHO DE CAMPO E PLOTADOS NA
FIGURA 3.3**

POINT2D			
INFO			
// Ponto 2D e Identificadores se Ponto Classificado			
// Arquivo ASCII gerado pelo Sistema SPRING-2.0/DPI/INPE			
// projeto tese1 plano de informacao pont_georef			
// categoria tematico modelo THEMATICMODEL			
// PONTOS GEOREFERENCIADOS DAS AMOSTRAS DE SOLOS COLETADAS DA CAMADA SUPERFICIAL			
// (0-20 cm) ENTRE OS DIAS 19/08/97 A 25/08/97 NA LINHA DE VOO IMAGEADA PELO			
// AVIRIS PARA AS SUB-CENAS 4, 5, 6 E 7 DO DIA 18/08/97 CAMPO GRANDE/MS			
// PRECISÃO NAS AQUISIÇÕES MAIS OU MENOS 100 m EM 2D, SEGUNDO ESPECIFICAÇÕES DO			
// FABRICANTE (GARMIN)			
DATUM	Hayford/Corrego A, 6378388.000000, 0.003367, -138.699997, 164.399994, 34.400002		
PROJECTION	UTM/Hayford/CorregoA, 0, 0.000000, -0.890118, 0.000000, 0.000000		
BOX	184000.000000, 240000.000000, 7784000.000000, 7804000.000000		
UNITS	metros		
SCALE	1,09E+09		
INFO_END			
IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS	COORDENADAS		
	x	y	
NAME "P1"	211266	7800143	
NAME "P3"	211501	7799051	
NAME "P6"	216477	7798963	
NAME "P29"	216060	7795865	
NAME "P37"	213158	7793982	
NAME "P38"	211980	7794632	
NAME "P39"	208752	7798974	
NAME "P40"	208211	7795812	
NAME "P44"	199365	7792915	
NAME "P47"	195654	7792574	
NAME "P54"	194712	7795207	
NAME "P63"	193861	7798552	
NAME "P67"	192148	7799247	
NAME "P70"	191846	7799960	
NAME "P73"	190959	7799093	
NAME "P77"	187019	7799260	
NAME "P86"	193301	7794201	
NAME "P93"	195170	7791505	
END			

APÊNDICE D

**TABELA D1 - COMPRIMENTOS DE ONDA UTILIZADOS NOS
PROCESSAMENTOS ESTATÍSTICOS E NA ANÁLISE DERIVATIVA**

COMPRIMENTOS			DE	ONDA (nm)		
AVIRIS_original	IRIS_original	VALORES APROXIMADOS		AVIRIS_original	IRIS_original	VALORES APROXIMADOS
460,99	460,5	461		1611,40	1612,7	1612
480,55	481,7	481		1631,30	1631,1	1631
500,14	499,3	500		1651,20	1649,6	1650
519,76	520,4	520		1671,10	1671,3	1671
539,40	539,5	540		1691,00	1690,0	1690
559,07	560,3	560		1710,90	1708,9	1710
578,74	579,2	580		1730,80	1731,1	1731
598,43	598,0	598		1750,70	1750,3	1750
618,11	618,3	618		2030,90	2031,6	2031
637,80	638,5	638		2050,90	2051,1	2051
657,49	658,5	658		2071,00	2070,6	2071
677,17	676,7	677		2091,00	2089,9	2090
692,02	691,4	692		2111,00	2109,2	2110
711,17	711,0	711		2130,90	2128,3	2130
730,34	730,3	730		2150,90	2152,2	2151
749,51	749,4	750		2170,90	2171,2	2171
768,68	768,4	768		2190,80	2190,1	2190
787,87	787,1	787		2210,80	2208,9	2210
807,05	807,1	807		2230,70	2232,4	2232
826,25	826,9	827		2250,60	2251,0	2251
845,45	845,0	845		2270,60	2269,7	2270
864,65	864,2	864		2290,40	2292,8	2293
883,85	883,2	883		2310,40	2311,3	2311
903,06	903,3	903		2330,20	2329,7	2330
922,27	921,7	922		2350,10	2348,0	2350
941,49	941,1	941		2370,00	2370,9	2370
960,70	960,2	960		2389,80	2389,1	2389
979,92	980,3	980		2409,60	2411,8	2411
999,13	999,8	1000		2429,50	2430,0	2430
1018,30	1017,7	1018		2449,30	2448,0	2448
1037,60	1037,6	1038				
1056,80	1055,8	1056				
1076,00	1074,6	1075				
1172,00	1172,5	1172				
1191,20	1189,9	1190				
1210,40	1210,5	1210				
1229,60	1230,9	1230				
1248,80	1247,7	1248b				
1531,70	1530,4	1530				
1551,70	1551,7	1551				
1571,60	1570,0	1570				
1591,50	1591,3	1591				

APÊNDICE E

RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICO-MINERALÓGICAS

IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SOLOS	CLASSE DE SOLO	AREIA TOTAL ¹ (%)	SILTE ¹ (%)	ARGILA TOTAL ¹ (%)	M.O. ² (g/kg)	S _i O ₂ ¹	Al ₂ O ₃ ¹	Fe ₂ O ₃ ¹	TiO ₂ ¹	DIFRAÇÃO de Raio-X ³		
						(%)				caulinita (%)	minerais 2:1 (%)	gibbsita (%)
P1	LE	94	2	4	1	1,7	0,76	1,27	0,40	55,90	44,10	0,00
P3	LE	70	4	26	3	9,9	7,80	3,79	0,90	56,20	41,90	1,90
P6	LE	80	2	18	3	3,8	4,03	2,18	0,60	63,90	36,10	0,00
P29	LE	64	2	34	11	8,0	8,77	3,54	0,88	59,80	40,20	0,00
P37	PV	86	2	12	7	4,2	1,94	0,45	0,37	52,70	47,30	0,00
P38	PV	78	2	20	9	5,8	5,51	1,50	0,56	50,90	49,10	0,00
P39	LE	62	2	36	17	9,3	9,48	4,15	0,91	49,30	48,30	2,40
P40	LE	76	4	20	19	5,2	3,72	1,54	0,60	46,20	53,80	0,00
P44	PV	84	4	12	14	2,8	2,04	1,07	0,53	50,40	49,60	0,00
P47	LR	33	12	55	32	17,5	10,96	17,77	2,19	24,90	75,10	0,00
P54	LR	77	7	16	19	38,3	13,61	20,02	1,74	41,30	54,40	4,30
P63	LR	33	11	56	42	21,4	12,65	29,03	2,47	20,70	79,30	0,00
P67	LR	40	8	52	22	17,8	12,85	28,60	2,14	42,10	55,10	2,80
P70	LR	49	8	43	35	19,5	10,35	14,57	1,94	37,90	60,20	1,90
P73	LR	59	6	35	30	11,7	8,87	10,33	1,74	36,60	62,20	1,20
P77	LE	88	2	10	11	3,5	2,14	2,29	0,80	15,20	84,80	0,00
P86	LR	27	12	61	3	19,7	14,74	20,50	2,07	36,60	61,50	1,90
P93	LR	35	8	57	22	16,6	14,53	24,97	2,19	34,70	62,10	3,20

1 – metodologia descrita em Camargo et al. (1986).

2 – metodologia descrita em Raij e Quaggio (1983).

3 – o preparo das amostras (50 mg) seguiu a metodologia descrita em Jackson (1969) e a determinação semi-quantitativa da caulinita e gibbsita foi realizada usando curvas de calibração preparadas com padrões de misturas da caulinita e gibbsita descrita em Dixon (1966).